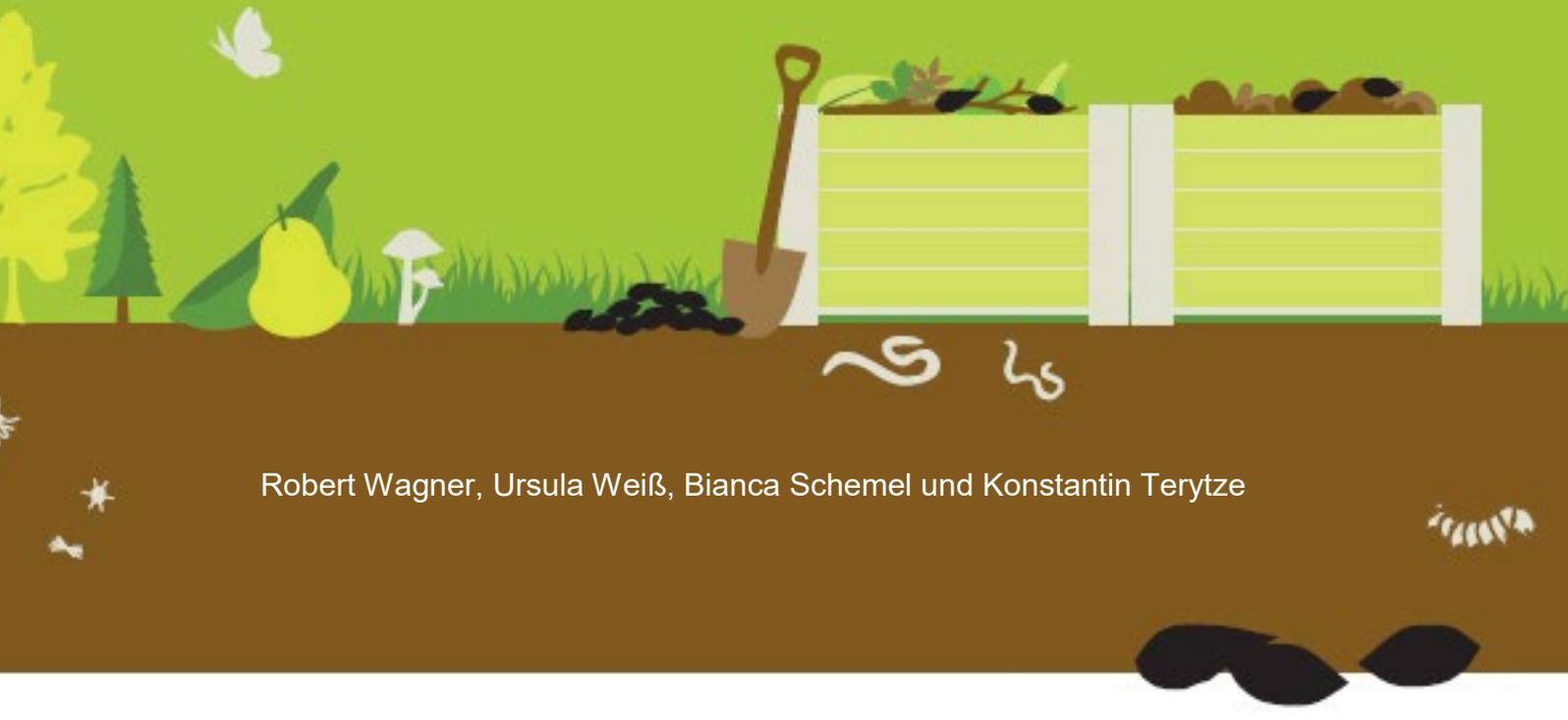




Verwertung von Gemüse- und Grünschnittabfällen zur Herstellung von Pflanzenkohlesubstraten für ein klimafreundliches Gärtnern

*Modellprojekt in der Berufsbildung
für nachhaltige Entwicklung*



Verwertung von Gemüse- und Grünschnittabfällen zur Herstellung von Pflanzenkohlesubstraten für ein klimafreundliches Gärtnern

Modellprojekt in der Berufsbildung für nachhaltige Entwicklung

Abschlussbericht

von Dr. Robert Wagner, Dr. Ursula Weiß und Dr. Bianca Schemel

Projektleitung: Prof. Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Terytze
Freie Universität Berlin
FB Geowissenschaften, Institut für Geografische Wissenschaften
AG Geoökologie
Malteserstr. 74-100
12249 Berlin

Illustrationen: Heide Kolling, <https://neonfisch.de/>

Förderung durch:

gefördert durch



www.dbu.de

Laufzeit: 39 Monate
Projektbeginn: 01.04.2017
Projektende: 30.06.2020
Projektnummer: 32783/01

Danke an die Projektbeteiligten

Wir bedanken uns bei Sabrina Hartmann, Petra Zafisambondaoky und Antonius Brochhaus, vom Umwelt-Bildungszentrum Berlin-Gatow für Ihre Unterstützung des Forschungsvorhabens und für Ihre Hilfs- und Diskussionsbereitschaft. Ein weiterer Dank gilt allen Umschüler*innen, die im Rahmen der Durchführung der Pflanzenkohle-Workshops tatkräftig beim Aufsetzen der Gartenkomposte mitgewirkt haben.

Ein besonderer Dank gilt Robert Shaw, Svenja Nette, Daniel Dermitzel, Nico Dürkop und Lisa Dobkowitz vom Prinzessinnengartenbau für die gute Zusammenarbeit, die Durchführung der Kompostierung und Bildungsworkshops im Gut Hellersdorf und den Besucher*innen des Gutsgartens für die Mithilfe bei der Pflege der Hochbeete.

Des Weiteren gilt ein großer Dank an Klaus Pellmann und Stephan Alker für das Öffnen von Türen an der Peter-Lenné-Schule Berlin, dem Oberstufenzentrum für Natur und Umwelt und Gartenbau, und der großartigen Zusammenarbeit und dem fruchtbaren Ideenaustausch. Für die Unterstützung der Bildungsarbeiten danken wir besonders Frau Babette Berndt.

Für die Unterstützung der Workshops und Führungen im Botanischen Garten möchten wir uns herzlich bei Thorsten Laute und allen weiteren Mitarbeiter*innen im Bereich der Kompostierung bedanken.

Für die Bereitstellung der Gemüse und Obstreste für die Kompostierung und den Ideenaustausch sowie die gute Zusammenarbeit mit der Berliner Tafel e. V. möchten wir uns ganz herzlich bei Sabine Werth, Timo Schmitt und Eva Rößler sowie allen involvierten ehrenamtlichen Mitarbeiter*innen bedanken.

Auch möchten wir uns bei der FETZER Rohstoffe + Recycling GmbH, NovoCarob GmbH, Carbon Terra GmbH und der EGoS GmbH für die Zusammenarbeit und den Austausch hinsichtlich der Herstellung und Bereitstellung von Pflanzenkohle bedanken.

Für den engen Austausch mit dem Fachverband Pflanzenkohle möchten wir uns ebenfalls bedanken.

Wir danken Frau Dr. Nadine Herwig, Frau Catrin Vetter und Frau Roshanak Taghinia sowie Herrn Dr. Dieter Felgentreu, Frau Verena Misgaiski und Herrn Dr. Deniz Baltaci und allen nicht genannten Mitarbeiter*innen des Julius-Kühn Institutes für ökologische Chemie,

Pflanzenanalytik und Vorratsschutz (JKI-ÖPV), die durch Ihr fachliches know-how sowie Ihre kompetente technische Unterstützung bei den Laborarbeiten und der Versuchsbetreuung zum Erfolg dieses Projektes beigetragen haben.

Ebenfalls bedanken wir uns für die vielfältige Unterstützung durch unsere Kolleg*innen Dipl.-Geogr. René Schatten, Dr. Ines Vogel und Zirafeta Berisha sowie bei unseren studentischen Hilfskräften Lina Geiges-Erzesgräber für die Betreuung des Kompostversuches am UBB und der Mitarbeit bei den Bildungsmodulen und -workshops, Margareta Kocikowski und Thomas Sobek für die Hilfe im Gelände und Labor.

Danke an die Fördermittelgeber

Für die Finanzierung des Forschungsvorhaben „Verwertung von Gemüse- und Grünschnittabfällen zur Herstellung von Pflanzenkohlesubstraten für ein klimafreundliches Gärtnern - Modellprojekt in der Berufsbildung für nachhaltige Entwicklung“ mit dem Kurztitel „BodenBerufsBildung“ danken wir der Deutschen Bundesumweltstiftung.

Ein besonderer Dank gilt dabei Frau Verena Exner für die Unterstützung des Projektes und für die ebenfalls gute Zusammenarbeit.

Berlin, den 06.12.2020

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis	10
Abbildungsverzeichnis.....	13
1 <u>EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNGEN</u>.....	16
2 <u>STAND PFLANZENKOHLETECHNOLOGIE</u>.....	19
2.1 PFLANZENKOHLETECHNOLOGIE ALS NET	20
2.2 EIGENSCHAFTEN VON PFLANZENKOHLE.....	21
2.3 ANWENDUNG VON PFLANZENKOHLE.....	22
2.3.1 Kompostierung	23
2.3.2 Boden Anwendung	24
2.3.3 Pflanzenbau	25
3 <u>AKTUELLE PROBLEMSTELLUNG UND AUSGANGSSITUATION BBNE</u>	27
4 <u>VERWERTUNG VON GEMÜSE- UND GRÜNSCHNITTABFÄLLEN ZUR HERSTELLUNG VON PFLANZENKOHLESUBSTRATEN - AUFBAU VON KOMPOSTIERUNGSANLAGEN AN DEN MODELLSTANDORTEN</u>	29
4.1 GARTENKOMPOSTIERUNG AM UMWELT-BILDUNGSZENTRUM BERLIN (UBB).....	30
4.2 KOMPOSTIERUNG IM GUT HELLERSDORF.....	34
4.3 KOMPOSTIERUNG IM BG.....	38
5 <u>WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITUNG UND UNTERSUCHUNG DER KOMPOSTIERUNGSVERSUCHE UND SUBSTRATANWENDUNG</u>.....	39
5.1 VOR-ORT-PARAMETER KOMPOSTIERUNG.....	39
5.2 LABORUNTERSUCHUNGEN KOMPOST- UND SUBSTRATPROBEN	40
5.3 THG-MESSUNGEN.....	42
5.4 BÖDEN UND PFLANZEN.....	45
5.4.1 Hellersdorf	45
5.4.2 Umweltbildungszentrum	48
5.4.3 Pflanzentests	54
6 <u>ERGEBNISSE ZUR KOMPOSTIERUNG UND DER WIRKUNG VON PFLANZENKOHLE</u>	58
6.1 KOMPOSTIERVERSUCHE AM UBB.....	58
6.1.1 Vorversuche und Optimierung Gartenkompostierung.....	58
6.1.2 Kompostversuch zur Bestimmung der Wirkung von PK auf THG und Kompostparameter in der Gartenkompostierung.....	60
6.1.2.1 Zusammensetzung und relevante Parameter des Kompostansatzes	60
6.1.2.2 Ergebnisse Temperatur und Gasentwicklung	62
6.1.2.3 Kompostqualität.....	69

6.2	KOMPOSTIERVERSUCHE IM GUTSGARTEN HELLERSDORF	72
6.2.1	Vorversuche und Optimierung	72
6.2.2	Kompostversuch zur Bestimmung der Wirkung von PK auf THG und Kompostparameter in der Großkompostierung mit Gemüse-/Obstabfällen	77
6.2.2.1	Zusammensetzung des Kompostansatzes	77
6.2.2.2	Ergebnisse Temperatur und Gasentwicklung	78
6.3	FAZIT - WIRKUNG VON PFLANZENKOHLE IN DER KOMPOSTIERUNG	80
6.4	WIRKUNG UND EINFLUSS VON PFLANZENKOHLEKOMPOST AUF BODEN UND PFLANZEN	82
6.4.1	Böden	82
6.4.2	Pflanzenwachstum	88
6.4.3	Pflanzeninhaltsstoffe	91
7	<u>STOFFSTROM- UND ÖKOBILANZIERUNG</u>	99
7.1	UBB	101
7.1.1	Stoffstromanalyse und Massenbilanz Ist-Zustand	101
7.1.2	Stoffstromszenarium und Massenbilanz Eigenverwertung und Vergleich mit Entsorgung	104
7.1.3	CO ₂ -Bilanz der Entsorgung und Eigenverwertung	108
7.1.3.1	Ausgangslage (Ist-Zustand Entsorgung)	108
7.1.3.2	Eigenverwertung zu Pflanzenkohlekompost	109
7.1.3.3	Vergleich Entsorgung zu Eigenverwertung	111
7.2	GUT HELLERSDORF	112
7.2.1	Stoffstromanalyse und Massenbilanz Kompostierung	112
7.2.2	Pflanzenkohleherstellung vor Ort	115
7.2.3	CO ₂ -Bilanz Kompostierung, PK-Herstellung, Energetische Nutzung und Vergleich	117
7.2.3.1	Ausgangslage (Vergleichsszenario Biogas und Verbrennung)	117
7.2.3.2	Verwertung zu Pflanzenkohlekompost	118
7.2.3.3	Vergärung und Verbrennung vs. Kompostierung und Karbonisierung	122
8	<u>ETABLIERUNG VON WERTSCHÖPFUNGSKETTEN</u>	125
8.1	ANALYSE DER MARKTSITUATION	125
8.1.1	Karbonisierungsanlagen	126
8.1.2	Pflanzenkohlehersteller	130
8.1.3	Anbieter von Pflanzenkohlesubstraten	131
8.2	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG DER UNTERSUCHTEN WERTSCHÖPFUNGSKETTE IM GUT HELLERSDORF	132
8.3	PRÜFUNG UND ETABLIERUNG EINES QUALITÄTSSIEGELS	134
9	<u>ENTWICKLUNG, ERPROBUNG UND PUBLIKATION VON BILDUNGSMODULEN</u>	135
9.1	INHALTLICHE UND ZIELGRUPPENSPEZIFISCHE KONZEPTION DER MODULE UND WORKSHOP-FORMATE	137
9.2	ERPROBUNG DER MODULE UND SCHULUNGEN MIT DEN VERSCHIEDENEN ZIELGRUPPEN UND EVALUIERUNG DER ERGEBNISSE	137
9.3	ABSCHLIEßENDE ERARBEITUNG UND PUBLIKATION DER BILDUNGSMODULE	141

9.4 DURCHFÜHRUNG VON WORKSHOPS ZU DEN BILDUNGSMATERIALIEN MIT MULTIPLIKATOR*INNEN	146
<u>10 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT UND VERNETZUNG</u>	<u>147</u>
10.1 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	147
10.2 VERNETZUNG	151
<u>11 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</u>	<u>153</u>
<u>12 LITERATUR</u>	<u>156</u>
Anhang: Überblick Karbonisierungsanlagen.....	171

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BBNE	Berufsbildung für nachhaltige Entwicklung
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BG	Botanischer Garten Berlin
BGK e.V.	Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.
BSR	Berliner Stadtreinigung
CAL	Calcium-Acetat-Lactat Auszug
CAT	Caliumchlorid/DPTA-Auszug
CO _{2eq}	Kohlenstoffäquivalente
C _{org}	organischer Kohlenstoff
C _t	Gesamtkohlenstoff
dest.	destilliert
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DOC	löslicher Kohlenstoff (Dissolved organic carbon)
DÜMV	Düngemittelverordnung
EBC	European Biochar Certificate
EC	Elektrische Leitfähigkeit
EU	Europäische Union
FM	Frischmasse
FS	Frischsubstanz
GS	Grünschnitt
GV	Glühverlust
H/C-Verhältnis	Wasserstoff/Kohlenstoff-Atom-Verhältnis
IR	Intensiv Rotte
ISO	International Standard Organisation
JKI	Julius Kühn-Institut
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
k. A.	keine Angaben
KAK _{eff}	Kationenaustauschkapazität
K _{CAL}	Kalium im Calcium-Acetat-Lactat-Auszug
K _{CAT}	Kalium im Calciumchlorid/DPTA-Auszug
KW	Königswasser
LF	Leitfähigkeit
MW	Mittelwert
NET	Negative-Emissionen-Technologie
N _{min}	mineralischer Stickstoff
N _t	Gesamtstickstoff

org	organisch
OS	Organische Substanz
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
P _{CAL}	Phosphor im Calcium-Acetat-Lactat-Auszug
P _{CAT}	Phosphor im Calciumchlorid/DPTA-Auszug
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PGB	PrinzessinenGartenBau
PCF	Product Carbon Footprint
PK	Pflanzkohle
PKS	Pflanzkohlesubstrat
RD	Rohdichte
SOC	Soil organic carbon
STABW	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
TC	Gesamtkohlenstoff (Total carbon)
TD	Trockendichte
THG	Treibhausgase
TM	Trockenmasse
TOC	organischer Kohlenstoff (Total organic carbon)
TS	Trockensubstanz
UBB	Umweltbildungszentrum Berlin
UfU	Unabhängiges Institut für Umweltfragen, Berlin
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
Vol.-%	Volumen-%
W/F	Wasser/Feststoff-Verhältnis
WG	Wassergehalt
WHK _{max}	maximale Wasserhaltekapazität

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Parameter der im Botanischen Garten Berlin Dahlem hergestellten Pflanzenkohle-Chargen.....	21
Tabelle 2: Übersicht über die untersuchten Laborparameter mit den dazugehörigen Methoden	41
Tabelle 3: Labormethoden zur Untersuchung der bodenchemischen- und physikalischen Eigenschaften	47
Tabelle 4: Erntetermine, Kultur, Stückzahl, Pflanzenteile am Standort Gutsgarten Hellersdorf.....	48
Tabelle 5: Korngrößen und Bodenart der Oberböden (0-20 cm Tiefe) in den 6 Gartenbeeten am UBB	49
Tabelle 6: Farbwerte Munsell, bodenchemische Eigenschaften und Humusgehalte der Gartenbeete in 0-20 cm Tiefe	50
Tabelle 7: KAK_{eff} , N_{min} , K_{CAT} und P_{CAT} der Gartenbeete in 0-20 cm Tiefe	50
Tabelle 8: Gesamtschwermetallgehalte (As, Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Cr) der Oberböden (0-20 cm Tiefe) in den Beeten im UBB	51
Tabelle 9: Erntetermin, Kultur, FM, TS, TM-Erträge und Inhaltsstoffe am Standort UBB	52
Tabelle 10: Chemisch- physikalische Eigenschaften der eingesetzten Substrate in den Hochbeeten und am UBB.....	53
Tabelle 11: Chemisch-physikalische Eigenschaften der Gartenerde zum Einmischen in die Hochbeete	54
Tabelle 12: Gesamtschwermetallgehalte (As, Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Cr) der Inputstoffe im Vergleich zu den geltenden Vorgaben.....	54
Tabelle 13: Ergebnisse zu Kompost - Umweltbildungszentrum (Auszug Qualitätskriterien und Güterrichtlinien, BGK).....	59
Tabelle 14: Zusammensetzung der Versuchsmieten (Ansatz mPK: mit Pflanzenkohle, Ansatz oPK: ohne Pflanzenkohle; FM: Frischmasse, TM: Trockenmasse)	60
Tabelle 15: Übersicht über die Eigenschaften der verwendeten Pflanzenkohle (GV: Glühverlust, FM: Frischmasse, TM: Trockenmasse).....	61
Tabelle 16: Beschaffenheit des Inputmaterials (GV: Glühverlust, FM: Frischmasse, TM: Trockenmasse)	62
Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Treibhausgasemissionen aus Komposten aus verschiedenen Studien.....	68
Tabelle 18: Ergebnisse der Kompostanalysen.....	69
Tabelle 19: Ergebnisse der Schwermetallanalyse, mit Grenzwerten nach BioAbfV (2017) und BGK (2018) für den Kompost (Tag 146)	71
Tabelle 20: Ergebnisse der Gesamtgehalte, eluierbare Bestandteile und der mobilisierbaren Anteile für den Kompost am Tag 146	71

Tabelle 21: Ausgewählte physikalische und chemische Parameter der verwendeten Pflanzenkohlen (PK) im Vergleich mit den Grenzwerten des EBC (MW: Mittelwert; STABW: Standardabweichung)	72
Tabelle 22: Temperaturentwicklung in den ersten Mieten 1 - 4. (Zeitraum 13.02. bis 28.06.2018)	73
Tabelle 23: Physikalische und chemische Parameter der Komposte der Optimierungphase, HDK 1 und 2* (WG: Wassergehalt, SG: Salzgehalt, RD: Rohdichte, OS: organische Substanz, C: Kohlenstoff, N: Stickstoff, FM: Frischmasse).....	73
Tabelle 24: Schwermetallgehalte (MW±STABW) der Komposte mit Pflanzenkohle im Vergleich zu den Schwermetallanforderungen der geltenden Vorgaben der BGK und BBodSchV (Bodenart Lehm/Schluff).....	75
Tabelle 25: Ergebnisse Kompost (Auszug Qualitätskriterien und Güterrichtlinien, BGK).....	76
Tabelle 26: Schadstoffgehalte der beprobten Gemüse- und Obstreste und Holzhäcksel im Vergleich zu den Schwermetallanforderungen der geltenden Vorgaben der DüMV und BioAbfV	77
Tabelle 27: Zusammenfassende Übersicht der Wirkung von Pflanzenkohle im Kompost	81
Tabelle 28: pH-Wert und Salzgehalt [g/l FS] in den Oberböden der Hochbeete (0-15 cm) und Garten-beeten (0-20 cm) an zwei verschiedenen Terminen	82
Tabelle 29: Rohdichte und maximale Wasserhaltekapazität der Hochbeete und am UBB zu zwei verschiedenen Terminen	83
Tabelle 30: C _T -, C _{org} - und N _T -Gehalte sowie C/N- Verhältnisse in den Hochbeeten und Gartenbeeten zu verschiedenen Terminen (Hellersdorf: 13.06.19/10.10.19; UBB 27.06.19/10.10.19)	84
Tabelle 31: Schwermetallgehalte (As, Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Cr) der Oberböden in den Hochbeeten in Hellersdorf und am UBB	84
Tabelle 32: N _{min} -Gehalte im Juni und Oktober 2019 in den Hochbeeten.....	85
Tabelle 33: Nitrat-N und Ammoniumgehalte [mg/kg] in den Oberböden (0-20 cm Tiefe) der Gartenbeete am 27.06 und am 10.10.19	86
Tabelle 34: Trockenmasseerträge der Kohlrabiblätter und -wurzeln [g TM/3 Pflanzen] und TS [%] in den 4 Hochbeeten am 09.07.2019	89
Tabelle 35: Salat- und Zwiebelerträge [g TS/ Pflanzen], TS [%], Erntetermine in den 4 Hochbeeten.....	90
Tabelle 36: Frischmasse, Trockensubstanz und Trockenmasse Rotkohl (3 Köpfe) am 18.09.2019 in den Varianten UBB oPK und UBB mPK.....	91
Tabelle 37: Nährstoffgehalte (N, P, K und Mg) von Kohlrabi, Salat und Zwiebeln von den Hochbeeten in Hellersdorf	92
Tabelle 38: Stickstoff- (N), Phosphor- (P), Kalium- (K) und Magnesium- (Mg) Gehalte in Gemüse im Erwerbsgartenbau nach LFULG (2020).....	93
Tabelle 39: Nährstoffgehalte (N, P, K und Mg) der geernteten Pflanzenteile von den Gartenbeeten am UBB	93

Tabelle 40: Schwermetallgehalte (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zink) [mg/kg] der Gemüsepflanzen der vier Hochbeete in Hellersdorf.....	95
Tabelle 41: Schwermetallgehalte (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zink) [mg/kg] der beprobten Gemüsepflanzen in beiden Varianten am UBB.....	96
Tabelle 42: Zulässige Pb- und Cd- Höchstgehalte in Lebensmitteln (Verordnung (EG) Nr. 1881, 2006).....	96
Tabelle 43: Treibhauspotenzial untersuchter Stoffflüsse auf Basis der Abfallbilanz/Berichterstattung von Berlin (ifeu, 2019).....	100
Tabelle 44: Treibhauspotenzial der wichtigsten Treibhausgase nach IPCC (2007).....	101
Tabelle 45: Jährliche In- und Outputströme, dargestellt als Massenbilanz und Nährstoffbilanz C, N, P und K (Bilanzzeitraum 2018/2019).....	103
Tabelle 46: In- und Outputströme im Szenario Eigenverwertung, dargestellt als Massenbilanz und Nährstoffbilanz C, N, P und K	105
Tabelle 47: Massenbilanz und Nährstoffbilanz C, N, P und K der Herstellung von Pflanzenkohle und Kompost im UBB	106
Tabelle 48: Vergleich der Nährstoff und Kohlenstoffmassenbilanz im UBB	107
Tabelle 49: Vergleich der Nährstoff und Kohlenstoffmassenbilanz im UBB (positiv: verlässt das System, negativ: verbleibt im System).....	109
Tabelle 50: CO _{2eq} Prozess Pflanzenkohle (Lagerfeuer) im System UBB, Szenario Verwertung.....	110
Tabelle 51: CO _{2eq} einzelner Prozesse im System UBB, Szenario Verwertung.....	110
Tabelle 52: Jährliche In- und Outputströme, dargestellt als Massenbilanz und Nährstoffbilanz C, N, P und K.....	114
Tabelle 53: Aufstellgrenzen für kleinere Compact-Converter Heizkessel der Firma BIOMACON.....	115
Tabelle 54: CO _{2eq} einzelner Prozesse in Bezug auf die verarbeitbare Menge im Gut Hellersdorf, Szenario Entsorgung.....	117
Tabelle 55: CO _{2eq} der Herstellung von Pflanzenkohle. Bezogen auf 1 Tonne Pflanzenkohle mit 20 Prozent Wasser	118
Tabelle 56: CO _{2eq} der Bereitstellung der Inputmaterialien Bioabfälle Tafel, Holzhackschnitzel und Pflanzenkohle (L: Lagerung, T: Transport, H: Herstellung)	119
Tabelle 57: CO _{2eq} der Bereitstellung der Inputmaterialien Bioabfälle Tafel, Holzhackschnitzel und Pflanzenkohle (L: Lagerung, T: Transport, H: Herstellung)	120
Tabelle 58: CO _{2eq} der gesamten Prozesskette	121
Tabelle 59: In- und Outputmenge, Wärmemenge und der benötigten Stellfläche für Anlagen der Firmen BIOMACON und PYREG	128
Tabelle 60: Übersicht zu den durchgeführten Probeläufen	138
Tabelle 61: Modulübersicht aus dem Bildungsmaterial „Pflanzenkohle“	142

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektschema Schließung Regionaler Stoffkreisläufe und Umweltbildung	16
Abbildung 2: Potenzial der Karbonisierung von Pflanzenresten hinsichtlich der langfristigen Speicherung von Kohlenstoff (C) und der Bereitstellung von nutzbarer Wärme in dezentralen Kreislaufkonzepten	19
Abbildung 3: Problemfelder der globalen Entwicklung und Pflanzenkohle- und Biomassemanagement.....	23
Abbildung 4: Pflanzenkohle(substrate) und Umsatz von Boden-Kohlenstoff, SOC = Soil Organic Carbon (nach Weng, 2015).....	24
Abbildung 5: Luftbild mit Kompostierungsstandorten und Modellprojekten für BBNE.....	29
Abbildung 6: Gemüsebeete am UBB	30
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Kompostbereiches	31
Abbildung 8: Sammelkomposter für Gemüsereste am UBB.....	32
Abbildung 9: Inbetriebnahme der Kompostierung am UBB mit Auszubildenden	32
Abbildung 10: Pflanzenkohle durch rechtzeitiges Ablöschen der Glut bei Nutzung einer Feuerschale	33
Abbildung 11: Standort Kompostplatz und Modellprojekt im Gut Hellersdorf	34
Abbildung 12: Beladen des Kompostmischers und Aufsetzen der Miete im Gutsgarten Hellersdorf.....	35
Abbildung 13: Thermometer zur Überwachung der Mietentemperatur während der Kompostierung und Mietenprotokoll zur Dokumentation von Temperatur, Feuchte und Geruch	36
Abbildung 14: Gemüse-/Obstrestesammlung bei der Berliner Tafel, Annahmeplatz, Probesiebung und Siebreste in Hellersdorf	37
Abbildung 15: Karbonisierungsanlage (links) und Kompostierung (rechts) im Botanischen Garten Berlin	38
Abbildung 16: Kennzeichnung des Messbereichs der Temperatur	39
Abbildung 17: Übersicht über den Temperaturverlauf während der Kompostierung (Wagner und Schatten, 2016).....	40
Abbildung 18: Haubenmessung vor Ort mit Messgerät und Gasbeutelprobenahme am Beispiel der Kompostierung am UBB (links), Haubenrückseite mit Luftzustromlöchern (rechts).....	42
Abbildung 19: Größe, Aufbau und Varianten der vier Hochbeete im Gutsgarten Hellersdorf.....	45
Abbildung 20: Hochbeete mit Infotafeln am Gut Hellersdorf (07.08.2019).....	48
Abbildung 21: Bodenprobennahme am 05.09.2018 und Gemüsegarten am 31.01.2019	49
Abbildung 22: Ausbringung des Pflanzenkohlekompostes am 25.04.2019 (li.), bepflanzte Beete und Infoschild (re.) am UBB	51
Abbildung 23: Körnungs-Summenkurve der vier eingesetzten Substrate.....	53

Abbildung 24: Kressetest zu Beginn und nach 72 Stunden Inkubation	56
Abbildung 25: AGR [%], RI [%] und MLV [%] (MW ± STABW, n=5).....	56
Abbildung 26: Chinakohltest Durchführung (li. Bild) und Ergebnisse (re. Bild)	57
Abbildung 27: Temperaturverlauf des ersten Kompostversuches (Kompost 1 & 2) und der Außentemperatur (FM: Frischmaterial).....	58
Abbildung 28: Aufschichten der Komposte.	61
Abbildung 29: Verläufe von Temperatur, Kohlendioxid, Methan, Lachgas und Ammoniak sowie die Gesamtemissionen und die daraus abgeleitete CO ₂ -Äquivalente	64
Abbildung 30: Abbau der organischen Substanz (OS) im Vergleich von Tag 1 und Tag 146 der Kompostansätze mit und ohne Pflanzenkohle	70
Abbildung 31: Temperaturverlauf der ersten beiden Kompostversuche.....	74
Abbildung 32: Temperaturverlauf der beiden Kompostversuche mit und ohne Pflanzenkohle.....	78
Abbildung 33: Verläufe von Kohlendioxid, Methan, Ammoniak und Schwefelwasserstoff für die Lanzenmessung (links, blauer Rahmen) und für die Messung mit einer Haube (rechts, grüner Rahmen).....	79
Abbildung 34: NO ₃ - und NH ₄ - Gehalte [mg/kg] in den Hochbeeten am 13.06. und 10.10.2019	85
Abbildung 35: K _{CAL} - Gehalte [mg/kg] in den Hochbeeten und am UBB an zwei verschiedenen Terminen	87
Abbildung 36: P _{CAL} Gehalte [mg/kg] in den Hochbeeten und am UBB an zwei verschiedenen Terminen	88
Abbildung 37: Aufbereitung der Kohlrabipflanzen für die Analysen (Blätter, Knollen, Wurzeln) und Trockenmasseerträge [g TM/3 Pflanzen] in den 4 Hochbeeten am Standort Gut Hellersdorf.....	89
Abbildung 38: Blumenkolertrag [g TM/3 Pflanzen] (Kopf-, Blatt und Wurzel) in den beiden Varianten mit am UBB (n=3, MW ± STABW)	90
Abbildung 39: Transferfaktoren für Cd und Zn im Salat in den Hochbeeten.....	97
Abbildung 40: Verwertungswege der Berliner Bioabfälle aus der Biotonne und Stoffflussmengen in Tonnen Frischmasse (verändert nach ifeu, 2019 und UBA.....	100
Abbildung 41: Schematische Darstellung des Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalts des Umweltbildungszentrums Berlin und Darstellung des Ist-Zustandes (Entsorgung)	102
Abbildung 42: Schematische Darstellung des Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalts nach erfolgter Kreislaufschließung und Eigenverwertung organischer Reststoffe zu Pflanzenkohle (1) und Kompost (2)	104
Abbildung 43: Vergleich der CO _{2eq} -Bilanzen der Szenarien Entsorgung und Eigenverwertung im UBB	111
Abbildung 44: Vereinfachtes Stoffstrommodell des Kompostprozesses mit In- und Outputstellen	112
Abbildung 45: Massenbilanz des Kompostprozesses am Standort Gut Hellersdorf	113
Abbildung 46: Compact Converter Prozess (Beispiel Container Lösung).....	115

Abbildung 47: Bilanz des Karbonisierungsprozesses, ausgelegt auf die verfügbare Biomasse am	116
Abbildung 48: Vergleich der CO ₂ eq-Bilanzen des Ausgangsszenarios und der Herstellung von Pflanzkohlekompost im Gut Hellersdorf in vier Szenarien (a – d).....	123
Abbildung 49: Überblick über Pflanzkohlehersteller, -anwender und Forschungseinrichtungen	125
Abbildung 50: Anlagenbeispiele, C-100F der Firma BIOMACON	127
Abbildung 51: P500 Biomasse der Firma PYREG	129
Abbildung 52: Bauanleitung für einen einfachen Pyrolyseofen und Versuchsanleitung „Herstellung von Pflanzkohle“.....	136
Abbildung 53: Screenshot Video „Die Geschichte der Terra Preta“ und Seite aus Comic...	138
Abbildung 54: Workshops im Botanischen Garten, am UBB und im BELARE an der Peter Lenné Schule	139
Abbildung 55: Evaluationsergebnisse.....	140
Abbildung 56: Titelblatt des Bildungsmaterials Pflanzkohle	141
Abbildung 57: Titelblatt des Unterrichtsmaterials	144
Abbildung 58: Kurzname und Logo des Projekts	147
Abbildung 59: Projektinformation für Präsentationen auf Veranstaltungen und Tagungen (Rollup)	147
Abbildung 60: Screenshot der Projektwebseite.....	148
Abbildung 61: Präsentation auf der Grünen Woche (li. Bild), Führung Botanischer Garten (re. Bild)	149
Abbildung 62: Stand zur Langen Nacht der Wissenschaften FU Berlin, 09.06.2018	150
Abbildung 63: Auszeichnung Umweltschule Europa – Agenda 21 Schule	150

1 Einleitung und Zielstellungen

Das Forschungsvorhaben „Verwertung von Gemüse- und Grünschnittabfällen zur Herstellung von Pflanzenkohlesubstraten für ein klimafreundliches Gärtnern - Modellprojekt in der Berufsbildung für nachhaltige Entwicklung“ untersuchte die Schließung regionaler Stoffkreisläufe mittels Pflanzenkohletechnologie und schuf Modellprojekte, mit dem Ziel berufliche und schulische Aus- und Weiterbildung zu fördern und anschaulich erlebbar zu machen (Abbildung 1).

Durch den Aufbau bzw. die Nutzung von Kompostieranlagen mit Pflanzenkohle, entstanden modellhafte Lernorte am Umweltbildungszentrum Berlin, im Gutsgarten Hellersdorf und im Botanischen Garten Berlin-Dahlem, an denen zugleich lokale Stoffkreisläufe geschlossen wurden. Eigens entwickelte Bildungsmaterialien und Workshops vermitteln das Thema mit Bezug zu Klima-, Ressourcen- und Bodenschutz an Auszubildende, Lehrende und Multiplikatoren.

Ziel war es sowohl das Bewusstsein für die Bedeutung nachhaltiger Stoffkreisläufe und ihrer Schließung für den Klima- und Umweltschutz in der beruflichen Bildung zu entwickeln als auch die umweltentlastenden Potenziale der Kreislaufschließung mit Pflanzenkohle zu erheben, die vor allem in der Abfallvermeidung, Ressourceneffizienz, Kohlenstoffbindung im Boden, Bodenverbesserung und Einsparung von Dünger liegen.

Die Kompostierung mit Pflanzenkohle wurde an den einzelnen Modellstandorten wissenschaftlich begleitet und die Umweltwirkung mittels Ökobilanz ermittelt. Anhand des Modellprojektes im Gut Hellersdorf wurde zudem untersucht ob die Nutzung von Gemüse- und Obstresten der Tafel Berlin e.V. und vor Ort verfügbare holziger Grünschnittmaterialien zu Pflanzenkohlesubstrat zu einer besseren Klimabilanz führen kann, als die energetische Nutzung durch Biogas bzw. Verbrennung.

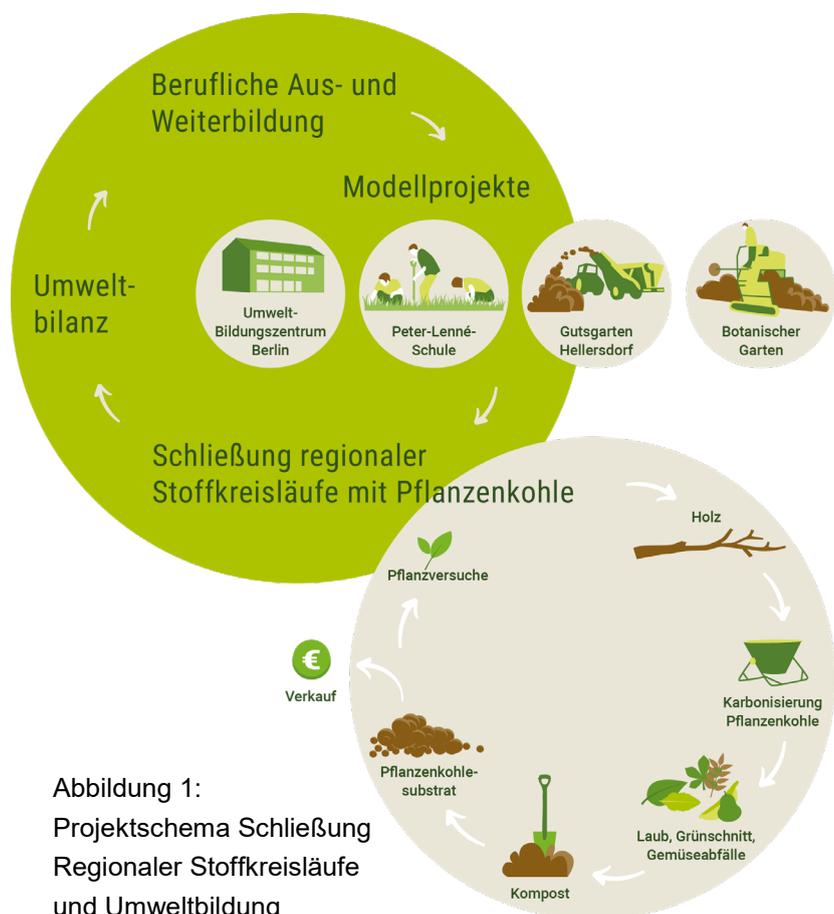


Abbildung 1:
Projektschema Schließung
Regionaler Stoffkreisläufe
und Umweltbildung

Das Forschungsvorhaben wurde durch die Arbeitsgruppe Geoökologie der Freien Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Terytze durchgeführt. Zur Erreichung der Projektziele wurde das Projekt mit verschiedenen Projektpartnern realisiert.

PrinzessinnenGartenBau UG

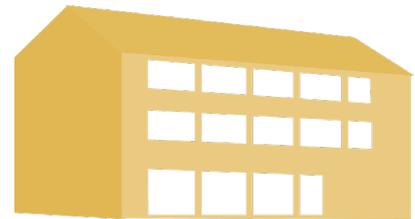
Im Gutsgarten in Hellersdorf gründet die PrinzessinnenGartenBau UG (PGB), eine Tochter der gemeinnützigen GmbH Nomadisch Grün, ein Erdenwerk. Im Erdenwerk werden die organischen Abfälle der Berliner



Tafel - einem gemeinnützigen Verein, der Lebensmittel rettet und an bedürftige Menschen und Organisationen verteilt – und der Fa. Bebra, einer ortsansässigen Garten- und Landschaftsbaufirma, kompostiert und anschließend das Substrat vermarktet. Zugleich dient die Kompostanlage und der daran angeschlossene Gemeinschaftsgarten als Lernort.

Umweltbildungszentrum Berlin

Das Umweltbildungszentrum Berlin (UBB) ist sowohl Ausbildungsbetrieb als auch Seminarzentrum. Als ein Schulungsstandort von FORUM Berufsbildung werden am UBB Umschulungen im Hotel- und Gastgewerbe und Fortbildungen zu Nachhaltigkeit durchgeführt. Im Rahmen des Projekts wurde eine Gartenkompostanlage errichtet, lokal der Stoffkreislauf geschlossen. Die Themen des Projekts wurden in den Umschulungen und Fortbildung des UBB integriert.



Peter-Lenné-Schule, OSZ Natur und Umwelt

Das OSZ dient der Berufsvorbereitung, Ausbildung, Weiterbildung und Studienbefähigung in den Bereichen Forstwirtschaft, Tierpflege, Gartenlandschaftsbau,



Produktionsgartenbau, Floristik, Umweltschutztechnik. Die Themen des Projekts wurden an die Auszubildenden in Unterrichtsmodulen und Workshops am Lernort Botanischer Garten und in der Berufsschule vermittelt. In Weiterbildungen für die Lehrkräfte des OSZ wurden die erstellten Unterrichtsmaterialien weitergegeben.

Berliner Tafel e.V.

Die Berliner Tafel ist ein gemeinnütziger Verein, der Lebensmittel vor der Vernichtung rettet. Sie fährt pro Woche bis zu 600 Supermärkte an und liefert die Lebensmittel an Beratungsstellen, Schul-, Theater und Frauenprojekte und andere soziale Organisationen. Die



Botanischer Garten Berlin-Dahlem

Im Botanischen Garten (BG) wurde von der AG Geoökologie im Projekt TerraBoGa die Pflanzenkohletechnologie erfolgreich beforscht. Der Botanische Garten wurde als Lernort genutzt, um die Karbonisierungstechnologie und die Anwendung der Pflanzenkohle in der Kompostierung zu veranschaulichen und erfahrbar zu machen.



Des Weiteren wurden vier **kleine und mittelständische Pflanzenkohlehersteller** in das Projekt einbezogen.

- FETZER Rohstoffe + Recycling GmbH (73054, Eislingen)
- Novo Carob GmbH (56281, Dörth)
- Carbon Terra GmbH (86757, Wallerstein)
- EGoS GmbH (46244, Bottrop)

Bei den Herstellern wurde auf eine nachvollziehbare Qualitätssicherung Wert gelegt. Die Pflanzenkohlen dieser Hersteller wurden analysiert und nach EBC bewertet und in Versuchen eingesetzt.

In einem engen Austausch mit dem **Fachverband Pflanzenkohle** wurden thematische Fragen zu Pflanzenkohle, Kreislaufschließung und Bildungsmaßnahmen erörtert.

2 Stand Pflanzkohletechnologie

Die Wertschöpfung von pflanzlichen Reststoffen zu Pflanzkohle eröffnet einen einfachen Weg, um atmosphärisches CO₂ über die pflanzliche Biomasse in eine stabile Lagerform zu konvertieren (Abbildung 2). Pflanzkohle¹ bezeichnet hierbei das Endprodukt der Karbonisierung von Biomasse durch Pyrolyse.

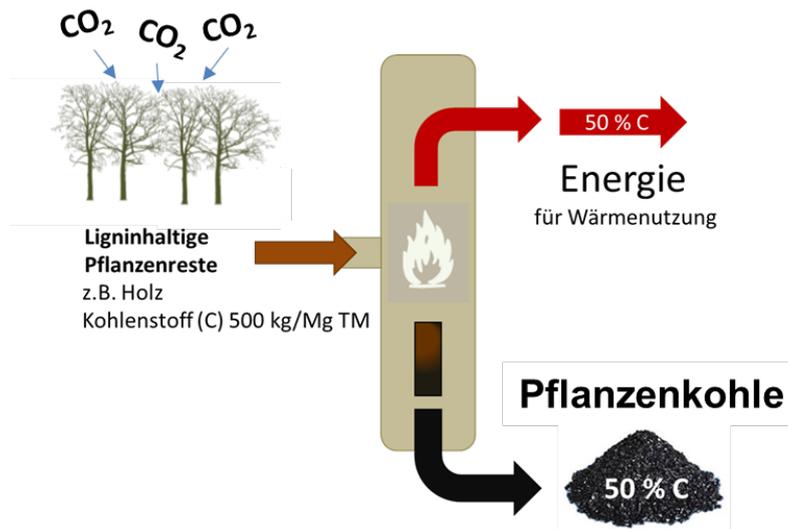


Abbildung 2: Potenzial der Karbonisierung von Pflanzenresten hinsichtlich der langfristigen Speicherung von Kohlenstoff (C) und der Bereitstellung von nutzbarer Wärme in dezentralen Kreislaufkonzepten

Mit einer Karbonisierungsanlage wird neben qualitativ hochwertiger Pflanzkohle u. a. Energie in Form von Wärme bereitgestellt, die für die Beheizung von Gebäuden genutzt werden kann. Bei der Karbonisierung wird im Gegensatz zur Verbrennung oder natürlichen

¹ Neben **Pflanzkohle** werden weitere Begriffe wie **Holzkohle**, **Biokohle** und **Aktivkohle** verwendet.

Holzkohlen und Aktivkohlen bestehen wie Pflanzkohlen aus pflanzlicher Biomasse. Holzkohle ist jedoch klar definiert, als aus Holz und nicht aus anderen Biomassen hergestellte Kohle und wird hauptsächlich mit der energetischen Verwertung assoziiert. Während Pflanzkohlen aus einer Vielzahl verschiedener, nicht kontaminierter pflanzlicher Biomassen hergestellt werden können. Durch die hohe Kohlenstoffdichte bereits im Ausgangsmaterial Holz (ca. 50 %) weisen Pflanzkohlen aus Holz in der Regel höhere Kohlenstoffgehalte (C > 80 %) auf als Pflanzkohlen, die z.B. aus Grünschnitt, Gräsern oder Stroh hergestellt wurden. Der Begriff Biokohle wird im deutschsprachigen Raum als Synonym für Pflanzkohle und als unspezifischer Sammelbegriff für verschiedene Herstellungsverfahren verwendet (Torrefizierung, Vergasung oder Hydrothermale Karbonisierung (HTC)). Aktivkohlen können aus jedweden Pflanzkohlen hergestellt werden, wobei im Anschluss an die Pyrolyse ein Aktivierungsprozess nachgeschaltet wird. Im Aktivierungsprozess wird die Pflanzkohle bei hohen Temperaturen mit Säuren, Basen, Metallen oder über 800°C heißem Wasserdampf behandelt, wodurch sich die spezifischen Oberflächen auf über 1000 m²/g erhöhen lassen, und die Adsorptionskapazität ansteigt. Der überwiegende Anteil der in Europa vermarkteten Aktivkohle wird unter mangelhaften Umweltauflagen und mit lückenhafter Qualitätskontrolle in Südostasien hergestellt. Als Ausgangsmaterial dient hier meist Braunkohle, wobei die bei der Aktivierung verwendeten Schwermetalle (vor allem Zink) zu bedenklichen Umweltbilanzen führen (Schmidt et al., 2016).

Verrottung nur etwa 50 - 60 % des in der Biomasse gespeicherten Kohlenstoffs wieder an die Atmosphäre abgegeben.

Über das Thema Pflanzenkohle und deren Anwendung wurden inzwischen 7677 wissenschaftliche Artikel in renommierten Fachzeitschriften (peer-reviewed, ISI Web of Knowledge, Stand 02.06.2020) veröffentlicht. Die wichtigsten Ergebnisse sind in 43 Meta-Studien transparent, objektiv und repräsentativ ausgewertet worden.

2.1 Pflanzenkohletechnologie als NET

Die Pflanzenkohletechnologie wird auf internationaler Ebene vermehrt als eine der Möglichkeiten zur Rückführung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre (carbon dioxide removal; kurz CDR Technologie) diskutiert. Im Sonderbericht des Weltklimarats (IPCC) vom 08. Oktober 2018 wurde zum ersten Mal Pflanzenkohle als vielversprechende Negative Emissionstechnologie (sog. NET = gezielten Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre als Strategie zur Bekämpfung des Klimawandels) genannt². Neben Aufforstung und Humusaufbau ist Pflanzenkohle aktuell die einzige verfügbare und nachhaltige NET mit vielfältigen weiteren Nutzungsmöglichkeiten.

Um die Pflanzenkohletechnologie weiter auszubauen und die Anwendung von Pflanzenkohle in Landwirtschaft und Gartenbau zu verstärken werden mittlerweile CO₂-Zertifikate entwickelt. First Climate hat im Juni 2019 ein erstes Emissionsreduktionsprogramm mit Pflanzenkohle aufgelegt: „Dadurch können die Kosten für Landwirte maßgeblich gesenkt werden. Gleichzeitig wird eine ausreichende Rendite für Schweizer Produzenten von Pflanzenkohle gewährleistet. Als Abnehmer der Produkte stehen landwirtschaftliche Betriebe im Vordergrund; weitere mögliche Abnehmer sind z.B. der Gartenbau und die Baubranche, in welcher Pflanzenkohle in Baustoffen als stabiler Kohlenstoffspeicher eingesetzt wird.“³ Das Klimaschutzprogramm wurde durch First Climate unter Anwendung der Norm ISO 14064-2 entwickelt und von der Prüfstelle Verico validiert.

Das EBC stellt seit 2020 eine Methode zur Zertifizierung des C-Senken Potentials von Pflanzenkohle zur Verfügung. EBC und IBI zertifizierte Produzenten von Pflanzenkohle können sich das C-Senken Potential der hergestellten Pflanzenkohle zertifizieren lassen. Sobald die Pflanzenkohle in landwirtschaftliche Substrate wie Futter, Kompost, Gülle und Dünger oder in dauerhafte Materialien wie Beton, Harze oder Kunststoffe eingemischt wird, kann das C-Senken Potential in C-Senken Zertifikate konvertiert werden. Dabei wird nur der Kohlenstoff, der sicher gemessen und nachverfolgt werden kann zertifiziert. Alle Treibhausgasemissionen, die zum Aufbau der C-Senke verursacht werden, werden von C-Senken Potential abgezogen (<https://european-biochar.org/de/c-sink>).

² <https://www.biochar-journal.org/en/ct/94>

³ <https://www.firstclimate.com/klimaschutzprogramme/co2-speicherung-durch-pflanzenkohle/>

2.2 Eigenschaften von Pflanzenkohle

Pflanzenkohlen zeigen eine innere Struktur, ähnlich des Ausgangsmaterials. Bei der Pyrolyse werden zunächst die leicht abbaubaren Verbindungen zerstört bzw. umgewandelt, während komplexere Verbindungen wie z.B. Lignin kaum verändert werden. Pflanzenkohle besteht im Wesentlichen aus aromatischen Kohlenstoffverbindungen, die eine starre Struktur haben und nur schwer abbaubar sind (Downie et al., 2009, Falco et al., 2011).

Pflanzenkohlen haben mit ca. 1,5 bis 1,7 g/cm³ eine deutlich geringere spezifische Dichte als die mineralische Bodensubstanz (2,65 g/cm³) (Downie et al., 2009, Abel et al., 2013). Sie weisen zudem eine große äußere und innere Oberfläche bzw. Porosität auf und besitzen eine hohe Anzahl an funktionellen Gruppen (vorwiegend Carboxyl-, Phenol-, Carbonyl-, Hydroxyl- oder Aminogruppen) (Godlewska et al., 2017).

Tabelle 1 zeigt ausgewählte Parameter der im Botanischen Garten Berlin Dahlem hergestellten Pflanzenkohle-Chargen (BIOMACON-Verfahren) sowie der zugekauften Pflanzenkohle (Carbon Terra) und Pflanzenkohle weiterer Hersteller (PK: Pflanzenkohle, MW: Mittelwert; STABW: Standardabweichung; Min: Minimum; Max: Maximum) und verdeutlicht die durch unterschiedliche Inputqualitäten auftretenden Schwankungsbreiten in den Kohlenstoffgehalten sowie H/C_{org}- und O/C_{org}-Verhältnissen.

Tabelle 1: Ausgewählte Parameter der im Botanischen Garten Berlin Dahlem hergestellten Pflanzenkohle-Chargen

Parameter	PK Eigenherstellung Botanischer Garten			PK zugekauft ¹	PK extern ²
	MW±STABW	Min	Max	MW	Min-Max
Kohlenstoff C	65,8±16,4	36,9	88,6	71,9	63-94
H/C _{org} -Verhältnis	0,11±0,08	0,04	0,27	0,18	0,07-0,36
O/C _{org} -Verhältnis	0,06±0,05	0,001	0,12	0,07	0,02-0,1

¹PK der Firma Carbon Terra (wurde bis zur Herstellung eigener PK im BG verwendet)

²PK-Daten externer Hersteller (vgl. Vogel et al., 2015)

Die langfristige Festlegung von C in Pflanzenkohle könnte somit eine signifikante Rolle bei der Verlangsamung des Anstiegs der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen spielen. Würden die global produzierten Mengen an konventionell produzierter Holzkohle (ca. 47 Mio. t; FAOSTAT 2011) nicht thermisch genutzt, sondern als Bodenhilfsstoff im urbanen Bereich oder in der Land-/Forstwirtschaft eingesetzt, könnten etwa 36 % der in Deutschland emittierten Treibhausgase ausgeglichen werden (Basis CO₂-Äquivalente 2014; Umweltbundesamt, 2015). Bei günstiger Prozessführung der Pyrolyse mit thermischer oder elektrischer Nutzung der flüchtigen Produkte ist die Pflanzenkohle-Produktion eine kohlenstoff-negative Technologie (Woolf und Lehmann, 2012; Lomax et al., 2015). Bei diesen Verfahren wird CO₂ effektiv aus der Atmosphäre entfernt, ohne wie im Fall einer thermischen Biomasse-Nutzung kurzfristig wieder zu CO₂ umgewandelt zu werden. Die mittlere Verweilzeit von Pflanzenkohle

im Boden wird von verschiedenen Autor*innen mit weniger als 100 bis zu einigen 1000 Jahren angegeben (Kuzykaov et al., 2014; Masék et al., 2013). Ausgehend von den Biokohle-Eigenschaften sind der aromatische Kondensationsgrad und das molare H/C-Verhältnis wichtige Prädiktoren der Verweilzeit von Pflanzenkohle im Boden (Lehmann et al., 2015).

Bei der Herstellung können Organische Schadstoffe wie persistente polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Dioxine und Furane entstehen. Durch eine geeignete Karbonisierungstechnologie und Prozessführung wird dies jedoch minimiert. Andere unerwünschte und potenziell toxische organische Verbindungen wie polychlorierte Biphenyle (PCB), Hexachlorbenzene, Rückstände von Pestiziden oder Pharmazeutika werden bei der Pyrolyse teilweise bzw. vollständig zerstört (Bridle et al., 1990). Zudem findet aufgrund der hohen Prozesstemperaturen eine Hygienisierung der eingesetzten Stoffe statt.

Der Massenverlust bei der Karbonisierung führt jedoch zu einer Aufkonzentrierung von Schwermetallen. Dem kann durch die gezielte Auswahl von Biomassen mit geringen Ausgangsgehalten begegnet werden. Das sind vor allem pflanzliche Nebenprodukte oder Abfälle aus Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft, Gartenbau und Landschaftspflege mit Ausnahme von Pflanzen, die von schadstoffbelasteten Standorten stammen oder kontaminiert sind. Hierdurch lassen sich Pflanzenkohle für die Anwendung in Böden herstellen, welche die entsprechenden gesetzlichen Anforderungen und die Richtlinien des Europäischen Pflanzenkohle Zertifikates (EBC, 2012) erfüllen. Ein Risiko erhöhter Schwermetallgehalte besteht dagegen bei Biokohlen aus gewerblichen und kommunalen Bioabfällen sowie insbesondere aus Klärschlämmen.

2.3 Anwendung von Pflanzenkohle

Die Nutzung von Pflanzenkohle ist vielfältig und reicht von der Anwendung in der Bauindustrie und in der Textil- und Papierindustrie bis zur Konservierung von Nahrungsmitteln, der Abschirmung elektromagnetischer Felder in Elektrobauteilen und der Abwasserbehandlung sowie der Herstellung von Batterien (Conte et al., 2015; Schmidt, 2012). Am Ende ihres ursprünglichen Nutzungszyklus kann Pflanzenkohle recycelt und in verschiedenen anderen Bereichen nutzbringend weiterverwendet werden. Am Ende dieser Nutzungskaskaden kann die Pflanzenkohle dann entweder als Bodenverbesserungsmittel aufbereitet oder der energetischen Nutzung zugeführt werden (Schmidt et al., 2016).

Der Nutzen für Umwelt und Gesellschaft liegt dabei in den vielfältigen positiven Effekten, die Pflanzenkohle hervorruft, u. a. zählen dazu eine wirtschaftliche Wertschöpfung von Abfällen, eine erhöhte Biomasseproduktion, nachhaltige Energieproduktion, eine verbesserte Wasserspeicherkapazität und eine Minderung des atmosphärischen CO₂ (Abbildung 3)

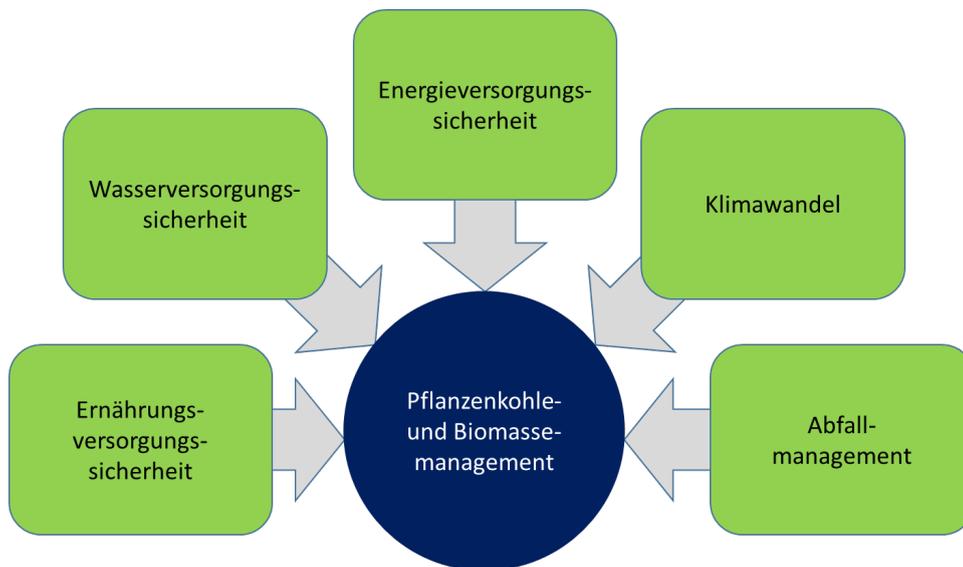


Abbildung 3: Problemfelder der globalen Entwicklung und Pflanzenkohle- und Biomassemanagement

Im Folgenden werden kurz die Effekte der Anwendung von Pflanzenkohle in der Kompostierung und im Boden näher beschrieben.

2.3.1 Kompostierung

Eine aussichtreiche Anwendung von Pflanzenkohlen ist die Kombination mit organischen Reststoffen in der Kompostierung. Pflanzenkohle gilt als ausgezeichnetes Füll- und Adsorptionsmittel feuchter und stickstoffreicher Materialien und führt in der Kompostierung zur Reduzierung der Methan-, Ammoniak- und Lachgasemissionen, wie Versuche von Dias et al. (2010), Steiner et al. (2011) und Wang et al. (2013) belegen konnten. Ma et al. (2013) wies darauf hin, dass Pflanzenkohle den Geruch bei der Kompostierung signifikant verringern kann, eine wichtige Eigenschaft in städtischen Gebieten. Während der Kompostierung können durch Pflanzenkohlezugaben NH_3 - und N_2O -Emissionen reduziert werden (Steiner et al., 2010; Hua et al., 2012; Wang et al., 2013, Tertytze et al., 2015). Dies ist auch auf die Verringerung der Feuchtrohdichte des Kompostes durch Pflanzenkohle zurückzuführen (Tertytze et al., 2015). Zusätzlich zeigten Dias et al. (2010), Jindo et al. (2012), Fischer & Glaser (2012) und Wagner et al. (2016) eine Reduktion der C-Verluste und eine bessere Bildung von stabilen Humaten/Huminsäuren während der Kompostierung auf. Hagemann et al. (2018) berichten ebenfalls von einer Reduktion der Treibhausgasentstehung während der Kompostierung sowie einer Verminderung der Nährstoffauswaschung durch Zugabe von Pflanzenkohle. Bei den C-Verlusten wurden jedoch keine Unterschiede zwischen einer Kontrolle und Pflanzenkohlekomposten festgestellt.

Pflanzenkohle führte bei Kompostierversuchen von Kammann et al. (2016) zu höheren Temperaturen während der Intensivrotte. Tertytze et al. (2015), Barthod et al. (2018) und Febrisiantosa et al. (2018) wiesen ähnliche Ergebnisse für die Temperaturentwicklung in Kompostversuchen mit Pflanzenkohle im Vergleich zu Mieten ohne Pflanzenkohle im

Botanischen Garten Berlin auf. Höhere Temperaturen wirken sich positiv auf die Hygienisierung des Kompostes aus.

Für den Wasserhaushalt wirkte die Zugabe von Pflanzenkohle ausgleichend (vgl. auch Steiner et al., 2011). Freiwerdendes überschüssiges Wasser aus der Zersetzung der Biomasse wird von der Pflanzenkohle aufgenommen. Einer Vernässung der Miete wird dadurch entgegengewirkt.

Die Mitkompostierung von Pflanzenkohle führt weiterhin zu einer reduzierten Auswaschung von Nitrat, Phosphor und Kalium. Leachingversuche zeigten einen signifikanten Einfluss der Pflanzenkohle auf die Nährstofffreisetzung von Pflanzenkohlekomposten und –substraten. Vor allem in den gealterten (gelagerten) Pflanzenkohlesubstraten führt die Pflanzenkohle zu einer deutlich verzögerten Freisetzung an Nährstoffen (Schatten et al., 2015).

2.3.2 Bodenanwendung

Die CO₂-Emissionen beim Einsatz von Pflanzenkohle in Böden werden von verschiedenen Faktoren, wie der bereits beschriebenen Pflanzenkohlestabilität und den Wechselwirkungen von bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften sowie der Mikrobiologie bestimmt. Die höchsten CO₂-Emissionen wurden einige Tage (Schouten et al., 2012) bis einige Monate (Kuzyakov et al., 2009) nach Applikation von Pflanzenkohle beobachtet. Dabei kann der Anteil der abiotischen CO₂-Freisetzung bis zu 90 % der gesamten CO₂-Emissionen betragen (Zimmerman, 2010).

Einen Einfluss auf den Abbau von Pflanzenkohlen hat der Ausgangs-Kohlenstoffgehalt des Bodens, auf Grund einer steigenden mikrobiologischen Aktivität mit zunehmendem organischen Kohlenstoffgehalt (Zimmermann et al., 2011; Schouten et al., 2012). Der Abbau von organischer Substanz im Boden nach Zugabe von Pflanzenkohle (positiver Priming-Effekt, Abbildung 4) ist nach Woolf und Lehmann (2012) in Relation zum Abbau über einen Zeitraum von 100 Jahren vernachlässigbar. Weng (2015) zeigten eine Zunahme des SOC unter Pflanzen (negatives Priming) in einem achtjährigen Feldversuch.

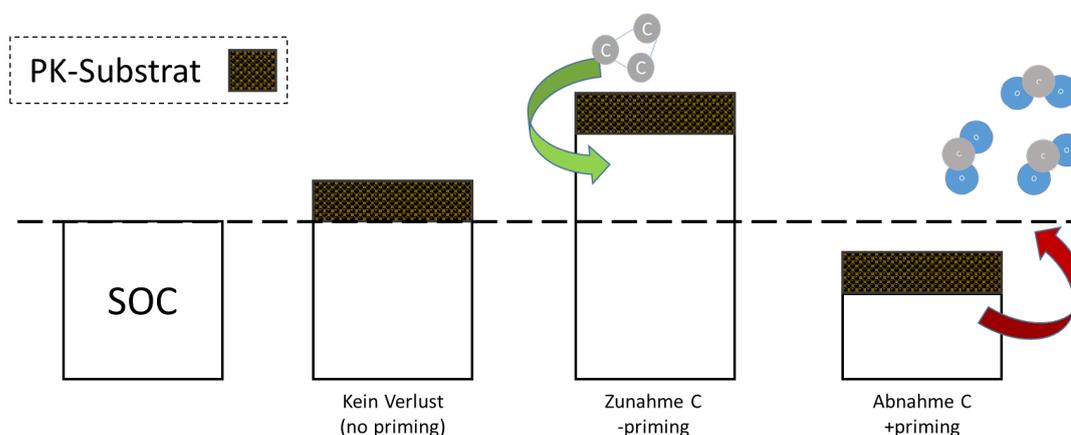


Abbildung 4: Pflanzenkohle(substrate) und Umsatz von Boden-Kohlenstoff, SOC = Soil Organic Carbon (nach Weng, 2015)

Auch bei N₂O- und NO-Emissionen wurde nach der Anwendung von Pflanzenkohle in Böden eine Reduzierung beobachtet. Durch die Applikation von Pflanzenkohle konnten z. B. nach einer Düngung mit Harnstoff und Nitratdünger im Vergleich zu einem Boden mit derselben Behandlung, aber ohne Pflanzenkohlezusatz 52-84 % weniger N₂O-Emissionen, und 47-67 % geringere NO-Emissionen gemessen werden (Nelissen et al., 2014). Eine überwiegende Reduzierung von N₂O-Emissionen wurde von mehreren Autoren (z. B. Case et al., 2012; Kammann, 2012 und Yoo und Kang, 2012) beobachtet. Kammann (2012) führt die verringerten Stickstoffemissionen auf die Sorption von Ammonium und Nitrat durch Pflanzenkohle zurück. Dabei ist die Reduzierung der Emission von N₂O- und NO abhängig von der Pflanzenkohle, den Bodenverhältnissen und den Umweltbedingungen. Singh et al. (2010) beobachteten bei der Applikation von Biokohlen aus nährstoffreichen Ausgangsstoffen im Vergleich zu Pflanzenkohlen aus nährstoffarmen Ausgangsstoffen eine höhere N₂O-Emission.

Hinsichtlich des Treibhausgases Methan (CH₄) zeichnet sich bisher kein eindeutiges Bild ab (vgl. Haubold-Rosar, 2019). Durch eine bessere Durchlüftung von Böden durch Biokohlezugabe kann jedoch eine Verminderung der CH₄-Emissionen verursacht werden (Spokas, 2013).

Weitere zusätzliche Nutzen der Pflanzenkohletechnologie wurden hervorgehoben, wie der Humusaufbau und die damit verbundene erhöhte Bodenfruchtbarkeit, die zu höheren Biodiversität und Ernährungssicherheit führen kann.

2.3.3 Pflanzenbau

Im Pflanzenbau (Landwirtschaft, Gartenbau, Zierpflanzenbau, Weinbau) und in der Forstwirtschaft gewinnt die Anwendung von Pflanzenkohle und Pflanzenkohlekomposten zunehmend Bedeutung zur langfristigen Kohlenstoffspeicherung im Boden, als Bodenverbesserungsmittel und Alternative zum Torfeinsatz (Sánchez-Monedero et al., 2019; Sohi, 2012; Kaudal et. al., 2016; Nieto et al., 2016; Tian et al., 2012). In der Literaturübersicht von Jindo et al. (2020) wird die vielfältige positive Wirkung von Pflanzenkohleanwendung auf physikalische, chemische und biologische Bodeneigenschaften und daraus resultierende Auswirkungen auf die Ernteerträge beschrieben. Erwähnt werden wenige negative Einflüsse auf chemische und biologische Bodeneigenschaften. Der Einfluss von Pflanzenkohle auf Pflanzenerträge wird anhand verschiedener Meta-Analysen dargestellt. Jeffrey et al. (2011) ermittelten eine durchschnittliche Ertragssteigerung von 10 %, die sich jedoch in Abhängigkeit des Ausgangssubstrats und der eingesetzten Pflanzenkohlen von - 28 % bis + 39 % unterscheiden. Unabhängig von der mit Pflanzenkohle beaufschlagten Böden und Klimaten beschreiben Biedermann & Harpole (2013) ein höheres Pflanzenwachstum (Biomasse), Ernteerträge (Ernteprodukt) und Kaliumgehalte im Pflanzengewebe im Vergleich zu den Kontrollvarianten. In Feld-, Gefäß- und Lysimeterversuchen mit unterschiedlichen Kulturpflanzen wiesen Haubold-Rosar et al. (2016) nach, dass durch PKS-Gaben von 60 - 90 t TM/ha das Pflanzenwachstum auf Kipprohböden verbessert werden konnte. In Abhängigkeit des Substrates und der Kultur zu Beginn jedoch eine angepasste N-Ergänzungsdüngung

notwendig ist. Haider et al. (2014) berichten von einem gesteigerten Maiswachstum nach Zugabe von Pflanzenkohle in einem armen Sandboden unabhängig von der Bewässerungshäufigkeit und führen dies auf eine Verbesserung der Boden-Pflanze-Wasser-Beziehung und Photosynthese zurück. Wie und welche gegenseitigen Mechanismen an der Schnittstelle zwischen Pflanzenkohle, Pflanze und Boden wirken beschreiben Lehmann et al. (2015).

In einem Topfexperiment mit Holz- und Strohpflanzenkohle steigerte sich nach Beimengung von Pflanzenkohle die Pflanzenhöhe bei Tomaten (*Solanum lycopersicum* L.). Bei den Studentenblumen (*Tagetes erecta* L.) steigerte die Beimengung in allen Varianten, mit Ausnahme der 5 % Holzkohle ebenfalls die Pflanzenhöhe. Das Trockengewicht beider Pflanzen war jedoch nicht höher im Vergleich zur Kontrollvariante (Vaughn et al., 2013). Northup et al. (2013) untersuchten die Eigenschaft von Pflanzenkohle im Zusammenhang mit ihrer Eignung als Ersatz für Perlit und Kalkstein in erdlosen Substraten. Dabei erwies sich Pflanzenkohle als geeigneter Zusatzstoff für Substrate im Pflanzenbau. Die Ergebnisse der Pflanzentests mit Ringelblume, Petunien, Tomaten und Gurken zeigten, dass die Substrate mit Pflanzenkohle und Torf als mindestens gleichwertig für den Pflanzenbau betrachtet werden können. Über die Zusammenwirkung von Pflanzenkohle und Torf als mögliches Wachstumsmedium für Pflanzen zur Reduzierung des Torfverbrauches berichten Kern et al. (2017).

Ein verbessertes Gurkenwachstum durch Synergieeffekte von Pflanzenkohle, Kompost und pflanzenwachstumsfördernden Rhizobakterien werden von Nadeem et al. (2017) beschrieben. Eine signifikante Erhöhung der Triebbildung und Wurzeltrockenmasse wies Ortas, (2016) bei einem Topfexperiment mit Bitterorganen (*Citrus aurantium* L.) durch Beimpfung von Pflanzenkohle mit Mykorrhizapilzen nach.

Über die phytosanitäre Wirkung von Pflanzenkohle auf Erdbeerblätter und Kicherebsen berichten Harel et al. (2012) und Jahan et al. (2017). Einen großen Einfluss kann dabei die Konzentrationszugabe von Pflanzenkohle haben wie von Frenkel et al. (2017) beschrieben. Bei Zugabe von ≤ 1 % unterdrückt die Pflanzenkohle oft einige Pflanzenkrankheiten, bei Zugabe von ≥ 3 % ist die Zugabe ineffektive oder induziert Pflanzenkrankheiten. In der Literatur wird auch beschrieben, dass sowohl Pflanzenkohle als auch Kompost positive Effekte hinsichtlich Resistenzen gegenüber Pflanzenkrankheiten, Pathogenen und Schädlingen zeigen (Terytze et al., 2015; Krause et al., 2003; Matsubara et al. 2002; Elad et al., 2010) so dass aus der Mischung der beiden Materialien Synergieeffekte resultieren können, wie auch von Ullum, (2017) beschrieben.

3 Aktuelle Problemstellung und Ausgangssituation BBNE

Im Rahmen der Beruflichen Bildung für nachhaltige Entwicklung (BBNE) fanden während der UN-Dekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ von 2004-2014 umfangreiche Aktivitäten statt, doch die strukturelle Integration von BBNE ist in Deutschland bisher nur in Ansätzen gelungen. Konkrete BNE-Themen, eine Verankerung von BNE- Methoden und Kompetenzen sind nur vereinzelt in der beruflichen Bildung zu finden. Entscheidend ist nun die strukturelle Verankerung von nachhaltigkeitsorientierten Kompetenzentwicklungszielen in der beruflichen Aus- und Weiterbildung. Dabei gilt, dass BBNE konkret, sichtbar und erlebbar werden muss und dass nachhaltigkeitsorientierte Kompetenzen an konkrete berufliche Handlungs- und Tätigkeitsfelder geknüpft sind. Das Strategiepapier BBNE empfiehlt für die strukturelle Verankerung von BBNE u.a. die Themenfelder Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz und gesunde Lebensmittel und Ernährung sowie verschiedene Aktionsfelder zu denen sowohl Modellversuche gehören, mit denen innovative didaktische und methodische Ansätze für die berufliche Bildung entwickelt, erprobt, erforscht und verbreitet werden als auch die Erstellung und systematische Verbreitung von Lehr- und Lernmaterialien.²

Das „Internationale Jahr des Bodens“ 2015, ausgerufen von der UN-Generalversammlung, hat das Augenmerk auf die globale Gefährdung der Böden und den zunehmenden Verlust der Bodenfruchtbarkeit gerichtet. Bereits 2009 wurde mit dem Konzept der planetary boundaries deutlich, dass in Bezug auf die Landnutzung und die biogeochemischen Kreisläufe die Belastungsgrenzen überschritten sind. Rockstrom et al. (2009) schätzten, dass der Klimawandel, der Verlust an Biodiversität und der Wandel im Stickstoffkreislauf drei Grenzen sind, die bereits überschritten wurden. Auch die 2015 von der UN verabschiedeten Globalen Nachhaltigkeitsziele (SDGs) fordern, dass einer nachhaltigen Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen Sorge getragen werden und umgehende Maßnahmen u.a. gegen den Klimawandel, für die Armutsbekämpfung und Ernährungssicherung sowie für ein nachhaltiges Wassermanagement ergriffen werden müssen (United Nations, 2015). Aktuell werden weltweit pro Jahr 0,3 bis 0,5 % landwirtschaftliche Nutzfläche durch Bodendegradation vernichtet, das entspricht insgesamt 75 Milliarden Tonnen Boden (Beste, 2016). Die Erreichung der Globalen Nachhaltigkeitsziele ist deshalb stark verknüpft mit der Förderung des Bodenschutzes und der dauerhaften Sicherung und des Ausbaus der Bodenfunktionen für die Produktion von Nahrungsmitteln und für die Wasser- und Kohlenstoffspeicherung (Ehlers, 2016).

Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland setzt dabei u.a. auf eine Förderung der Umsetzung auf internationaler, regionaler, nationaler sowie auf Landes- und kommunaler Ebene (UAL-AG, 2016).

Die Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle hat in den letzten Jahren gezeigt, dass ein Werkzeug zur Umsetzung des genannten SDGs bereitsteht und auch die Planetaren Grenzen entlastet werden können. Pflanzenkohle wirkt dem Klimawandel durch die Beförderung der CO₂-Speicherung in Böden entgegen, ermöglicht durch nachhaltige Rückführung organischer Substanz eine nachhaltigere Landnutzung und kann generell zur Verbesserung der

Fruchtbarkeit von Böden beitragen. Zunehmend kristallisiert sich heraus, dass Pflanzenkohle in der Lage ist, relevante Mengen an Stickstoff einschließlich Nitrat zu speichern und damit vor Auswaschung zu bewahren und darüber hinaus Emissionen von Stickoxiden u. a. bei Kompostierungsprozessen zu verringern. Somit leistet die im Projekt zu realisierende Kompostiertechnik einen wesentlichen Beitrag zur effektiveren Nutzung vorhandener Ressourcen und Nährstoffe, u. a. Stickstoff.

Zeitgleich mit dem Jahr des Bodens startete 2015 das UNESCO-Weltaktionsprogramm „Bildung für nachhaltige Entwicklung“, das als Folgeprogramm der Vereinten Nationen für die BNE-Dekade fungiert. Bis Ende 2019 sollen in folgenden fünf Handlungsfeldern Erfolge erzielt werden: Politische Unterstützung, ganzheitliche Transformation von Lern- und Lehrumgebungen, Kompetenzentwicklung bei Lehrenden und Multiplikatoren, Stärkung und Mobilisierung der Jugend und Förderung nachhaltiger Entwicklung auf lokaler Ebene. Unser Projekt zielt zum einen auf die Kompetenzentwicklung bei Lehrenden und Multiplikatoren, da es Lehrende der beruflichen Bildung sowie Berufstätige zum Thema Biokohlesubstratherstellung, geschlossene Kreisläufe und Boden weiterbildet. Zum anderen fördert es die nachhaltige Entwicklung auf lokaler Ebene durch die Schließung von Stoffkreisläufen in den Modellprojekten, die Vernetzung von lokalen Berliner Bildungsakteuren zum Thema Boden und stärkt und mobilisiert Jugendliche durch die Vermittlung dieser Themen innerhalb ihrer Ausbildung.

4 Verwertung von Gemüse- und Grünschnittabfällen zur Herstellung von Pflanzenkohlesubstraten - Aufbau von Kompostierungsanlagen an den Modellstandorten

Das Bewusstsein für die Bedeutung nachhaltiger Stoffkreisläufe und ihrer Schließung für den Klima- und Umweltschutz ist ein wichtiges Anliegen in der beruflichen Bildung und lässt sich anschaulich durch praktische Versuche vermitteln. Über Kompostierung und Kreislaufschließung an sich gibt es dabei zahlreiche Weiterbildungs- und Wissensmodule. Das umweltentlastende Potenzial der Kreislaufschließung mittels Pflanzenkohletechnologie ist im Gegensatz dazu bisher wenig bis kaum bekannt. Aufgabe ist es daher die Möglichkeiten aufzuzeigen, die vor allem in der Abfallvermeidung, Ressourceneffizienz, Kohlenstoffbindung im Boden, Bodenverbesserung und Einsparung von Dünger mit dieser NET-Technologie liegen.

Das Forschungsvorhaben hatte das Ziel berufliche und schulische Aus- und Weiterbildung zu fördern und anschaulich erlebbar zu machen und gleichzeitig anfallende Biomassen (Grünschnittabfälle, Gemüse- und Obstreste etc.) zu verwerten. Dazu wurden Kompostieranlagen am Umweltbildungszentrum Berlin (UBB) und im Gut Hellersdorf neu aufgebaut und eine bestehende Kompostierung im Botanischen Garten Berlin-Dahlem (BG) genutzt. Abbildung 5 zeigt das Umweltbildungszentrum Berlin (links), Botanischer Garten Berlin (unten) und Gut Hellersdorf (rechts). (Bild- und Kartenquellen: Geoportal Berlin / Digitale farbige Orthophotos 2018 (DOP20RGB); <https://www.forum-berufsbildung.de>; <https://withberlinlove.com>, <https://guthellersdorf.files.wordpress.com>).

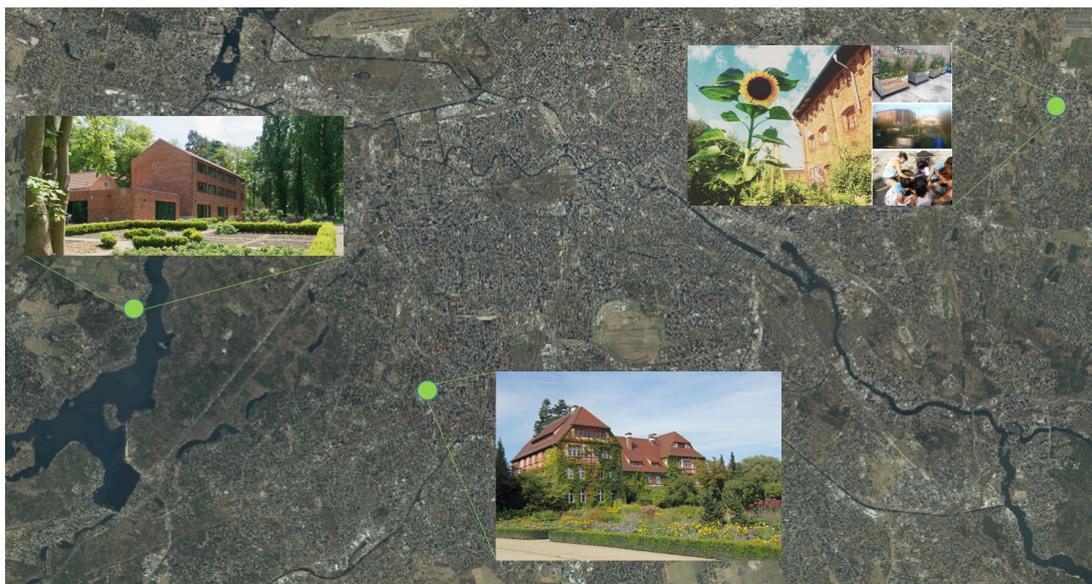


Abbildung 5: Luftbild mit Kompostierungsstandorten und Modellprojekten für BBNE

An den entstandenen modellhaften Lernorten wurden je nach Rahmenbedingung unterschiedliche Kompostierungsformen angewandt und vermittelt. Der Einsatz von Pflanzenkohle stand dabei, neben der Wertschöpfung und Kreislaufschließung, im Mittelpunkt der Betrachtung.

Die Kompostierung kann auf unterschiedliche Art und Weise umgesetzt werden. Neben industriellen Großkompostierungen in offenen oder geschlossenen Systemen existieren kleinere betriebliche Kompostplätze, zum Beispiel in Gartenbetrieben, und kleinere Eigenkompostierungen im Garten. Bei den Modellstandorten handelt es sich um eine Gartenkompostierung (UBB), eine betriebliche Kompostierung (BG) und eine Kompostierung zu kommerziellen Zwecken (Gut Hellersdorf). Bei letzterem war es der Versuch ein wirtschaftlich tragfähiges Verwertungskonzept aufzubauen.

4.1 Gartenkompostierung am Umwelt-Bildungszentrum Berlin (UBB)

Seit August 2014 existiert das Umwelt-Bildungszentrum Berlin westlich der Havel auf einer Fläche von ca. 1 Hektar, eingebettet in den Ökopark Kladow. Die Frei-/Außenfläche ist durch Wiesen und Beetanlagen (Abbildung 6) gekennzeichnet.

Im Jahr fallen durch Pflegemaßnahmen durchschnittlich 5 m³ Rasenschnitt, 8 m³ Laub und 2 m³ Astschnitt aus dem Außengelände an.

Das UBB vollzieht eine Trennung des anfallenden gebäudeinternen Abfalls, so dass aus dem Küchenbereich durchschnittlich 2 m³ unverarbeitete Gemüse- und Obstreste pro Jahr anfallen. Zusammen mit dem UBB wurde ein Standort für die Kompostanlage im nordwestlichen Gartenbereich ausgewählt. Für die Kompostierung steht ein drei Meter breiter Wiesenstreifen, der



sich zwischen den Gartenbeeten und der Grundstücksbegrenzung befindet, zur Verfügung. Die naturbelassene Fläche weist ein leichtes Gefälle hin zur Grundstücksbegrenzung auf. Die Fläche wird von einem Baum teilweise beschattet. Der ausgewählte Kompostplatz entspricht damit den Anforderungen für einen guten Kompoststandort.

Abbildung 6: Gemüsebeete am UBB

Die Fläche wurde in folgende Bereiche unterteilt (Abbildung 7):

- Sammelplatz für Garten- und Küchenabfälle sowie anfallenden Strauch- und Astschnitt (oder daraus hergestellte Häcksel)
- Bereich für frisch aufgesetzten Kompost 1
- Bereich für frisch aufgesetzten Kompost 2
- Bereich für umgesetzten und reifenden Kompost
- Platz zum Lagern des Fertigkompostes

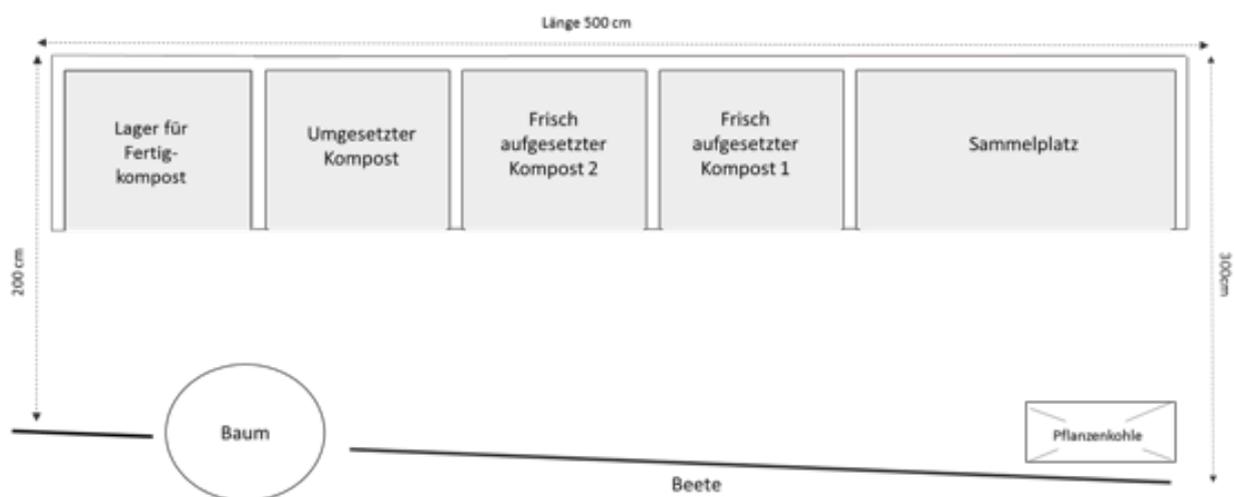


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Kompostbereiches

Der Aufbau der Kompostanlage fand im März/April 2018 statt. Für einen Kompost, der die nötige Temperatur zur Hygienisierung erreichen soll, benötigt man mindestens 1 m³ Ausgangsmaterial. Die richtige Mischung der Materialien macht eine Zwischenlagerung von strukturreichen, kohlenstoffhaltigen und trockenen Pflanzenmaterialien notwendig. Die Kompostierung ist dann nur abhängig von dem Zeitpunkt einer ausreichend anfallenden Menge an frischen und stickstoffhaltigen Materialien.

Die kontinuierlich anfallenden Gemüsereste werden in einem geschlossenen Schnellkomposter gesammelt. Dabei wird bereits Pflanzenkohle aufgestreut (Abbildung 8). Bei einem Neuaufsetzen des Kompostes werden diese, dann bereits vorgerotteten, Gemüsereste verwendet.

Im Rahmen der Bildungsarbeit wurde der erste Kompost Anfang Mai aufgesetzt (Abbildung 9). Der Gartenkompost wurde nach der Herangehensweise von Tertytze & Wagner (2016) aufgesetzt. Als Unterlage wurde eine etwa 10 cm dicke strukturreiche Basis aus groben holzigen Pflanzenmaterialien angelegt. Diese verhindert eine mögliche Staunässe und garantiert eine gute Luftzufuhr. Als erste Schicht wurde darauf Laub und klein gehäckselter Ast- und Strauchschnitt aufgegeben. Danach wurde das vorher gut gemischte frische Material (Rasenschnitt, Grünschnitt, Obst- und Gemüsereste, Kaffeesatz) aufgeschichtet. Dabei wurde Erde, Tonmehl

und Pflanzkohle mit eingemischt. Die Schichtung wurde mehrmals wiederholt. Die fertige Kompostmiete wurde danach mit Vlies abgedeckt.



Abbildung 8: Sammelkomposter für Gemüsereste am UBB



Abbildung 9: Inbetriebnahme der Kompostierung am UBB mit Auszubildenden

Nach 8 Wochen wurde der Kompost das erste Mal umgesetzt. Das Durchmischen des Komposthaufens beschleunigt den Kompostierungsprozess durch einen verbesserten Luftzutritt. Daneben kann im Bedarfsfall die Feuchtigkeit reguliert werden. Mittels der Faustprobe (vgl. Kap. 5.1) wurde dabei die Feuchtigkeit des Kompostes eingeschätzt.

Beim Umsetzen des Kompostes wurde darauf geachtet, dass das gesamte Material erneut gut durchmischt und locker zu einem neuen Komposthaufen aufgeschichtet wurde. Als Unterlage/Basis kam wieder ein Bett aus strukturreichem holzigem Pflanzenmaterial zum Einsatz. Nach weiteren 8 Wochen wurde der Kompost mithilfe eines Durchwurfsiebtes abgeseibt. Siebreste wurden für den nächsten Kompostansatz als Strukturmaterial wiederverwendet.

Die eingesetzte Pflanzenkohle wurde im Botanischen Garten Berlin hergestellt (vgl. Kap. 4.3). Um eigene Pflanzenkohle am UBB herzustellen bieten sich die regelmäßigen Lagerfeuerabende bei Gruppenveranstaltungen an. Das UBB nutzt eine Feuerschale für diese Veranstaltungen Abbildung 10. Um Pflanzenkohle gezielt zu gewinnen, muss die vollständige Verbrennung unterbunden werden. Dies ist sehr einfach durch das rechtzeitige Löschen der Glut zu erreichen. Zur Herstellung von Pflanzenkohle sind unbehandelte Hölzer zu verwenden. Nach Zerkleinerung kann die gewonnene Pflanzenkohle zur Kompostierung genutzt werden.



Abbildung 10: Pflanzenkohle durch rechtzeitiges Ablöschen der Glut bei Nutzung einer Feuerschale

4.2 Kompostierung im Gut Hellersdorf

Der Standort Gut Hellersdorf ist geprägt von seiner früheren Nutzung als landwirtschaftliches Gut. Der Gutsbereich soll, insbesondere unter Berücksichtigung der denkmalpflegerischen Belange und der historischen Bedeutung für die Großsiedlung Hellersdorf städtebaulich entwickelt werden. Zu Projektstart waren im Gut Hellersdorf mehrere kleinere Betriebe angesiedelt. Unter anderem auch der Landschaftspflegebetrieb Bebra, dessen holziger Grünschnitt im Projekt als Strukturmaterial für die Kompostierung genutzt wurde. Der aufgebaute Kompostierplatz lag im südlichen Bereich des Gut Hellersdorf (Abbildung 11). Die Fläche wies eine Versiegelung auf und war daher für die Kompostierung und Lagerung geeignet.

Als weitere Komponente wurden Gemüse- und Obstreste der Berliner Tafel vom Standort Beusselstraße verarbeitet. Pro Jahr standen 650 m³ dieser Bioabfälle für die Kompostierung bereit, die bisher durch die BSR in Biotonnen entsorgt wurden. Wieviel organische Reststoffe

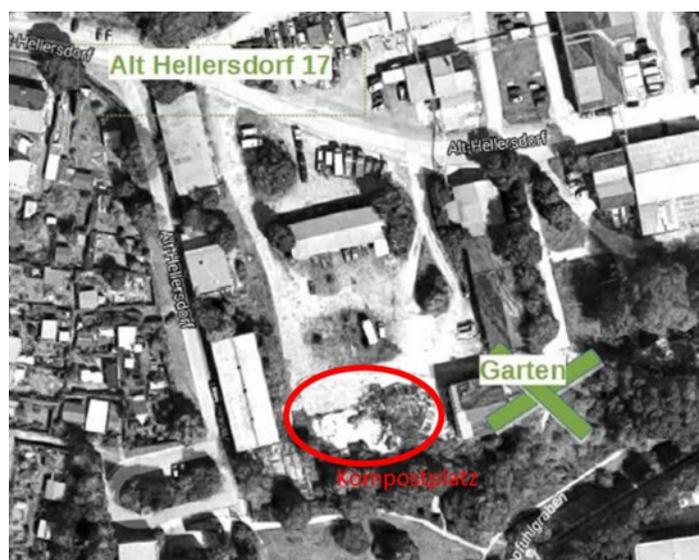


Abbildung 11: Standort Kompostplatz und Modellprojekt im Gut Hellersdorf

durch die Kompostierung verwertet werden können, sollte durch die Versuche ermittelt werden.

In der Initialphase des Projektes standen die organisatorischen Abläufe sowie die Genehmigung des Kompostplatzes im Vordergrund. Diese Arbeiten wurden federführend von Seite der PGB durchgeführt. Im Zentrum der Genehmigung standen Fragen nach der Emissions- und Geruchsvermeidung sowie des Brandschutzes. Die Vermeidung von Geruchsemissionen, und damit auch Treibhausgasemissionen, fanden im vorliegenden Falle durch eine klimafreundliche Kompostierung statt,

mit kleinen Komposthaufen, einem hohen Anteil an Strukturmaterial, durch mehrmaliges Umsetzen der Mieten und der Beimischung von Pflanzenkohle zur Geruchsemissionsvermeidung sowie einer Abdeckung der Mieten mit Vlies, zum Schutz vor Vernässung. Diese Maßnahmen durch Betriebsablaufszeichnungen und Beschreibungen darzulegen, war zentraler Inhalt der Genehmigungsdokumente und wurde entsprechend eingereicht.

Das Genehmigungsverfahren gestaltete sich sehr langwierig, was vor allem daran lag, dass sich die Kompostierung auf einem denkmalgeschützten Areal befindet und dass das gesamte Areal momentan durch das Land Berlin an die GESOBAU AG (Wohnungsbaugesellschaft im 100%igen Besitz des Landes Berlin) übertragen wird.

Die Genehmigung oblag folgenden Behörden:

- Stadtentwicklungsamt: Fachbereich Bauaufsicht, Wohnungsaufsicht und Fachbereich Denkmalschutz (untere Denkmalschutzbehörde);
- Abteilung Wirtschaft und Stadtentwicklung: Fachbereich Stadtentwicklung;
- Abteilung Umwelt- und Naturschutz: Fachbereich Stellungnahme zu Genehmigungsverfahren, Fachbereich Boden- und Grundwasserschutz, Fachbereich Lärmschutz, Fachbereich Luftreinhaltung sowie das Landesdenkmalamt Berlin (obere Denkmalschutzbehörde).

Außerdem waren als EigentümerInnen beteiligt: BIM Berlin (derzeitige Eigentümerin), GESO-BAU Berlin (zukünftige Eigentümerin) und als Verwaltung: WoBeGe Berlin.

Der Bauantrag wurde im Juni 2017 eingereicht. Seitens der Behörden gab es umfangreiche Rückfragen, die alle hinreichend beantwortet wurden. Die Genehmigung wurde mit baulichen Auflagen zur Nutzung des Regen- bzw. Sickerwassers verknüpft, welche Mehrkosten und Zeitverzug verursachte.

Am 27. April 2017 wurde die erste Testmiete aufgesetzt. Hierfür musste die Lagerung der anfallenden Reststoffe bei der Berliner Tafel, sowie der Transport zum Gut Hellersdorf organisiert werden. Problematisch war hierbei ein Brand im Logistikkager des Spediteurs, wodurch sich die Anlieferung verzögerte und die gesammelten Reststoffe der Berliner Tafel einige Tage mehr als geplant lagern mussten. Die dadurch schon angerotteten bzw. teilweise vergorenen Gemüse und Obstreste wiesen einen deutlichen Geruch auf. Die Beimischung von 10 Vol.-% Pflanzenkohle reichte nicht aus um die Geruchsemission deutlich zu reduzieren. Jedoch konnte der hohe Flüssigkeitsanteil durch die Pflanzenkohle ausgeglichen werden.

Die Abfälle der Tafel wurden mit Holzhäcksel in einem Verhältnis von 1:3 vermischt. Der hohe Anteil an Holzhäcksel soll die Sauerstoffzufuhr in die Miete gewährleisten und eine anaerobe Umsetzung (Gärung) verhindern.

Für das Zerkleinern der Inputmaterialien und Aufsetzen der Mieten wurde ein Kompostmischer/-zerkleinerer gekauft (Abbildung 12). In kurzer Zeit verarbeitet dieser die hinzugegebenen Materialien zu einer gut durchmischten und homogenen Masse.



Abbildung 12: Beladen des Kompostmischers und Aufsetzen der Miete im Gutsgarten Hellersdorf

Am 12. August 2017 wurde eine weitere Kompostmiete aufgesetzt, sowie das Umsetzen der Mieten routiniert.

Die Zusammensetzung der Kompostmieten für eine standortangepasste Kompostierung und die Vermeidung von Geruchsemissionen, und damit auch Treibhausgasemissionen, wurde Ende 2017/Anfang 2018 untersucht. Der hohe Anteil an Strukturmaterial von anfänglich 3 Teilen Holzhäcksel (Astschnitthäcksel) und 1 Teil Gemüsereste wurde in verschiedenen Ansätzen reduziert und die Kompostentwicklung untersucht. Der hohe Anteil an Holzhäcksel gewährleistet eine gute Sauerstoffzufuhr in der Miete, führt aber bei kleinen Mietenquerschnitten zu schnellerer Austrocknung und Abkühlung. Die Anteile an Strukturmaterial wurden kontinuierlich gesenkt. Die Untersuchungen haben ergeben, dass eine Mischung von 1 Teil Holzhäckseln und 1 Teil Gemüse-/Obstreste einen optimalen Kompostverlauf gewährleisten. Ebenfalls wurde der Anteil an Pflanzenkohle von 10 Vol.-% Pflanzenkohle auf 2,5 Vol.-% reduziert. Für die späteren Ansätze war es außerdem vorgesehen, zu der bisherigen Kompostmischung einen Teil fertigen Kompost sowie Bentonit (Tonmehl) zuzumischen um das Endprodukt kontinuierlich zu verbessern.

Wie aus der folgenden Abbildung 13 ersichtlich wurden zur Kontrolle der Kompostierung regelmäßig Temperaturmessungen und Bestimmungen des Geruchs und der Feuchtigkeit durchgeführt und dokumentiert.



Abbildung 13: Thermometer zur Überwachung der Mientemperatur während der Kompostierung und Mietenprotokoll zur Dokumentation von Temperatur, Feuchte und Geruch

Nach erfolgter Rotte wurden die Mieten abgesiebt. Dazu wurden Probesiebungen mit zwei verschiedenen Siebssystemen im November 2017 (Rüttel- und Trommelsieb) durchgeführt (Abbildung 14 links unten). Die Siebreste zur Wiederverwendung und frischen Astschnittreste zeigt Abbildung 14 rechts unten. Anschließend wurden die Mieten beprobt. Die Ergebnisse waren ähnlich gut, doch auf Grund der Kosten und Flexibilität wurde das Trommelsieb im weiteren Verlauf bevorzugt.

Die Zumischung der Pflanzenkohle wurde nach den ersten Erfahrungen neu organisiert. Da die Geruchsemissionen bereits am Ort der Sammlung, in Abhängigkeit zur Temperaturentwicklung auftreten, wurde die Zumischung der Pflanzenkohle auf die Sortierstation der Berliner Tafel verlagert (Abbildung 14 links oben: Gemüse-/Obstrestesammlung bei der Berliner Tafel in 10 m³ Container, rechts oben: Annahmeplatz der Gemüse-/Obstreste in Hellersdorf). Da der Container mit den Gemüse-/Obstresten einmal wöchentlich abgeholt wurde, wurden die gesammelten Gemüse-/Obstreste nach jedem Tag mit einer Schicht Pflanzenkohle versehen. Die Beimischung der Pflanzenkohle zeigte eine bereits deutliche Geruchsminimierung und entwickelte eine hohe Akzeptanz unter den Mitarbeiter*Innen der Tafel. Hier deutet sich bereits ein großes Potenzial zur Geruchsminderung an.



Abbildung 14: Gemüse-/Obstrestesammlung bei der Berliner Tafel, Annahmeplatz, Probesiebung und Siebreste in Hellersdorf

4.3 Kompostierung im BG

Als weiterer Modellstandort diente der Botanische Garten Berlin-Dahlem (BG). Am Standort BG existiert eine betriebliche Kompostierung die aus den internen Grünschnittabfällen einen Kompost für die eigene Erdenherstellung bereitstellt. Durch das F&E-Vorhaben TerraBoGa wurden im Bereich des Kompostmanagements Neustrukturierungen durchgeführt.

Zur Herstellung von Pflanzenkohle wurde im Rahmen des TerraBoGa-Projektes u. a. eine Karbonisierungsanlage der Firma BioMaCon installiert, die das anfallende holzige Material verwertet. Für die Kompostierung wurde u.a. ein Schredder und ein Kompostwender angeschafft und somit über die Verbesserung des Know-how hinaus auch technisch die Voraussetzungen für eine gute Kompostierung geschaffen (Abbildung 15). Des Weiteren wurde umfangreich zur Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle geforscht (vgl. Terytze et al., 2015).



Abbildung 15: Karbonisierungsanlage (links) und Kompostierung (rechts) im Botanischen Garten Berlin

5 Wissenschaftliche Begleitung und Untersuchung der Kompostierungsversuche und Substratanwendung

5.1 Vor-Ort-Parameter Kompostierung

Durch die Kontrolle der Temperatur, der Feuchtigkeit und des Geruchs des Kompostes kann der Kompostierungsverlauf gut eingeschätzt werden. Zu nasses oder zu dicht aufgesetztes Material lässt den Kompost schnell faulen oder gären. Auch eine nicht ausreichend durchgeführte Umsetzung des Kompostes zeigen schlechte Gerüche an. Mit den richtigen Maßnahmen (Umsetzen, Feuchtigkeitsregulierung) können schlechte Gerüche nach einigen Tagen verringert bzw. verhindert werden. Schlechte Gerüche sind ein Zeichen falsch ablaufender Prozesse, die die Kompostqualität vermindern und zu Treibhausgasemissionen wie Methan führen.

Die Grundlegenden Parameter zur Überwachung der Kompostierung werden im Folgenden erläutert:

Die **Temperatur** ist regelmäßig mit einem Kompostthermometer zu kontrollieren. Die höchsten Temperaturen entstehen im oberen Drittel des Komposthaufens, so dass auch dort die Messungen vorgenommen werden sollten (Abbildung 16). Als Messgeräte werden sog. Kompostthermometer eingesetzt. Wichtig ist die sorgfältige Führung eines Temperaturprotokolls. Dadurch die ausreichende Hygienisierung sicher nachgewiesen werden. Eine Hygienisierung des Materials ist sichergestellt, wenn die Temperaturen über mindestens 2 Wochen Temperaturen von $> 55^{\circ}\text{C}$ bzw. über eine Woche von 65°C erreicht werden.

Ist die Temperatur zu niedrig kann es sein, dass das Material zu stark vorgerottet war, der Komposthaufen zu locker aufgesetzt (zu viel Strukturmaterial) oder der Komposthaufen zu

trocken oder zu feucht ist. Für die zuletzt genannten Punkte können Maßnahmen (z.B. Befeuchten) während der Kompostierung ergriffen werden.

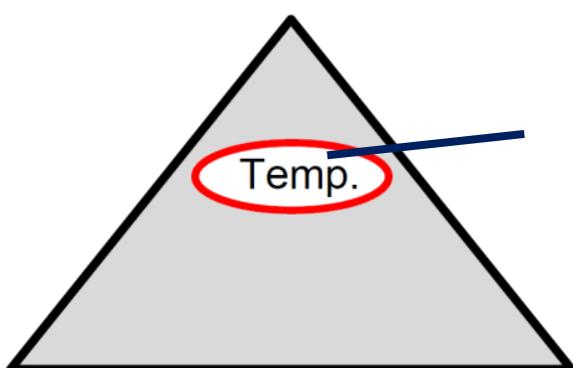


Abbildung 16: Kennzeichnung des Messbereichs der Temperatur

In Abbildung 17 ist der optimale Temperaturverlauf einer gesteuerten Kompostierung dargestellt.

Während der Kompostierung ist die regelmäßige Einschätzung der optimalen **Feuchtigkeit** im Kompost besonders wichtig. Dies kann am einfachsten über die sog. Faustprobe erfolgen. Kompostmaterial wird dabei aus verschiedenen Stellen der Miete entnommen und in der Hand durch bilden einer Faust gepresst. Tritt zwischen den Fingern kein Wasser aus und bei öffnen

der Faust zerfällt das Material, ist die Mierte zu trocken. Wenn das Material bei öffnen der Faust in einem Knödel zusammenhält und kein/kaum Wasser auspressbar ist, ist die Feuchtigkeit optimal. Wenn das Material zu nass ist, tritt bei der Faustprobe merklich Wasser aus.

Bei ungenügender Durchlüftung des Kompostmaterials wie z. B. bei zu dichten Aufschüttungen, bei stauender Nässe oder bei Sauerstoffarmut treten unangenehme **Gerüche** auf, die auf eine hohe Freisetzung von Treibhausgasen hindeuten. Fauliger Geruch weist auf eine zu feuchte Kompostmierte hin. Ammoniakgeruch gilt als Hinweis auf zu stickstoffreiche Ausgangsmaterialien.

Bei fauligem Geruch kann der Kompost umgesetzt, abgedeckt oder mit mehr Strukturmaterial versehen werden. Zu stickstoffreiche Ausgangsmaterialien können mit vermehrt nährstoffarmen Ausgangsmaterialien vermischt werden.

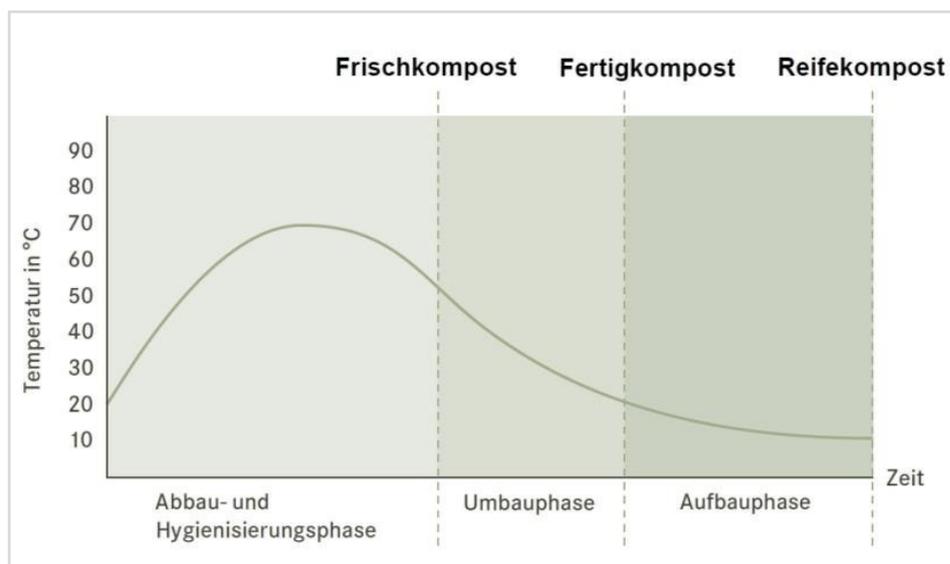


Abbildung 17: Übersicht über den Temperaturverlauf während der Kompostierung (Wagner und Schatten, 2016)

5.2 Laboruntersuchungen Kompost- und Substratproben

In Tabelle 2 sind die untersuchten Parameter mit den entsprechenden Untersuchungsmethoden zusammengefasst. Die Bestimmung der Parameter erfolgte zur Untersuchung der Beschaffenheit der Ausgangsmaterialien sowie zur Bestimmung der Qualität der Komposte. Dafür wurden Proben aus der Lagerung der Materialien, während der Kompostierung und am Ende der Kompostierung (fertiges Produkt) entnommen und direkt ins Labor transportiert. Dort wurden die Proben bis zur weiteren Bearbeitung kühl gelagert und teilweise eingefroren. Vor Untersuchungsbeginn wurden die Proben je nach Anforderung aufbereitet.

Die Parameter wurden i. d. R. in Doppelbestimmung ermittelt. Eventuelle größere Abweichungen voneinander sind als Standardabweichung mit in den Ergebnissen angegeben. Wenn für

Umrechnungen ein Massenbezug benötigt wurde, wurde dieser jeweils auf die Gewichtsangabe bezogen, aus dessen Grundgesamtheit das Probenmaterial entnommen wurde.

Tabelle 2: Übersicht über die untersuchten Laborparameter mit den dazugehörigen Methoden

Parameter		Methode
pH (CaCl ₂)	Kompostqualität	DIN/ISO 10390: 1997/2005
Elekt. Leitfähigkeit	Kompostqualität	BGK (2006), Kapitel III C 2.2
Korngrößenzusammensetzung	Kompostqualität, Körnigkeit	BGK (2006)
Org.Substanz (Glühverlust)	Kompostqualität	BGK (2006), Kapitel III B 1.1
C/N	Kompostqualität	DIN EN 15936:2012 DIN EN 16168:2012
N _{min}	Kompostqualität	Visocolor Bodenkoffer
KW-Aufschluss (ICP Schwermetalle)	Schadstoffbelastung, Inhaltsstoffe	DIN EN 13656:2003-01
Max. Wasserhaltekapazität	Kompostqualität	BGK (2006), Kapitel II A2
Wassergehalt	Kompostqualität, Kompostfeuchte	BGK (2006), Kapitel II A1
Elutionstest, Schüttelversuch	Als leaching Test Auswaschung von Nähr- und Schadstoffen	ISO/FDIS TS 21268-1 (2005); mit W/F Verhältnis von 8,5 (Tag 44) bzw. 5 (Tag 146)
N ₂ O	THG-Emissionen	Messung am FTIR, Julius-Kühn Institut (JKI), Berlin-Dahlem

Die Parameter pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit gelten als wichtige Parameter zur Beurteilung der Kompostqualität und als Voraussetzung der im Kompost ablaufenden Prozesse. Sie wurden mit dem Messgerät Multi 3320 der Firma WTW bestimmt. Ebenso zählen Wassergehalt, die Wasserhaltekapazität und N_{min} zu aussagekräftigen Parametern über die Kompostqualität. Diese Parameter wurden daher im Labor gemessen und der N_{min}-Gehalt mit dem Visocolor Bodenkoffer von Macherey-Nagel bestimmt. Die Bestimmung des C/N-Verhältnis hilft bei der Bewertung der Kompostierbedingungen und des Rotteverlaufes. Die C/N-Gehalte der Proben wurden mit einem TruSpec Micro CHN der Firma Leco gemessen. Die Bestimmung der organischen Substanz ist sowohl für die Bewertung des Rotteverlaufes als auch für die Bestimmung der Massenbilanz wichtig. Mittels einem Königswasseraufschluss und anschließender ICP (inductively coupled plasma mass spectrometry) können Qualität und Aussagen über eventuelle Schadstoffbelastungen bewertet werden. Hieran schließt sich der 24-stündige Schüttelversuch (Elutionsversuch) bei dem die Eluate ebenfalls auf gelöste Inhaltsstoffe untersucht werden. Diese wurden in Anlehnung an die DIN EN ISO 11885:2009 am Julius-Kühn-Institut (JKI) auf die 22 anorganischen Elemente hin mittels ICP analysiert. Hieraus lassen sich Aussagen darüber schließen wie viel von bestimmten Stoffen aus der Kompostmatrix ausgewaschen wird bzw. werden kann. Dies ist vor allem in Bezug auf eine eventuelle Schadstoff-

belastung entscheidend. Um von den Eluatergebnissen einen Vergleichswert für die Inhaltsstoffe zu erhalten, wurden diese Ergebnisse in eine Feststoffangabe (mg/kg) in Anlehnung an die DIN 19529 umgerechnet. Sie wurden dann ins Verhältnis mit den Inhaltsstoffen gesetzt, um so einen prozentualen Wert dessen zu erhalten, was von dem im Material vorhandenen Stoffen letztendlich ausgewaschen wurde.

5.3 THG-Messungen

Um die Wirkung der Pflanzenkohle auf die Emissionen an Treibhausgasen zu ermitteln wurde bei ausgewählten Kompostansätzen die Porengase und die auftretenden Emissionen beprobt. Für den Vergleich der Treibhausgasemissionen wurde jeweils ein Kompost mit Pflanzenkohle und ein Kompost ohne Pflanzenkohle aufgesetzt. In den darauffolgenden Wochen der Kompostierung wurden in regelmäßigen Abständen Gasmessungen vorgenommen.

Die Gasmessung im Feld wurden mit dem tragbaren Gasanalysator GA Screenalyt der Firma HONOLD Umweltmesstechnik durchgeführt und der CO₂-, CH₄- und NH₃- Gehalt bestimmt. Als weiteres Gas wurde H₂S beprobt. Die Emissionen wurden mittels einer eigens für den Versuch konstruierten Fluxhaube durchgeführt (Abbildung 18). Die Haube mit den Maßen 35,5 cm x 55 cm x 27 cm besteht aus transparentem Polypropylen (PP). Um mit dem Gerät durch das Heraussaugen von Luft keinen Unterdruck in der Haube zu verursachen und dadurch Porengas aus dem Komposthaufen herauszuziehen, wurde die Haube auf der Rückwand mit neun Löchern angebohrt, sodass ein Zustrom an Frischluft während der Messung gewährleistet wurde. Es handelt es sich um eine Erweiterung der klassischen „static chamber“ Messmethode. Da kein oder nur geringer Unterdruck in der Haube erzeugt wird, können wichtige Prozesse wie Konvektion und Diffusion durch den Frischluftzustrom weiterhin ungestört ablaufen (vgl. Nguyen Thanh, 2012; Carter & Gregorich, 2008; Sánchez et al., 2015). Somit soll es zu einer möglichst geringen Verfälschung der Ergebnisse kommen.



Abbildung 18: Haubenmessung vor Ort mit Messgerät und Gasbeutelprobenahme am Beispiel der Kompostierung am UBB (links), Haubenrückseite mit Luftzustromlöchern (rechts)

Die Messungen (alle 30 Sekunden wurde ein Wert ermittelt, bei einer Flussdichte von 0,4 l/Minute) wurden jeweils über einen Zeitraum von 60 Minuten durchgeführt, wobei darauf geachtet wurde, dass die Haube nicht der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt war (um durch starke Aufheizung entstehende Beeinflussung der Luftflussdynamik und der Gaskonzentrationen vorzubeugen). Die Haube wurde dabei fest angedrückt und darauf geachtet, dass der Haubenrand dicht auf dem Material aufsitzt. Da aufgrund der z.T. recht groben Struktur der Kompostmaterialien ein tieferes „Eingraben“ der Haube nicht möglich war, wurde zusätzlich um die Haube herum eine luftdichte Plane installiert, welche das Eindringen von Umgebungsluft auf anderem Wege als den Luftzufuhrlöchern verhinderte. Während den Messminuten 45-60 wurde das beprobte Gas in 5-lagig beschichteten Gasbeuteln der Firma Supelco (Supel-Inert Foil Gas Sampling Bags mit Thermogreen LB-2 Septa) aufgefangen, um daraus im Labor des Julius-Kühn-Instituts (JKI) die N₂O-Konzentrationen bestimmen zu lassen.

Für die Berechnung und Umrechnung der Messwerte in einen Massenbezug wurde sich an der Vorgehensweise von Nguyen Thanh (2012) orientiert und die Gleichungen entsprechend angepasst (vgl. Formel 1-3)

Formel 1:
$$E_r = \frac{(E_{aus} - E_{ein})}{A_{Haube}} * Q_{Haube}$$

Formel 2:
$$E_{fd} = \left(\frac{E_r * 24 \left[\frac{h}{d} \right]}{1000 \left[\frac{mg}{g} \right]} \right) * \frac{A_K}{M_K}$$

Formel 3:
$$E_f = \sum E_{fd} * T$$

E_r = Emissionsrate [mg/h m²]

E_{ein} und E_{aus} = Konzentration im Einstrom- bzw. Ausstromgas [mg/m³] A_{Haube} = Oberfläche unter der Haube [m²]

Q_{Haube} = Volumen Einstromgas pro Stunde [m³/h] E_{fd} = Emissionsfaktor pro Tag [Mg/d]

A_K = Gesamtoberfläche des Komposts [m²] M_K = Gesamtmasse des Komposts [Mg]

T = Dauer des gesamten Kompostierzeitraums [d]

E_f = Emissionsfaktor für den gesamten Kompostierzeitraum pro Mg Kompostmaterial

Für die Umrechnung in die Zielgrößen mg/l bzw. mg/m³ wurde eine Standardgastemperatur von 20 °C und der atmosphärische Normaldruck von 1.013 hPA angenommen. Da im Messgerät kein Temperatursensor integriert ist und die Temperaturen der Gase in der Haube und im Messschlauch Schwankungen unterlagen, wird der Einfachheit halber diese Standardisierung vorgenommen. Da der Fokus der Arbeit auf dem Vergleich der Emissionswerte der beiden Kompostansätze (mit und ohne PK) liegt und nicht auf der Ermittlung der tatsächlichen und totalen emittierten Gasmengen, handelt es sich hier um eine zu vernachlässigende Ungenauigkeit, da die Rahmenbedingungen während des gesamten Untersuchungszeitraums gleich waren und die Messungen in derselben Art und Weise vorgenommen wurden.

Des Weiteren wurde angenommen, dass es sich um konstante Emissionsraten handelt, da sich die Werte nach einigen Minuten einem Wert annähern und um diesen schwanken, daher kann der Emissionsfaktor einer Messung als Grundlage zur Berechnung von Tagesemissionen genommen werden. Für die Ermittlung der Gesamtemissionen, wurden die Werte der Emissionsfaktoren pro Tag (E_{fd}) gemittelt

Die Porengaswerte wurden mit der zum Messgerät gehörigen Gaslanze gemessen und dienen einem groben Vergleich der im Kompost produzierten Gase und den davon tatsächlich in die Atmosphäre entweichenden Anteil.

Um die Ergebnisse der Gasmessungen vergleichbar zu gestalten und den Beitrag zum Klima richtig abschätzen zu können, wurden die nicht-CO₂-Klimagase in CO₂-Äquivalente umgerechnet (vgl. Formel 4) (Faktoren nach IPCC 2013, S.714).

Formel 4:
$$E_{f\ CO_2\text{-Äquivalent}} = (E_{f\ CH_4} * 28 + E_{f\ N_2O} * 265)$$

$E_{f\ CO_2\text{-Äquivalent}}$ = Summe CH₄ und N₂O Emissionen umgerechnet in CO₂-Äquivalente [g/Mg Kompostmaterial]

5.4 Böden und Pflanzen

Um die Wirkung der hergestellten Pflanzenkohlesubstrate auf Bodeneigenschaften, das Pflanzenwachstum und die -qualität zu untersuchen wurden am Modellstandort Gutsgarten Hellersdorf 4 Hochbeete aufgebaut und verschiedene Pflanzenkohlekomposte und Kompost eingemischt. Der im Rahmen des Projektes am Umweltbildungszentrum (UBB) hergestellte Pflanzenkohlekompost wurde auf einem Teil des Gemüsegartens am UBB und in Hellersdorf in einem Hochbeet ausgebracht.

5.4.1 Hellersdorf

Im Gutsgarten Hellersdorf wurden vier Hochbeete mit verschiedenen Varianten im Rahmen eines angekündigten Workshops am 02.05.2019 etabliert. Nach einer theoretischen Einführung zu C-Speicherung, den vielfältigen Möglichkeiten zur Herstellung von Pflanzenkohle sowie der Wirkung von Pflanzenkohle in Böden und auf Pflanzen, wurden mit den Teilnehmenden 4 Hochbeete befüllt.

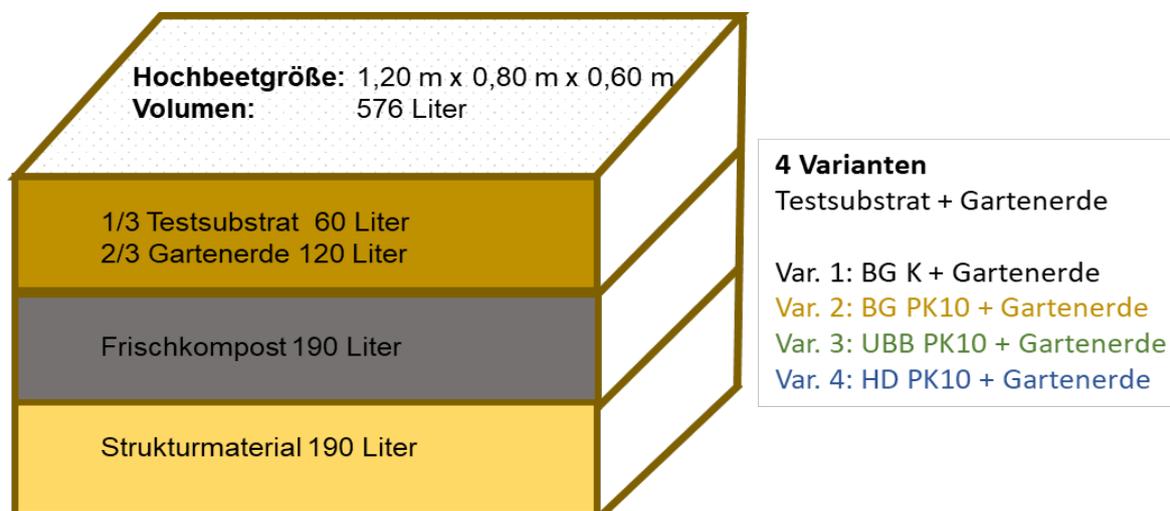


Abbildung 19: Größe, Aufbau und Varianten der vier Hochbeete im Gutsgarten Hellersdorf

Die Hochbeete haben eine Länge von 1,20 m und eine Breite von 0,80 m. Die Höhe beträgt 0,60 m. Alle vier Hochbeete wurden wie in Abbildung 19 dargestellt mit Strukturmaterial und Frischkompost befüllt. Für die oberste Schicht wurde, wie im Gutsgarten Hellersdorf üblich, Öko-Gartenerde vom Erdenwerk Galafa aus Falkensee eingesetzt. Es wurde 2/3 Gartenerde mit 1/3 Kompost bzw. verschiedenen Pflanzenkohlekomposten intensiv gemischt und die Hochbeete abschließend befüllt.

Bei der ersten Variante wurde Kompost aus dem Botanischen Garten (BG) und in der zweiten Variante Pflanzenkohlekompost mit 10 Vol.-%-Pflanzenkohle (PK) auch aus dem Botanischen Garten eingefüllt (Varianten BG K, BG PK10) es handelt sich hierbei um Substrate die im Rahmen des CarboTIP Projektes im Botanischen Garten hergestellt wurden. Das dritte Hochbeet wurde mit dem aus dem UBB hergestellten Pflanzenkohlekompost befüllt (UBB PK10) und die vierte Variante (HD PK10) mit Hellersdorfer Pflanzenkohlekompost (vgl. Kap. 4.2). Die Eigenschaften der im Gutsgarten Hellersdorf und UBB eingesetzten Substrate sind in Tabelle 10 (Kap. 5.4.2) dargestellt.

Aus den Hochbeeten wurden die ersten Bodenproben für chemisch- physikalische Untersuchungen am 13.06.2019 in einer Tiefe von 0-15 cm mit Hilfe einer Gartenschaufel an 5 verschiedenen Stellen entnommen, daraus eine Mischprobe erzeugt und in 2 Tüten verpackt. Eine Probe wurde für N_{\min} Untersuchungen in Kühlboxen transportiert und am gleichen Tag tiefgefroren und die andere Probe für die weiteren Analysen kühl gelagert. Am Ende der Vegetationsperiode (10.10.2019) erfolgte die zweite Beprobung der obersten Schicht identisch zur ersten Beprobung. Es wurden dieselben Analysen (kein KW Aufschluss) wie im Frühling durchgeführt (Tabelle 3).

Bepflanzungen und Ernte der Hochbeete in Hellersdorf

In Hellersdorf wurden nach einer Kälteperiode Ende Mai 2019 in jedes Hochbeet 10 Zwiebeln (*Allium cepa* L.), 3 Kohlrabi (*Brassica oleracea* var. *gongylodes* L.), 3 Kopfsalate (*Lactuca sativa* var. *capitata* L.) drei Tomaten (*Solanum lycopersicum* L.) und am Rand 10 Ringelblumensamen (*Calendula officinalis* L.) eingepflanzt. Die Tomaten wurden regelmäßig ausgegeizt und die Hochbeete nach Bedarf gegossen. In Tabelle 4 sind die Termine der Gemüseernten dargestellt. Beim Kohlrabi zeigten sich visuell schon in den Beeten deutliche Unterschiede und es wurde bei der Ernte zusätzlich zum essbaren Teil (Kopf) auch die Blätter und Wurzeln entnommen. Bei den Tomaten konnte kein Ertrag ermittelt werden, da sie von Besuchenden des Gutsgartens in regelmäßigen Abständen gegessen wurden. Zur Bestimmung der Frischmasse wurden die Wurzeln vorher über einem 2 mm Sieb ausgewaschen. Zur Ermittlung der Trockensubstanzen wurden nach der Bestimmung der Frischmassen die einzelnen Pflanzenteile schonend zuerst bei 60 °C und anschließend bei 103 °C getrocknet, fein gemahlen und die Inhaltsstoffe mittels CN-Analyzer und Salpetersäureaufschluss (Druckaufschluss) ermittelt.

Tabelle 3: Labormethoden zur Untersuchung der bodenchemischen- und physikalischen Eigenschaften

Parameter	Bestimmungsmethode*
Trockensubstanz [%]	DIN EN 14346:2007-03
Probenvorbehandlung (Boden)	DIN ISO 11464
Probenvorbehandlung (Kompost)	Methodenbuch BGK (2006) Kap I B1.1
Wassergehalt [%]	DIN EN 14346:2007-03
Rohdichte [g/l FS]	BGK (2006) Kap. II A4
Max. Wasserhaltekapazität (WHK _{max}) [Vol.-%]	BGK (2006) Kap. II A2
pH (CaCl ₂) [-]	DIN EN 13037:2012-01 und BGK (2006), Kap. III. C1.1
Salzgehalt [g/L FS]	Boden: VDLUFA Methodenbuch I, A 13.4.1 Kompost: Methodenbuch BGK, Kap. III. C2.1
Kationenaustauschkapazität KAK _{eff} [cmol _c /kg]	DIN EN ISO 11260:2011-09
Organische Substanz (Glühverlust) [% TS]	Boden: DIN 19684-3:2000-08 Kompost: Methodenbuch BGK (2006) Kap. III B1.1
Gesamt-Kohlenstoff C _t [% TS]	ISO 10694:1995-03
Organischer Kohlenstoff (C _{org})	= C _t , bei Vorhandensein von Carbonaten nach Abzug C _{anorg} (Wösthoff Carmograph)
Gesamt-Stickstoff N _t [% TS]	ISO 13878:1998-03
C/N-Verhältnis [-]	berechnet
Gesamtgehalte: P, K, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn [mg/kg TS]	ISO 11466:1995-03 (Königswasseraufschluss oder Salpetersäureaufschluss) anschl. DIN EN ISO 11885:2009-09 (E22) (ICP-OES)
Pflanzenverfügbare Nährstoffe K _{CAT} , P _{CAT} [mg/kg]	VDLUFA Methodenbuch I, A 13.1.1 Messg. DIN EN ISO 11885:2009-09 (E22) (ICP-OES)
Pflanzenverfügbare Nährstoffe (P _{CAL} , K _{CAL})	VDLUFA Methodenbuch I, A 6.2.1.1 Messung DIN EN ISO 11885: 2009-09 (E22) (ICP-OES)
Löslicher (pflanzenverfüg.) Stickstoff N _{min} [mg/L]	VDLUFA Methodenbuch I, A 6.1.4.1

Tabelle 4: Erntetermine, Kultur, Stückzahl, Pflanzenteile am Standort Gutsgarten Hellersdorf

Erntetermin	Kultur	Stückzahl	Pflanzenteil	Inhaltsstoffe
09.07.2019	Kohlrabi	3	Blätter, Kopf, Wurzeln	C, N, P, K, Schwermetalle
09.07.2019	Salat	3	Salatkopf, essbare Teil	C, N, P, K, Schwermetalle
08.08.2019	Zwiebeln	10	Zwiebel, essbare Teil	C, N, P, K, Schwermetalle

Im Gutsgarten Hellersdorf wurde zur Information für die Besuchenden an jedem Hochbeet (Abbildung 20) eine Infotafel zu den Projektinhalten und -zielen sowie zur jeweiligen Variante angebracht.



Abbildung 20: Hochbeete mit Infotafeln am Gut Hellersdorf (07.08.2019)

5.4.2 Umweltbildungszentrum

Für den Gartenboden am UBB lagen keinerlei bodenchemische Daten vor. Um eine chemisch-physikalische Grundcharakterisierung der Ausgangsgehalte in den Böden vor Einbringung der am UBB hergestellten Pflanzenkohlekomposte zu ermitteln wurden am 05.09.2018 Bodenproben in einer Tiefe von 0-20 cm mittels N_{min} -Bohrer gezogen (Abbildung 21). Für jedes der 6 Gartenbeete (Beet 1 bis Beet 6) wurde eine Mischprobe aus 6-8 Einzelproben hergestellt. Es erfolgte eine Lufttrocknung und Siebung auf < 2 mm nach den Analysen der feldfrischen Proben, in denen auch der mineralisierbare Stickstoff (N_{min}) ermittelt wurde. Die Feinerde (< 2 mm) wurde in einer Scheibenschwingmühle gemahlen und an diesen gemahlene Proben der Gesamtkohlenstoff (C_t), der Gesamtstickstoff (N_t), lösliche Nährstoffe (CAT), die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}), die Gesamtschwermetallgehalte im Königswasserextrakt (KW) und die Bodenart ermittelt (Tabelle 5).



Abbildung 21: Bodenprobennahme am 05.09.2018 und Gemüsegarten am 31.01.2019

Die Korngröße ist eine sehr stabile Bodeneigenschaft und verändert sich sehr langsam während der stattfindenden bodenbildenden Prozesse. Wie aus Tabelle 5 ersichtlich liegt sie in allen 6 Gartenbeeten am UBB in der Bodenartenhauptgruppe Sande und ist in die Gruppe der Lehmsande (AD-HOC-AG Boden, 2005) einzustufen. Sie variiert geringfügig in den Schluff- und Tonanteilen, ist im Hinblick auf die Bodenarten sehr homogen und die einzelnen Gartenbeete sind sehr gut untereinander vergleichbar.

Tabelle 5: Korngrößen und Bodenart der Oberböden (0-20 cm Tiefe) in den 6 Gartenbeeten am UBB

Beet Nr.	Korngröße			Bodenart
	Sand	Schluff %	Ton	
Beet 1	84	11	5	Su2
Beet 2	85	7	8	Sl2
Beet 3	85	12	3	Su2
Beet 4	82	7	11	St2
Beet 5	84	6	9	St2
Beet 6	83	12	4	Su2

Bei der visuellen Beurteilung anhand der Bodenfarbe (Munsell, 2017) konnten nur geringfügige Unterschiede festgestellt werden (Tabelle 6). Die pH-Werte lagen im sehr schwach sauren bis neutralen Bereich und unterscheiden sich nur geringfügig, die elektrische Leitfähigkeit war mit $< 92 \mu\text{S}/\text{cm}$ sehr niedrig. Die C_T - bzw. N_T - Gehalte der Bodenmischproben aus 0-20 cm Tiefe lagen für den Kohlenstoff in den 6 Beeten zwischen 2,5 und 3,4 % und für den Stickstoff zwischen 0,14 und 0,24 %. Der höchste C_{org} -Gehalt ging einher mit dem höchsten Stickstoffgehalt und dem niedrigsten C/N Verhältnis.

Tabelle 6: Farbwerte Munsell, bodenchemische Eigenschaften und Humusgehalte der Gartenbeete in 0-20 cm Tiefe

Beet Nr.	Farbe	pH (CaCl ₂)	el. LF [μs/cm]	C _t [%]	C _{org} [%]	N _t [%]	C/N	Humusgehalt M.-%
Beet 1	7,5 YR 2,5/1	6,7	70	3,4	3,32	0,24	13,7	5,70
Beet 2	7,5 YR 2,5/1	6,8	80	2,5	2,39	0,16	15,0	4,11
Beet 3	7,5 YR 2,5/1	6,8	70	2,6	2,56	0,15	17,1	4,39
Beet 4	7,5 YR 3/1	6,9	45	2,9	2,84	0,14	20,5	4,88
Beet 5	7,5 YR 3/1	7,2	92	3,0	2,83	0,17	17,1	4,87
Beet 6	7,5 YR 3/1	7,1	62	3,1	2,98	0,17	17,4	5,13

Die Humusgehalte lagen zwischen 4,4 und 5,7 %. Es handelt sich um stark humose Oberböden (h4) (AD-HOC-AG, 2005). Für die Bewertung der Böden als Pflanzenstandort ist die Kationenaustauschkapazität ein weiterer wichtiger Faktor. Die KAK_{eff} (Tabelle 7) konnte in allen 6 Beeten als hoch (AD-HOC-AG Boden, 2005) eingestuft werden, an den Austauschplätzen war maßgeblich Calcium beteiligt. Der mineralisierbare Stickstoff (N_{min}) war im Durchschnitt bei 7,6 mg /kg Boden und vorwiegend als Nitrat für die Pflanzen verfügbar. Bei der bestimmten Trockenrohddichte von 1,4 kg /l entspricht dies auf 20 cm Bodentiefe berechnet 21 kg N_{min} /ha. Die Spanne der pflanzenverfügbaren K-Gehalte (K_{CAT}) war sehr groß und lag zwischen 32 und 215 mg/kg. Die Streuung der P_{CAT} -Gehalte hingegen war mit 31 bis 48 mg/kg gering. In den Beeten 4 und 5 wurde ein organisch-mineralischer N-P-K Malzkeimdünger (4-1-5) ausgebracht und dies erhöhte wesentlich den extrahierbaren K-Anteil.

Tabelle 7: KAK_{eff} , N_{min} , K_{CAT} und P_{CAT} der Gartenbeete in 0-20 cm Tiefe

Beet Nr.	KAK_{eff} [cmol _c kg ⁻¹]	N_{min} -N [mg /kg]	K_{CAT}	P_{CAT} [mg /kg]
Beet 1	13,7	7,8	32	31
Beet 2	13,4	6,7	48	32
Beet 3	13,6	7,9	24	29
Beet 4	14,3	7,6	121	46
Beet 5	13,8	7,4	215	48
Beet 6	14,4	8,0	39	38

Bei der Bodenart handelt es sich in allen 6 Beeten um Sande (vgl. Tabelle 5). Die Schwermetallgehalte in den beprobten Beeten liegen teilweise über den Vorsorgewerten für die Bodenart Sand (BBodSchV, 2012) (Tabelle 8). Durch das Einbringen der erzeugten Eigenkomposte (vgl. Kap 4.1) kommt es zu keiner nennenswerten Mehrbelastung mit Schwermetallen.

Tabelle 8: Gesamtschwermetallgehalte (As, Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Cr) der Oberböden (0-20 cm Tiefe) in den Beeten im UBB

Beet Nr.	Schwermetall						
	As	Pb	Cd	Cu	Ni	Zn	Cr
	-----[mg/kg]-----						
Beet 1	3,3	37	0,4	25	9,4	80	8,5
Beet 2	3,0	38	0,4	33	6,6	80	9,0
Beet 3	3,6	36	0,3	19		100	38
Beet 4	2,8	35	0,5	22	6,8	77	10
Beet 5	2,9	38	0,6	21	6,5	98	8,8
Beet 6	2,9	43	0,4	38	5,8	78	8,3
Vorsorgewert							
BBodSchV (Sand)	< 10	40,0	0,4	20,0	15,0	60,0	30,0

Anhand dieser Grundcharakterisierung vom September 2018 wurden am Umweltbildungszentrum für die Etablierung der Pflanzversuche im Frühling 2019 zwei Flächen ausgewählt. Für die Variante mit Pflanzenkohlekompost (UBB_mPK) wurde Beet 2 genommen, auf Beet 3 wurde kein Substrat ausgebracht und diente als Kontrollvariante (UBB_oPK).

Am 25.04.2019 wurde auf der Fläche (Beet 2) Pflanzenkohlekompost (PK) mit einer Aufwandmenge von 25 l/m² ausgebracht. Die gesamte Fläche wurde in einzelne Quadratmeter unterteilt um die Mengen genau auszubringen, Wege wurden ausgespart (Abbildung 22).



Abbildung 22: Ausbringung des Pflanzenkohlekompostes am 25.04.2019 (li.), bepflanzte Beete und Infoschild (re.) am UBB

Für die nach der Ausbringung durchgeführte Probenahme wurden die Flächen (oPK, mPK) für detaillierte Aussagen in drei Teilflächen unterteilt. Die Entnahme der Bodenproben erfolgte zu Beginn am 27.06.2019 und zum Ende der Vegetationszeit am 10.10.2019 mit einem Pürckhauer Bohrstock zur N_{min} Probenahme in einer Tiefe von 0-20 cm. Dazu wurden in jeder Teilflächen 6 Einzelproben gezogen, daraus eine Mischprobe gebildet und diese Mischprobe in 2

gleiche Proben unterteilt. Eine Probe wurde für die N_{\min} Bestimmungen für den Transport in Kühlboxen gelagert und anschließend eingefroren. In der anderen Probe wurden dieselben chemisch-physikalischen -Eigenschaften bestimmt wie in Hellersdorf zu Vegetationsbeginn und -ende.

Bepflanzung und Ernte der Gartenbeete am UBB

Am UBB wurde Blumenkohl (*Brassica oleracea var. botrytis* L.), Rotkohl (*Brassica oleracea convar. capitata var. rubra* L.), 7 Tomaten und dazwischen Kopfsalat auf einer der drei Teilflächen mit Pflanzenkohle (mPK) nach guter fachlicher Praxis im Garten gepflanzt. Auf der Fläche ohne Pflanzenkohlekompost (oPK) erfolgte die Bepflanzung spiegelbildlich.

Geerntet wurde als erstes der komplette Blumenkohl (Blätter, Kopf, Wurzeln) und Mitte August die Früchte von 6 Tomatenpflanzen um die Inhaltsstoffe zu ermitteln. Bei den Tomaten zeigte es sich als nicht praktikabel und durchführbar die Erträge über die gesamte Vegetationszeit zu ermitteln da die Tomaten kontinuierlich geerntet wurden. Beim Rotkohl wurden von den 6 Köpfen jeweils drei für die Trockenmassebestimmung und Inhaltsstoffbestimmungen entnommen die Frischmasse bestimmt und für die weiteren Untersuchungen eine Mischprobe hergestellt. Mit den Pflanzenproben wurde gleich verfahren wie in Hellersdorf.

Tabelle 9: Erntetermin, Kultur, FM, TS, TM-Erträge und Inhaltsstoffe am Standort UBB

Erntetermin	Kultur	FM/TS/TM-Ertrag	Inhaltsstoffe
25.07.2019	Blumenkohl	Blätter, Kopf, Wurzeln	C, N, P, K und Schwermetalle
15.08.2019	Tomaten	Tomaten (essbare Teil)	C, N, P, K und Schwermetalle
18.09.2019	Rotkohl	Kohlkopf (essbare Teil)	C, N, P, K und Schwermetalle

Bodenchemische- und physikalische Eigenschaften der eingesetzten Substrate

Die im Botanischen Garten und in Hellersdorf hergestellten Substrate wurden am Ende des Kompostierprozesses durch ein Trommelsieb der Maschenweite 20 mm gesiebt. Am Umweltbildungszentrum kam ein in Kleingärten typisches Durchwurfsieb mit ca. 30 mm Maschenweite zum Einsatz. Die Zusammensetzung der Korngröße hat neben den chemischen Eigenschaften auch einen wesentlichen Einfluss auf das Pflanzenwachstum. Grobkörniger strukturreicher eingemischter Kompost beeinflusst die physikalischen (z.B. Fließwege Wasser) und chemischen Eigenschaften (Austausch Bodenluft mit der Atmosphäre) und auch Keimfähigkeit der Pflanzen im Boden anders als feinkörniger Kompost. In Abbildung 23 sind die Körnungs-Summenkurven der eingesetzten Substrate dargestellt.

In den beiden Substraten aus dem Botanischen Garten sind die Korngrößen bis 0,315 mm nahezu identisch, UBB_PK10 und HD_PK10 weisen in dieser Fraktion einen 10 % höheren Anteil aus. Um 20 % geringer ist hingegen beim Substrat BG_PK10 die Fraktion zwischen 0,315 bis 2 mm im Vergleich zu den anderen Varianten. Ab einer Korngröße von 2 mm sind die Anteile auf einem vergleichbaren Niveau.

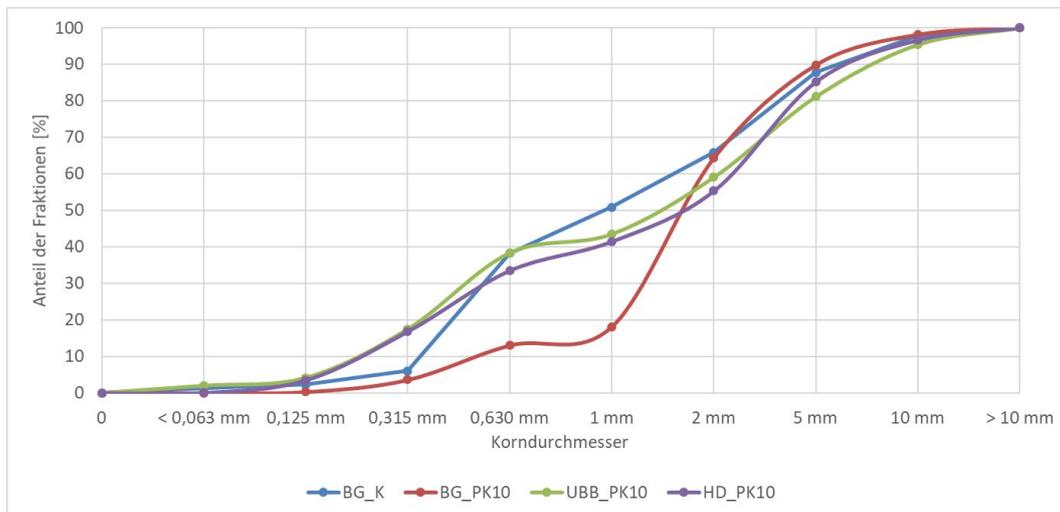


Abbildung 23: Körnungs-Summenkurve der vier eingesetzten Substrate

Die chemisch-physikalischen Eigenschaften der in den Hochbeeten und am UBB eingesetzten Substrate im Vergleich zu den Wertebereichen der BGK (2009) sind in der folgenden Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Chemisch- physikalische Eigenschaften der eingesetzten Substrate in den Hochbeeten und am UBB

Parameter	Einheit	BG_K	BG_PK10	UBB_PK10	HD_PK10	Wertebereich (BGK 2009)
pH _(CaCl2)		7,22	7,22	7,40	8,14	7,8 -8,2
Rohdichte	[g /L FS]	800	775	639	478	480 - 830
Salzgehalt	[g /L FS]	3,16	1,78	3,34	1,63	2,0 – 8,8
OS	[%]	19,0	31,4	21,5	70,5	25 -53
C _t	[%]	11,4	22,3	14,6	40,6	k.A.
N _t	[%]	0,72	0,75	0,90	1,63	0,9 – 1,9
P	[mg kg]	1464	1543	1873	2307	1744-4796
K	[mg kg]	6992	7788	9016	12308	4980-14980
N _{min}	[mg /L FS]	357	314	477	2	0 - 740
P _(CAL)	[mg /L FS]	362	302	430	370	176 - 704
K _(CAL)	[mg /L FS]	2040	1555	2580	2530	1.245 – 4.565

Die Substrate BG_K, BG_PK10 und UBB_PK10 weisen vergleichbare Analysenergebnisse auf, der eingesetzte PK aus Hellersdorf hat jedoch einen höheren pH-Wert, einen sehr hohen Gehalt an organischer Substanz und zum Zeitpunkt der Etablierung der Hochbeete im Vergleich zu den anderen Substraten trotz sehr hohem N_t-Gehalt einen sehr niedrigen N_{min}-Gehalt. Im Vergleich zu den P-Gesamtgehalten ist der pflanzenverfügbare P_{CAL}-Anteil im Substrat HD_PK10 am geringsten für Kalium trifft dies für diese und HD_PK10 zu.

Jedes Substrat wurde zu 1/3 mit dem Bodensubstrat (sog. Gartenerde) vermischt. Nach den

ermittelten chem.- phys. Kenndaten (Tabelle 11) eignet sie sich gut zur Herstellung der obersten Schicht in den Hochbeeten durch Vermischen mit Kompost bzw. Pflanzenkohlekompost.

Tabelle 11: Chemisch-physikalische Eigenschaften der Gartenerde zum Einmischen in die Hochbeete

pH _(CaCl2)	Roh- dichte	Salzgehalt	OS	C _t	C _{org}	N _t	P _(KW)	K _(KW)	P _(CAL)	K _(CAL)
[-]	[g / l FS]	[g / l FS]	[%]	[%]	[%]	[%]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
7,24	1119	1,04	7,98	4,83	4,54	0,35	634	2130	206	910

In der folgenden Tabelle 12 sind die Gesamtschwermetallgehalte der eingesetzten Substrate im Vergleich zu den gesetzlichen Regelwerken dargestellt. Die Grenzwerte der BGK (2018) gelten für Frisch-, Fertig- und Substratkomposte. In der DÜMV (2012) sind für die Schwermetalle Cu, Cr und Zn keine Grenzwerte definiert. Die Grenzwerte der BioAbV (2017) unterscheiden sich in Abhängigkeit der Ausbringungsmenge (20 t/ha oder 30 t/ha) innerhalb von drei Jahren. Zur Einstufung des eingesetzten Bodensubstrates in den Hochbeeten werden auch die geltenden Vorsorgewerte für Sand nach BBodSchV (2012) angegeben. Alle eingebrachten Substrate liegen unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte. Die für die Hochbeete eingesetzte Gartenerde erfüllt die Vorsorgewerte (Sand) für As, Pb, Cd und Cu, liegt jedoch bei Ni und Zn darüber.

Tabelle 12: Gesamtschwermetallgehalte (As, Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Cr) der Inputstoffe im Vergleich zu den geltenden Vorgaben

Substrat	Schwermetall						
	As	Pb	Cd	Cu	Ni	Zn	Cr
	[mg kg ⁻¹]						
BG_K	3,7	32	0,2	24	37	89	33
BG_PK 10	2,9	29	0,2	21	33	80	59
UBB_PK10	2,7	27	0,6	20	30	135	35
HD_PK10	1,6	11	0,3	21	30	101	34
Gartenerde	3	28	0,2	19	22	102	29
Grenzwert BGK (2018)	40	150	1,5	100	50	400	100
Grenzwert DÜMV (2012)	40	150	1,5	k. A.	80	k.A.	k.A.
Grenzwert BioAbV 20 t/30 t	k. A.	150/100	1,5/1,0	100/70	50/35	400/300	100/70
Vorsorgewert BBodSchV (2012) (Sand)	< 10	40,0	0,4	20,0	15,0	60,0	30,0

5.4.3 Pflanzentests

Mit den hergestellten und in Hellersdorf und am UBB eingesetzten Substraten (BG-K, BG_PK10, UBB_PK10, HD_PK10) wurden Qualitätsprüfungen mittels Pflanzentests (Kresse-test und Chinakohltest) durchgeführt.

Für den Test auf Pflanzenverträglichkeit wurde der Petrischalentest mit Kresse in Anlehnung

nach DIN EN 16086-2 2012-01 angewendet. Bei diesem Test wird der Einfluss von Bodenverbesserungsmitteln und Kultursubstraten auf die Keimung sowie die frühe Wurzelentwicklung von Kresse ermittelt. Eine gehemmte Keimung und geringes Wurzelwachstum können auf phytotoxische Substanzen im Substrat hinweisen.

Als Referenzmaterial diente ein auf einen definierten pH-Wert eingestellter Torf. Mittels Faustprobe wurde ein optimaler Feuchtigkeitsgehalt in den Substraten eingestellt und 10 Kressesaamen (*Lepidium sativum* ssp. „Einfache“) in das zu testende Substrat (5fach Wiederholungen) eingebracht und 72 Stunden im Dunkeln bei 25 ± 5 °C inkubiert (Abbildung 24). Anschließend wurde die Keimrate (Anzahl Samen/Petrischale) und die Wurzellänge (mm) ermittelt. Die mittlere Keimrate (AGR in %) gibt den Mittelwert der Anzahl der gekeimten Samen jeder Prüfvariante in allen Wiederholungen an. Der Index der Wurzellänge RI (Root length Index) bezeichnet die prozentuale Abweichung der Wurzellänge im Prüfsubstrat von der mittleren Wurzellänge im Vergleichssubstrat.

$$RI [\%] = ((RLs1 / RLc) + (RLs2 / RLc) + \dots + (RLs5 / RLc)) / 5 \times 100 [\%]$$

RI: Index der Wurzellänge

RLs1/s2 ...s5: mittlere Wurzellänge der ersten bis zur fünften Wiederholung

RLc: mittlere Wurzellänge im Vergleichssubstrat

Der Munoo-Liisa-Vitalitätsindex (MLV) beschreibt die prozentuale Abweichung des Produktes der Keimraten und mittleren Wurzellängen im Prüfsubstrat vom Produkt der mittleren Keimrate und Wurzellänge des Referenzmaterials.

$$MLV [\%] = (((GRs1 * RLs1) + (GRs2 * RLs2) + \dots + (GRs5 * RLs5)) / 5 * (GRc * RLc)) * 100 [\%]$$

MLV: Munoo-Liisa-Vitalitätsindex

GRS1...s5: Keimrate der ersten bis zur fünften Wiederholung

GRc: Keimrate im Vergleichssubstrat

RLs1...s5: mittlere Wurzellänge der ersten bis zur fünften Wiederholung

RLc: mittlere Wurzellänge im Referenzmaterial

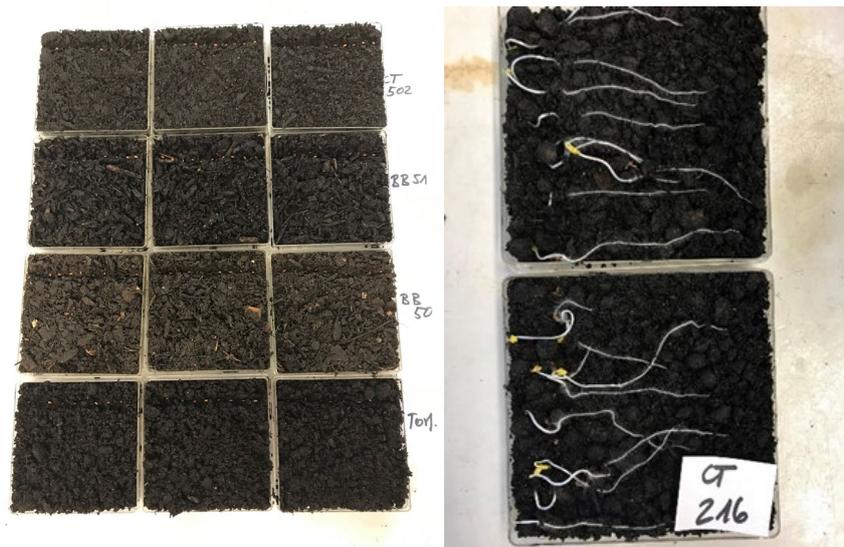


Abbildung 24: Kressetest zu Beginn und nach 72 Stunden Inkubation

In der folgenden Abbildung 25 sind die Keimrate (AGR), der Wurzelindex (RI) und der Moon-Liisa-Index (MLV) dargestellt. Aufgelaufen sind zwischen 82 und 98 % der Kressesamen. Der Wurzellängenindex und Moon-Liisa-Vitalitätsindex liegen in der BG_K10 Variante 20 % über dem Referenzmaterial. In den drei anderen Varianten liegt das Wurzelwachstum deutlich unterhalb des Referenzmaterials, bei geringerer Keimrate ist auch der MLV niedriger.

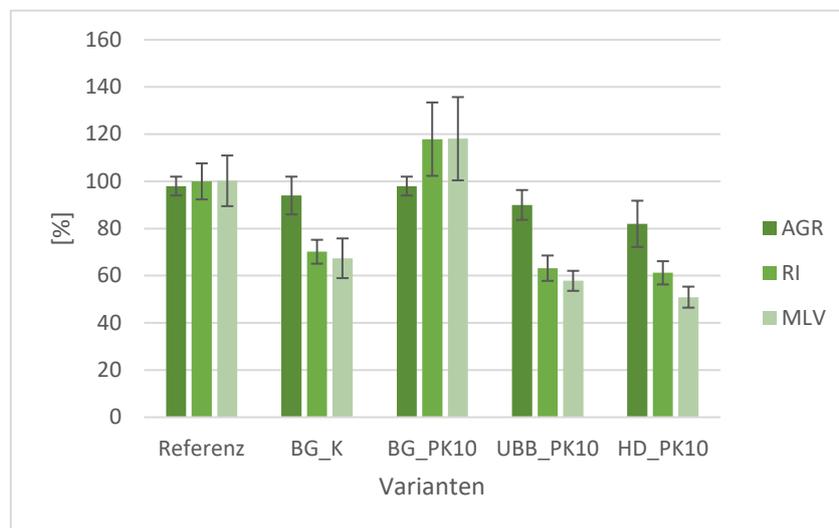


Abbildung 25: AGR [%], RI [%] und MLV [%] (MW ± STABW, n=5)

Mit dem Chinakohltest nach Bundesgütegemeinschaft Kompost (2006) Kapitel IV. A3 können potentiell schädigende Wirkungen wie z.B. überhöhte Salzgehalte, toxische Schadstoffe oder Stickstoffimmobilisierung auf Pflanzen erkannt werden.

Bei diesem Test wird zu Einheitserde (EE0, ungedüngte Einheitserde TYP 0) das Prüfsubstrat als Boden- und Düngemittel (EE0 plus 25 Vol.-% Prüfsubstrat) oder als mögliche Mischkomponente für Erden und Substrate (EE0 plus 50 Vol.-% Einmischung) getestet. Die Frischmasse

der Prüfvarianten werden prozentual in Relation zur mittleren Frischmasse des Kontrollsubstrates (EE0) ausgedrückt. Als Qualitätskriterium muss der Frischmasseertrag, erhoben nach ca. 14 Tagen, im Vergleich zum Referenzmaterial mindestens 90 % der Frischmasse der Kontrolle erreicht haben. Der randomisierte Versuch wurde unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus des Julius-Kühn-Institutes mit Chinakohl (*Brassica rapa subsp. pekinensis*) durchgeführt. Gegossen wurde nach Bedarf mit deionisiertem Wasser. Zur Bestimmung der Frischmasse wurden die Pflanzen topfweise direkt über dem Substrat mit einer Schere abgeschnitten und sofort gewogen.

$$FM(r)_{25/50\%} = [FM_{25/50\%}/FM_{EE0}] \times 100 [\%]$$

$FM(r)_{25/50\%}$: relativer Ertrag der Varianten bezüglich des Kontrollsubstrates EE0 in [%]

$FM_{25/50\%}$: mittlerer Frischmasseertrag der Varianten in [g]

FM_{EE0} : mittlerer Frischmasseertrag des Kontrollsubstrates in [g]

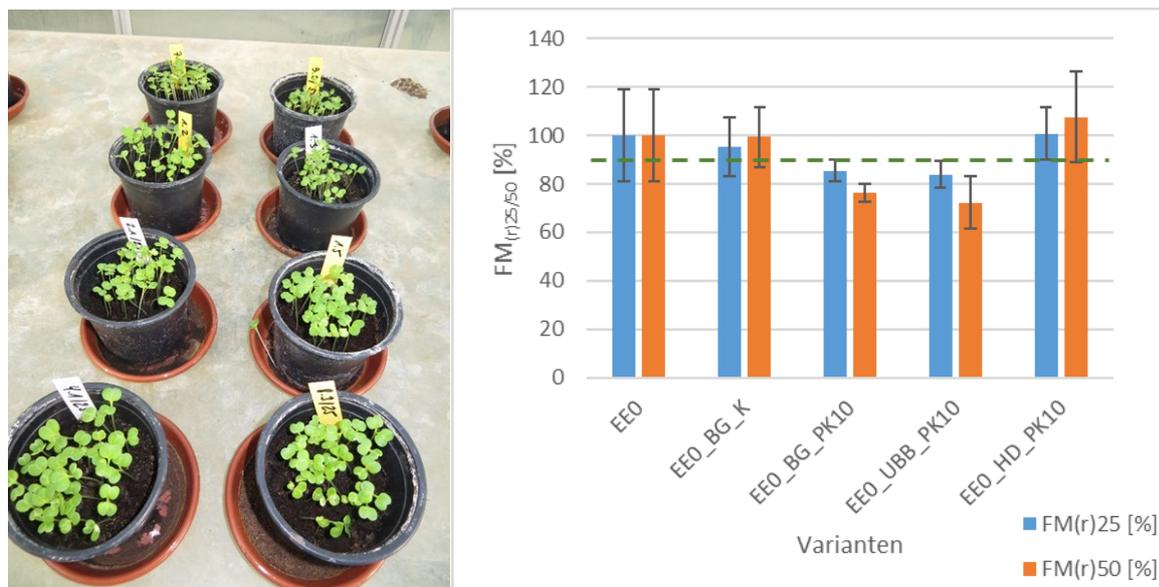


Abbildung 26: Chinakohtest Durchführung (li. Bild) und Ergebnisse (re. Bild)

In der rechten Abbildung 26 sind die Relationen der Prüfsubstrate zum Kontrollsubstrat dargestellt. Als Boden- und Düngemittel (25 %) sowie als mögliche Mischkomponente für Erden und Substrate (50 %) sind der Kompost aus dem Botanischen Garten und der Pflanzenkohlekompost aus Hellersdorf geeignet. Weniger geeignet als Boden- und Düngemittel als auch als Mischkomponente für Erden und Substrate sind die Varianten BG_PK10 und UBB_PK10. Eine mögliche Ursache dafür könnte sein dass das Substrat BG_PK10 einen 20 % geringeren Feinkornanteil (< 0,63 mm, vgl. Abb. 23) im Vergleich zu den anderen Substraten hat und die Salzgehalte in der Variante UBB_PK10 mit 3,34 g /L FS) sehr hoch sind (vgl. Tab. 10).

6 Ergebnisse zur Kompostierung und der Wirkung von Pflanzenkohle

6.1 Kompostiersversuche am UBB

6.1.1 Vorversuche und Optimierung Gartenkompostierung

Der erste Kompostversuch, aufgesetzt am 04.05.2018, zeigte anfänglich keine ausreichende Temperaturerhöhung, was an dem zu Beginn nicht ausreichend vorliegenden Grasschnitt lag. Durch eine Zugabe von frisch geschnittenem Gras am 22.05.2018 (Tag 18) konnte die notwendige Erwärmung auf $> 60^{\circ}\text{C}$ erreicht werden und damit die Hygienisierung (Abbildung 27). Bei Kompostversuch 2, aufgesetzt am 22.05.2018, konnte von Beginn an ausreichend frisches Material verwendet werden, was die ermittelten Temperaturen zeigen. Am 12.07. (Tag 68) wurden beide Komposte vereinigt, da ein merklicher Volumenverlust eintrat, was für einen guten Umsatz in den Komposten und für eine gut funktionierende Kompostierung spricht. Am Tag 153 (05.10.2018) wurde der Kompost abgesiebt und zur Nachrotte gelagert. Dabei wurde für weitere 14 Tage die Temperatur bestimmt. Diese zeigte einen erneuten Anstieg auf 50°C und eine Nachrotte, was auf die neue Durchmischung und Lockerung des Komposts zurückzuführen ist.

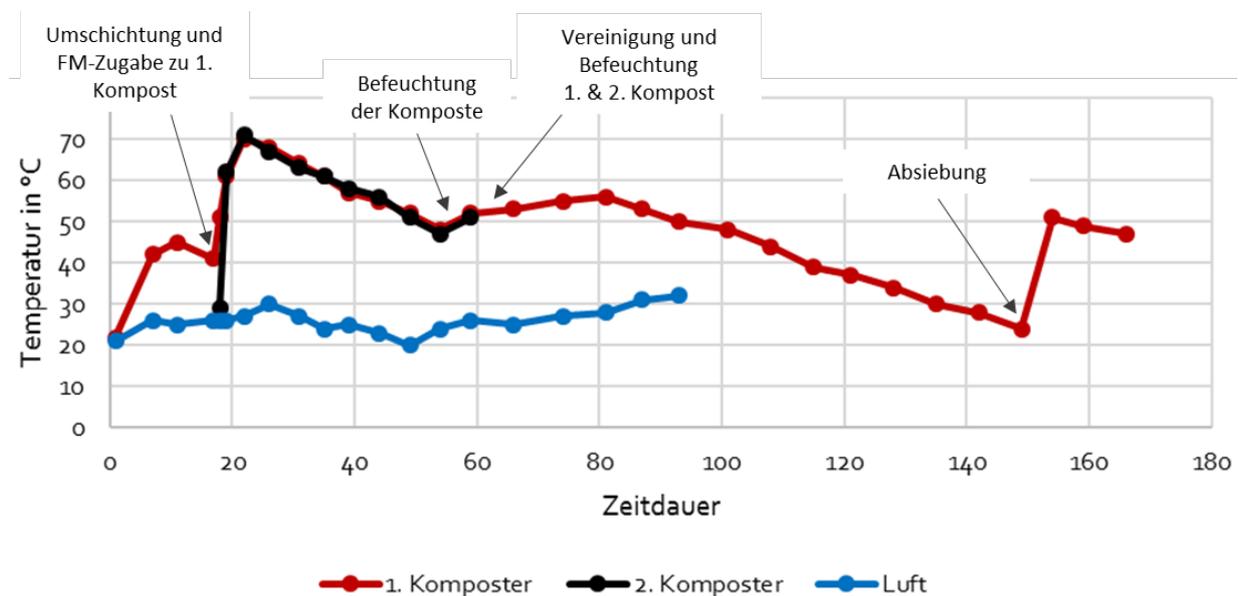


Abbildung 27: Temperaturverlauf des ersten Kompostversuches (Kompost 1 & 2) und der Außentemperatur (FM: Frischmaterial)

Aus der Lagerung/Nachrotte wurden zwei Proben entnommen und analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 aufgeführt. Der entstandene Kompost besitzt eine gute Qualität und eine hohe Düngewirkung und kann als Frischkompost in den eigenen Gemüse- und Staudenbeeten eingesetzt werden.

Tabelle 13: Ergebnisse zu Kompost - Umweltbildungszentrum (Auszug Qualitätskriterien und Güterichtlinien, BGK)

Qualitäts- merkmal	Qualitätsanforderung	UBB – Kompost 1/2		
		Werte	Anforderung BGK	
Hygiene	Nachweis der seuchenhygienischen Wirksamkeit des Behandlungsverfahrens		erfüllt	
	Salmonellen nicht nachweisbar.		erfüllt	
Fremdstoffe	Maximal 0,5 Gew.-% i. d. TS auslesbare Fremdstoffe über 2 mm Durchmesser.		erfüllt	
	Mindestens 15 Gew.-% i. d. TS, gemessen als Glühverlust	59,7 Gew.-%	erfüllt	
Schwermetallgehalte	Richtwerte (mg/kg TS)			
	Blei	150	28	erfüllt
	Cadmium	1,5	0	erfüllt
	Chrom	100	36	erfüllt
	Quecksilber	1,0	0,1	erfüllt
	Nickel	50	27	erfüllt
	Kupfer		22	
Zink		133		
Angaben zur Deklaration	Fertigkompost (Körnung)	20 mm		
	Rohdichte (Volumengewicht)	683 - 691 g/l FM (bei 14 % Wasser)		
	pH-Wert	7,0 – 7,2		
	Salzgehalt	3,6 – 4,2 g/l FM		
	Pflanzennährstoffe gesamt (g/kg TS):			
	P2O5	5,04 g/kg		
	K2O	13,4 g/kg		
	MgO	5,2 g/kg		
	Schwefel	1,5 g/kg		
	Pflanzennährstoffe löslich (mg/l FM):			
	Nmin	403 - 448		
	P2O5	851		
	K2O	4258		
	Mikronährstoffe (mg/kg TS)*:			
	B	18		
	Cu	22		
	Zn	133		
Co	46			
Se	3			
basisch wirksame Stoffe (als CaO),		12 Gew.-%		

* nach Düngemittelverordnung https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/anlage_2.html

6.1.2 Kompostversuch zur Bestimmung der Wirkung von PK auf THG und Kompostparameter in der Gartenkompostierung

In der industriellen bzw. Großkompostierung wurde der Effekt von Pflanzenkohle als Zuschlagstoff zur Kompostierung bereits öfter untersucht. Auf kleinerer Skala wie der Gartenkompostierung fehlen wissenschaftlich durchgeführte Studien zur Wirkung von Pflanzenkohle. Ziel dieses Kompostversuchs war es, zu untersuchen, ob Pflanzenkohle auf kleinerer Skala wie der Gartenkompostierung einen positiven Effekt auf die Minderung von THG-Emissionen haben.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse des Versuches dargestellt.

6.1.2.1 Zusammensetzung und relevante Parameter des Kompostansatzes

Der Kompostaufsatz erfolgte am 02.05.2019. Es wurde ein Kompost ohne und ein Kompost mit Pflanzenkohle angesetzt (Abbildung 28). Die Komposte wurden schichtweise bis zu einer Füllhöhe von ca. 0,80 cm aufgesetzt. In Tabelle 14 ist die Zusammensetzung bezogen auf FM und TM dargestellt. Die ursprünglich geplante Wiederholung von jeweils einem Kompost mit und einem Kompost ohne Pflanzenkohle etwa 2-3 Wochen später konnte aufgrund Materialmangels nicht umgesetzt werden. Stattdessen wurde in den darauffolgenden Wochen zweimal (am 15.5. und 29.5.2019) jeweils neues Material aufgefüllt, und so der eintretende Volumenverlust kompensiert. Mit dem Umsetzen der Komposte am 14.06.19 wurde bis auf den restlichen Rasenschnitt kein weiteres Material mehr zugeführt, um den Versuch im geplanten Zeitrahmen zu beenden. Die Komposte wurden am 07.08.2019 ein zweites Mal umgesetzt.

Tabelle 14: Zusammensetzung der Versuchsmieten (Ansatz mPK: mit Pflanzenkohle, Ansatz oPK: ohne Pflanzenkohle; FM: Frischmasse, TM: Trockenmasse)

Inputmaterial	Grün- schnitt	Rasen- schnitt	Laub	Struktur- material	Gemüse- reste	Pflanzen- kohle	Erde	Gesamt
mPK in kg FM	46,50	109,25	30,45	12,25	113,35	56,95	29,10	397,85
mPK in kg TM	19,86	41,21	25,36	10,12	35,73	27,23	24,36	183,87
oPK in kg FM	46,50	105,55	30,35	12,25	113,30	/	29,10	337,05
oPK in kg TM	19,86	39,81	25,27	10,12	35,73	/	24,36	155,15

Aufgrund der ausgedehnten Trockenperiode sowie heißen Temperaturen wurden die Komposte mehrmals bewässert. Die Bewässerung erfolgte an den Messtagen und beim Umschichten der Komposte. Zum Schutz vor Austrocknung wurden die Komposte mit einem Kompostvlies abgedeckt.



Abbildung 28: Aufschichten der Komposte; linkes Foto: eine Schicht mit Gemüseresten wurde aufgetragen und dem rechten Kompost eine dünne Schicht Pflanzenkohle hinzugefügt; rechtes Foto: beide Komposte sind fertig aufgeschichtet und mit einer Laubschicht abgedeckt.

Tabelle 15: Übersicht über die Eigenschaften der verwendeten Pflanzenkohle (GV: Glühverlust, FM: Frischmasse, TM: Trockenmasse)

Eigenschaften der verwendeten Pflanzenkohle	Einheit	
C in %	in %	73,5
N in %	in %	0,7
GV in %	in %	81
Rohdichte (FM)	in g/l	470
Rohdichte (TM)	in g/l	224,72
Wassergehalt	in %	52,19
pH-Wert (CaCl ₂)	-	8,04
elekt. Leitfähigkeit	in µS/cm	629
Korngrößenverteilung		
>10 mm	in %	0,41
10 -5 mm	in %	15,25
5 - 2 mm	in %	22,24
2 - 1 mm	in %	12,25
1 mm - 630 µm	in %	7,17
630 - 125 µm	in %	29,24
125 - 63 µm	in %	9,40
<63 µm	in %	4,00

Der Anteil der Pflanzenkohle (Ausgangsmaterial unbehandeltes Holz aus der Grünanlagenpflege) an der Gesamtmasse (TS) betrug bei diesem Versuch ca. 15 %. In Tabelle 15 sind chem. und physikalische Parameter der verwendeten Pflanzenkohle dargestellt.

Eine Auswahl an relevanten Parametern ist in Tabelle 16 dargestellt. Da es sich bei den Inputmaterialien um organik-reiches Material handelt, liegen die Glühverluste bei fast allen Input-materialien über 80 %. Ausnahmen bilden hier der Grünschnitt, der mit knapp 68 % etwas niedrigere Werte aufweist und die alte Erde, die erwartungsgemäß einen sehr viel höheren mineralischen Anteil besitzt. Der Rasenschnitt bringt mit 2,19 % den höchsten Stickstoffanteil ein, die Gemüsereste mit 1,84 % bringen ebenfalls einen vergleichsweise hohen Stickstoffanteil ein. Die Erde hat mit 0,32 % den geringsten Stickstoffgehalt.

Die Pflanzenkohle und das Strukturmaterial haben erwartungsgemäß mit 73,5 % und 47,65 % die höchsten Kohlenstoffwerte. Kalium wird hauptsächlich durch Grünschnitt, Rasenschnitt und vor allem durch die Gemüsereste in den Kompost in höheren Mengen eingetragen. Ebenso verhält es sich mit dem Phosphor, auch wenn die Mengen hier deutlich geringer sind.

Tabelle 16: Beschaffenheit des Inputmaterials (GV: Glühverlust, FM: Frischmasse, TM: Trockenmasse)

Parameter	Grün- schnitt	Rasen- schnitt	Laub	Struktur- material	Gemüse- reste	Pflanzen- kohle	Erde
GV in %	67,99	80,5	86,8	96,2	70,16	80,8	9,93
N in % der TM	1,53	2,19	1,26	0,67	1,84	0,7	0,32
C in % der TM	31,85	42,25	46,95	47,65	21,38	73,5	5,84
K in mg/kg	15182	15564	4510	3954	25354	7742	n.b.
P in mg/kg	2608	2740	1132	726	5791	2009	n.b.

6.1.2.2 Ergebnisse Temperatur und Gasentwicklung

Abbildung 29 zeigt den Verlauf der Kompostierung anhand der Temperatur und der Emissionen von CO₂-, CH₄-, N₂O- und NH₃ auf, welche als Indikatoren zur Beurteilung der Rotte herangezogen werden, da diese Informationen über die mikrobielle Aktivität und die Emissionssituation zulassen (Ermolaev, 2015; Zhang et al., 2014). Zwischen den Kurven des Pflanzenkohlekomposts (rötliche Kurven) und denen des Komposts ohne Pflanzenkohle (bläuliche Kurven) gibt es keinen großen Unterschied bei den Temperaturen. Deutlich zu erkennen ist, dass die Temperatur- und Kohlenstoffdioxidkurve den gleichen Verlauf haben und dass nach jeder Materialzugabe (an Tag 14 und 28) bzw. Umsetzen (an den Tagen 44 und 98) des Komposts ein Peak in Temperatur und CO₂-Ausstoß erfolgt. Auffällig ist, dass es zwischen Tag 70 und 98 zu einer erneuten leichten Temperaturzunahme kommt, ohne eine solche Intervention. Werden die drei Peaks zusammengenommen, können die Phasen der Kompostierung gut erkannt werden: mit der Anlaufphase, der thermophilen Phase und der sich anschließenden Umbau- bzw. Aufbauphase (Übergang etwa zwischen Tag 50 und 60). Interessant ist hierbei der Anstieg der CO₂-Konzentration in dem Pflanzenkohlekompost nach dem letzten Umsetzen, während die Temperatur und die CO₂-Konzentration im Kompost ohne Pflanzenkohle abnehmen. Die Temperaturabhängigkeit der übrigen Gasemissionen lässt sich gut erkennen, da die Gaskonzentrationskurven der Form der Temperaturkurven folgen.

Die Materialzufuhr bzw. die Umsetzereignisse haben einen Einfluss auf die CH₄- und NH₃-Emissionen, da die Emissionskurven hier ebenfalls nach diesen Events jeweils ansteigen. Im

Gegensatz zu den CO₂-Kurven befindet sich hier die Kurve des Komposts ohne Pflanzenkohle immer etwas über der Pflanzenkohlekompostkurve. Bei der N₂O-Konzentrationskurve fällt auf, dass sie auch dem Temperaturverlauf zu folgen scheint, jedoch ihren ersten Peak vor dem Temperaturpeak hat. Während der ersten beiden Temperaturhöhepunkte geht die N₂O-Konzentration stark zurück und steigt erst mit dem Temperaturanstieg des dritten Peaks wieder an. Es ist anzunehmen, dass neben der Temperatur andere Faktoren einen wichtigen Einfluss auf die Entstehung von N₂O haben. Eine weitere Auffälligkeit im Verlauf der THG-Freisetzung ist der starke Anstieg der Methanemissionen in beiden Komposten, die sich an die Umsetzereignisse anschließen, ebenfalls eher am Ende der Kompostierung. Dieses letzte Umsetzvorhaben führte außerdem zu einem erneuten Anstieg der NH₃-Emissionen aus dem Kompost ohne Pflanzenkohle und etwas höheren CO₂-Emissionen aus dem Pflanzenkohlekompost.

In den Graphiken der Abbildung 29 sind die Gesamtemissionen der CO₂-, NH₃-, CH₄- und N₂O-Werte aufgeführt. Werden die Emissionen auf die Trockenmasse bezogen, ergeben sich dementsprechend höhere Werte.

Während die CO₂-Werte sich mit einer Abweichung der Gesamtemissionen von nur ca. 1,6 % kaum unterscheiden, sind bei allen anderen Gasen deutliche Unterschiede zwischen den Gesamtemissionen des Pflanzenkohlekomposts und des Komposts ohne Pflanzenkohle zu sehen. So entweichen aus dem Pflanzenkohlekompost etwa 34,3 % CH₄-, 22,3 % der N₂O- und 46,6 % NH₃-Emissionen weniger im Vergleich zu den Emissionen aus dem Kompost ohne Pflanzenkohle.

Die Pflanzenkohlekompostwerte liegen dementsprechend in der Gesamtbilanz der Treibhausgasemissionen unter denen des Komposts ohne Pflanzenkohlezusatz. Besonders deutlich wird der Unterschied bei der Umrechnung in CO₂-Äquivalente. Der Pflanzenkohlekompost hat über 1,6 kg/Mg Inputmaterial weniger Emissionen an klimarelevanten Gasen als der Kompost ohne Pflanzenkohle.

Der Verlauf der CO₂- und Temperaturkurve passt gut zu den Literaturangaben (vgl. Kapitel 5.1). Die Peaks zu Beginn der Kompostierung lassen sich durch die Zugabe von neuem, leicht zersetzbaarem Material erklären und durch das Umsetzen des Kompostes, wodurch es nicht nur zur Belüftung, sondern neben der Beimischung von etwas frischem Rasenschnitt auch zu einer Durchmischung und weiteren Homogenisierung der Kompostmatrix kam und so viele noch relativ unzersetzte, trockene Randmaterialien in die Mitte verlagert wurden. Der Zusammenhang zwischen Materialzugabe und Temperaturanstieg ist zu Beginn der Rotte deutlich ablesbar und zusammen mit dem fast gleichartig verlaufenden CO₂-Kurven ist der Rotteprozess erkennbar. Temperatur- und CO₂-Werte verweisen auf einen mikrobiellen Abbau der organischen Substanz, der erwartungsgemäß zu Beginn sehr hoch ist und im Laufe der Zeit abnimmt.

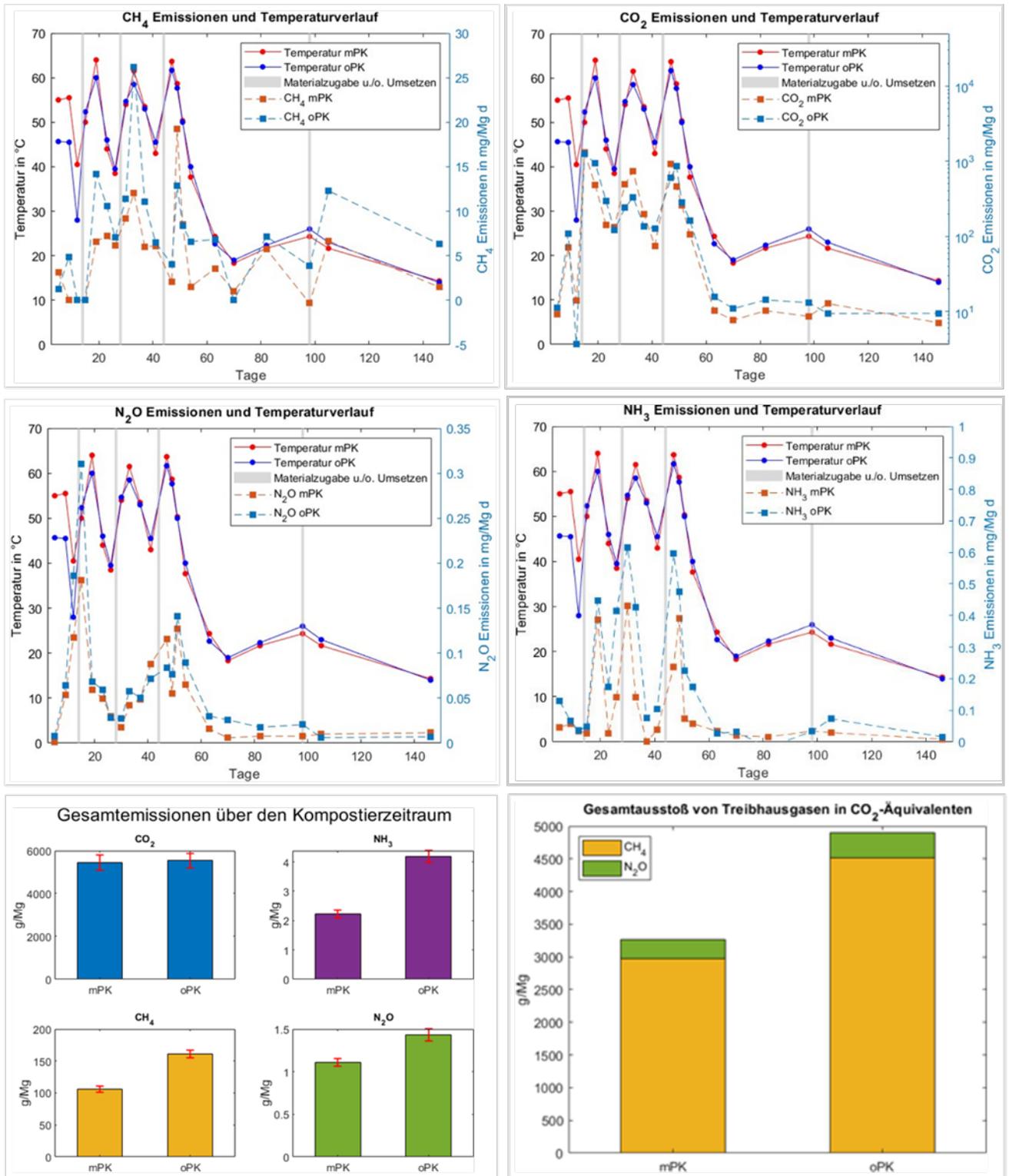


Abbildung 29: Verläufe von Temperatur, Kohlendioxid, Methan, Lachgas und Ammoniak sowie die Gesamtemissionen und die daraus abgeleitete CO₂-Äquivalente

Der leichte Anstieg der CO₂-Konzentration des Pflanzenkohlekomposts trotz fallender Temperaturen nach Tag 98 kann durch die Heterogenität der Komposthaufen erklärt werden. Da die Temperatur punktuell über mehrere Tiefen gemessen wurde, ist nicht ausgeschlossen, dass es wärmere oder kältere Bereiche im Haufen gab, in denen dementsprechend eine höhere oder geringere mikrobielle Aktivität herrschte. Die Temperaturzunahme zwischen Tag 70 und Tag 98 liegt vermutlich an einer Wasserzugabe und hohen mittleren Temperaturen (Hochsommer, Tagestemperatur über einige Wochen > 25 °C) sowie am Abbau der letzten leicht verfügbaren Substanzen.

Der Anstieg der CO₂-Konzentrationen zwischen Tag 70 und 82 steht direkt mit der Temperaturentwicklung zusammen. Da sich Temperatur und mikrobielle Aktivität gegenseitig beeinflussen, kann der Anstieg der Umgebungstemperatur zu einer leicht erhöhten Mikrobenaktivität geführt haben. Die Abnahme ab Tag 82 lässt sich vermutlich durch die beobachtete Austrocknung der Komposte während dieser hohen Temperaturen erklären.

Für die übrigen untersuchten Gase wurde ebenfalls eine Temperaturabhängigkeit nachgewiesen, was Ergebnisse aus der Literatur bestätigt (vgl. Boldrin et al., 2009; Ermolaev et al., 2014). Aus dem Pflanzenkohlekompost gasen im Vergleich mit insgesamt 3,3 kg CO₂-Äquivalenten/Mg sehr viel weniger Treibhausgase aus als aus dem Kompost ohne Pflanzenkohlebeimischung (4,9 kg CO₂-Äquivalenten/Mg). Es kam zu einer Einsparung von 1,6 kg CO₂-Äquivalenten/Mg bzw. 32 % an Treibhausgasen, was für die Wirkung der Pflanzenkohle im Gartenkompost spricht. Besonders die Entwicklung der Methan- und Lachgasemissionen liefert hierbei zusätzliche Informationen über die Feuchtigkeitsverhältnisse innerhalb der Komposte, da für ihre Entstehung anaerobe Verhältnisse notwendig sind. Generell fiel auf, dass der Wassergehalt über den Kompostierzeitraum stark geschwankt hat, was vor allem in der Austrocknung und manuellen Bewässerung der Haufen begründet liegt. Die im Labor ermittelten Wassergehalte liefern lediglich Anhaltspunkte über den Wassergehalt an den Probenahmetagen und scheinen nicht repräsentativ für den gesamten Versuchszeitraum.

Neben der Wasserzufuhr durch Niederschlag oder manuelle Bewässerung, kann durch die mikrobielle Zersetzungsaktivität H₂O frei werden, welches ggf. rekondensiert und innerhalb des Haufens zu einer lokalen Feuchtigkeitszone führen kann. Neben dem Wassergehalt ist die Belüftung eine entscheidende Voraussetzung für die Entstehung von anaeroben Zonen in der Kompostmatrix. Zu allen drei untersuchten Zeitpunkten gab es einen Unterschied in der Kompostfeuchte zwischen dem Pflanzenkohlekompost und dem Kompost ohne Pflanzenkohle von mind. 1,5 %, wobei der Pflanzenkohlekompost bei gleichen Bedingungen immer etwas feuchter blieb. Obwohl der mPK-Kompost scheinbar feuchter war, entstanden weniger klimarelevante Gase. Dies lässt nur den Schluss zu, dass trotz eines höheren Wassergehalts eine Durchlüftung des Kompostmaterials im Pflanzenkohlekomposts gegeben war und sich somit weniger anaerobe Zonen bildeten, was wiederum zu einer geringeren Methanemissionsrate führte. Diese Aussage wird durch Studien bestätigt, in denen festgestellt wurde, dass Pflanzenkohlezugabe die Bedingungen für methanotrophe Bakterien verbessert und für methanogene Bakterien verschlechtert, was zu einer Minderung der Methanemission

aus dem Kompost und somit einer erhöhten CH_4 -Speicherkapazität des Komposts führen kann (van Zwieten et al. 2009; Sonoki et al. 2013). Dies kann ebenfalls durch die verbesserte Durchlüftung des Komposts erklärt werden, da methanotrophe Organismen Sauerstoff benötigen. Die Pflanzenkohle hat sichtlich zur Auflockerung des Kompostmaterials geführt, wie sich an verklebten Rasenmatten, wie sie im Kompost ohne Pflanzenkohle zu finden waren, deutlich gezeigt hat. Ein Hinweis hierfür ist, dass die Methanemissionen zwischen den Tagen 50 und 90 besonders für den Kompost ohne Pflanzenkohle zeitweise wieder stärker ansteigen, was ein Indikator für die Bildung anaerober Zonen und eine unzureichende Belüftung der Kompostmatrix ist.

Die im Vergleich zum oPK-Kompost höhere maximale Wasserhaltekapazität bestätigt die Fähigkeit des Pflanzenkohlekomposts mehr Feuchtigkeit zu halten. Ferner wird dieser Effekt durch den teils gegensätzlichen Verlauf der Gaskonzentrationskurven von CO_2 und CH_4 bestätigt, die zum einen anzeigen wie sich das Sauerstoffverhältnis im Komposthaufen entwickelt, da CO_2 nur dann gebildet werden kann, wenn genügend O_2 zur Verfügung steht. Zum anderen wird hier ebenfalls deutlich, dass im Kompost ohne Pflanzenkohle anaerobe Verhältnisse im Vergleich öfter auftraten, resultierend in den entsprechend höheren Methanemissionen.

Wie bereits von Beck-Friis et al. (2000) beobachtet, ist der Randeffect bei kleineren Komposten im Vergleich zu größeren Kompostsystemen sehr hoch. Dies hat sich in dieser Studie vor allem in der Feuchteverteilung innerhalb der Komposte bemerkbar gemacht. Die Ränder waren oft sehr schnell völlig ausgetrocknet, während in der Mitte noch eine ausreichende Feuchtigkeit herrschte. Der Randeffect zeigte sich ebenfalls in der Beeinflussung der Temperatur. Zu Beginn der Rotte, in der i.d.R. die höchsten Temperaturen erreicht werden und eine Hygienisierung des Materials stattfinden sollte, fielen die Außentemperaturen nachts z. T. stark ab, was zu einem Auskühlen der Komposte von außen nach innen führte (Temperatureinbrüche). Einen zusammenhängenden Zeitraum von mehreren Tagen mit einer Temperatur über 60°C hat es vermutlich nicht gegeben und wenn nur im innersten Zentrum der Komposthaufen, weshalb die Komposte als nicht vollständig hygienisiert eingestuft werden müssen. Angesichts der Temperaturabhängigkeit der mikrobiellen Aktivität sowie der damit zusammenhängenden Gasentwicklung kann davon ausgegangen werden, dass es in den Randbereichen der Komposte zu einer geringeren Gasentwicklung und Emission kam, weshalb die hier präsentierten Werte ggf. eine leichte Überschätzung aufzeigen.

Da es weder eine einheitliche Datengrundlage noch eine standardisierte Messmethode oder Einheiten bezüglich der bei der Kompostierung entstehenden (Treibhaus-) Gasemissionen gibt, wurden in Tabelle 17 Ergebnisse verschiedener Studien zusammengefasst und in vergleichbare Einheiten übertragen. Die Tabelle liefert einen guten Überblick über die Größenordnungen der verschiedenen Emissionen je nach Kompostiermethode und Ausgangsmaterial und bietet daher eine gute Grundlage an Vergleichswerten. Es fällt allerdings auf, dass die Werte z. T. stark schwanken. Allein die Studien von Nguuyen Thanh (2012) und Andersen et al. (2010b) ergaben Schwankungen der CO_2 -Emissionen von über

100 kg/Mg. Hier zeigt sich, wie groß die Auswirkungen von unterschiedlichen Ausgangsmaterialien und Kompostiermethoden sein können und wie groß die Spannweite der gemessenen Emissionsraten ist. Die am UBB gemessenen Werte lassen sich besonders gut mit den Ergebnissen aus den Studien von Colón et al. (2012), Boldrin et al. (2009) und Andersen et al. (2010b) vergleichen, da diese in Art und Ausgangsmaterial der Kompostierung in dieser Studie am ähnlichsten sind.

Bemerkenswert ist zunächst die Übereinstimmung des Methanemissionswertes des UBB-Komposts ohne Pflanzenkohle von 161,4 g/Mg mit dem Wert aus der Studie von Colón et al. (2012), die ebenfalls 160 g/Mg angibt. Die übrigen Werte sind sowohl in dem Pflanzenkohlekompost als auch dem Kompost ohne Pflanzenkohle am UBB deutlich geringer als in vergleichbaren Studien. Die N₂O-Emissionen fallen insgesamt eher gering aus, gerade im Vergleich mit Werten aus der Tab.19 zeigt sich, dass in diesem Experiment deutlich niedrigere Werte gemessen wurden.

Einige Studien berichten davon, dass N₂O vor allem im späteren Verlauf der Rotte gemessen wird (Ermolaev 2015, S.48; Szanto et al. 2007, S.2664). Das kann damit begründet werden, dass sich das Nitrat als Voraussetzung für eine Denitrifizierung erst später im Kompostierprozess bildet. Dieses Verhalten konnte in diesem Versuch jedoch so nicht beobachtet werden. Auch, wenn sich das Nitrat erst im hinteren Drittel des Kompostierzeitraumes messbar angereichert hat, wurden die höchsten N₂O-Emissionen ebenfalls am Anfang der Rotte beobachtet. Dies stimmt mit den Beobachtungen von Chowdhury et al. (2014) überein, in denen eine positive Korrelation von steigenden Komposttemperaturen und einem Anstieg der N₂O und NH₃-Emissionen festgestellt wurden. Zwar gibt es im späteren Verlauf zwischen den Tagen 40 und 50 einen zweiten Peak der Lachgasemissionen. Dieser weist jedoch deutlich geringere Werte als zu Beginn der Kompostierung auf. Zwischen den beiden UBB-Komposten gibt es deutliche Unterschiede bezüglich der Gasemissionen. Generell wurden im Pflanzenkohlekompost geringere Emissionen gemessen. Während die CO₂-Emissionen in beiden Komposten unter Berücksichtigung vergleichbar waren, zeigen sich bei den übrigen Gasen deutliche Unterschiede. Die statistische Aussagekraft kann aufgrund der relativ kleinen Stichprobenzahl und einer hohen Varianz innerhalb dieser (durch die Schwankungen im Kompostierprozess) allerdings nur als mäßig eingestuft werden.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Treibhausgasemissionen aus Komposten aus verschiedenen Studien

Art der Kompostierung	Ausgangsmaterial	Messmethode	Einheit	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NH ₃	Quelle
Miete	Bio-Abfall	Tunnel	g/Mg	k.A.	4060	55	157	Nguyen Thanh 2012
Miete	Grünschnitt	Tunnel	g/Mg	k.A.	4415	24	2	Nguyen Thanh 2012
Miete	Bei anaeroben Bereichen	Tunnel	g/Mg	k.A.	10254	105	699	Nguyen Thanh 2012
Miete	allgemein	Tunnel	kg CO ₂ -eq/Mg	53 - 182	k.A.	k.A.	k.A.	Nguyen Thanh 2012
Offene Miete (belüftet)	Organischer Siedlungsabfall	k.A.	kg/Mg (Gesamtkompost = 0,52 Mg/Mg Abfall)	k.A.	1,68	0,076	2,0	Colón et al. 2012
Offene Miete (gewendet)	Organischer Siedlungsabfall	k.A.	kg/Mg (Gesamtkompost = 0,20 Mg/Mg Abfall)	k.A.	4,37	0,251	8,63	Colón et al. 2012
Miete	Garten-Abfall	Flux chamber	g/Mg (FM) CO ₂ als kg CO ₂ -Äquivalent/Mg (FM)	111±30	2400±500	60±30	k.A.	Andersen et al. 2010a
Miete	Grün- und Strauch-schnitt	Large open dynamic chamber	g/Mg (FM) CO ₂ als kg CO ₂ -Äquivalent/Mg (FM)	8,6-67,9 (4 -21 weeks)	49-604	25-178	25-354	Amlinger et al 2008
Miete	Bio-Abfall (d.h. inkl. Küchenabfälle)	Large open dynamic chamber	g/Mg (FM) CO ₂ als kg CO ₂ -Äquivalent/Mg (FM)	14,4-41,2 (9 -21 weeks)	293-243	27-116	52-576	Amlinger et al 2008
Miete	Bio-Abfall	k.A.	g/Mg (FM) CO ₂ als kg CO ₂ -Äquivalent/Mg (FM)	65,0-85,2	880-1400	150-180	k.A.	Hellmann 1995 (in: Amlinger et al. 2008)
Miete	Garten- und Park-abfall (Grünschnitt)	Concentration and transport model	g/Mg (FM) CO ₂ als kg CO ₂ -Äquivalent/Mg (FM)	236,486	5070	54	130	Hellebrand 1998
Laborversuch	Bio-Abfall	Pilot scale composting bins	g/Mg	k.A.	k.A.	k.A.	152	Smet et al. 1999
geschlossen	Siedlungsabfall	Large open dynamic chamber	g/Mg (Frischmasse) CO ₂ als kg	0,63-413	6-12.000	1,44-378	18-115	Clemens & Cuhis 2003
Home Com-posting, offen	Organischer Siedlungsabfall	k.A.	kg/Mg (Gesamtkompost = 0,25 Mg/Mg Abfall)	k.A.	0,16	0,676	0,84	Colón et al. 2012
offen	Gartenabfall	k.A.	kg/Mg (FM)	k.A.	0,05 -6,8	0,025 - 0,178	k.A.	Boldrin et al.2009
Home composting	Bio-Abfall	k.A.	kg/Mg; CO ₂ als kg CO ₂ -Äquivalent/Mg (FM)	100-239	0,4-4,2	0,30-0,55	k.A.	Andersen et al. 2010b

6.1.2.3 Kompostqualität

Zur Bestimmung der Kompostqualität und der Veränderung verschiedener wertgebender Parameter im Verlauf der Kompostierung wurden die Komposte dreimal beprobt, jeweils nach dem Aufsetzen, zum ersten Umsetzen und nach dem Absieben (Tag 1, 44 und 146) des Kompostes. Die Ergebnisse der Analysen sind in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Ergebnisse der Kompostanalysen

Parameter Kompostierung	Einheit	Beginn Tag 1		Tag 44		Ende Tag 146	
		mPK	oPK	mPK	oPK	mPK	oPK
Masse (frisch)	in kg	363,6	307,9	347,05	263,95	219,45	159,1
Masse (trocken)	in kg	170,8	144,1	133,8	126,4	118,6	89,3
Glühverlust (GV)	in % TM	68,7	66,6	51,2	36,8	31,7	27,4
Organische Substanz	in kg TM	117,4	95,9	68,5	46,6	47,1	34,7
C/N	-	40,6	29,8	23,4	15,9	27,2	13,3
Kohlenstoff (C)	in % TM			30,2	20,7	24,5	16,0
Stickstoff (N)	in % TM			1,3	1,3	0,9	1,2
Wassergehalt	in %	41,5	39,7	61,5	52,1	46,0	43,9
Max. Wasserhaltekapazität	in %	-	-	-	-	47,7	39,4
pH (CaCl ₂)	-	-	-	7,55	7,33	7,62	7,41
elektr. Leitif.	in µS/cm	-	-	3.645	3.215	4.280	4.390
Nmin Nitrat	in mg/l	-	-	< 4	< 4	820	880
Nmin Ammonium	in mg/l	-	-	70	90	0,8	4
Rohdichte feucht	in g/l	-	-	476,63	404,34	511,54	455,87
Rohdichte trocken	in g/l	-	-	183,75	193,69	276,34	255,34

Diese Größen GV, OS, C/N, Wassergehalt wurden für den Beginn der Kompostierung aufgrund der hohen Heterogenität des Ausgangskomposts gemittelt. Die Werte für den Glühverlust und den Wassergehalt sind für Tag 1 für beide Komposte ähnlich mit 68,7 % (mPK) bzw. 66,6 % (oPK) Glühverlust und 41,5 % (mPK) bzw. 39,7 % (oPK) Wassergehalt. Während der Glühverlust und damit der Anteil an organischer Substanz abnimmt, steigt der Wassergehalt am Tag 44 um bis zu 20 % stark an und geht bis zum Ende des Kompostversuches wieder zurück auf 46 (mPK) bzw. 44 % (oPK) leicht an.

Das C/N-Verhältnis unterscheidet sich bereits zu Beginn der Kompostierung aufgrund der Pflanzenkohlezugabe. Im Lauf der Kompostierung nimmt das Verhältnis im Kompost ohne Pflanzenkohle ab. Im Ansatz mit Pflanzenkohle kommt es durch einen unerwarteten und nicht nachvollziehbaren⁴ Stickstoffverlust zu einem Anstieg im C/N-Verhältnis. Die (feuchte) Rohdichte nimmt in beiden Komposten im Verlauf der Kompostierung zu und ist im

⁴ Ob der Stickstoff-Wert durch Probleme bei der Analytik aufgetreten ist, konnte aufgrund der coronabedingten Einschränkungen im Labor nicht mehr untersucht werden.

Pflanzenkohlekompost höher als im Kompost ohne Pflanzenkohle. Der pH-Wert nimmt von Tag 44 bis Tag 146 in beiden Komposten leicht zu und ist jeweils im Pflanzenkohlekompost aufgrund der PK um 0,2 pH höher. Die elektrische Leitfähigkeit und somit der Salzgehalt erhöht sich ebenfalls bei beiden Komposten im Zeitverlauf und ist im Kompost ohne Pflanzenkohle geringfügig höher. Das Verhältnis von Nitrat- und Ammoniumgehalt der Komposte hat sich im Verlauf der Kompostierung in beiden Komposten umgekehrt. Von Nitratwerten unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze hin zu sehr hohen Werten von 820 mg/l (mPK) bzw. 880 mg/l (oPK) und von relativ hohen Ammoniumwerten von 70 mg/l (mPK) bzw. 90 mg/l (oPK) erfolgte eine Reduzierung auf 0,8 mg/l (mPK) bzw. 4 mg/l (oPK). Auffällig hierbei ist, dass die Werte im Kompost ohne Pflanzenkohle i.d.R. etwas höher sind.

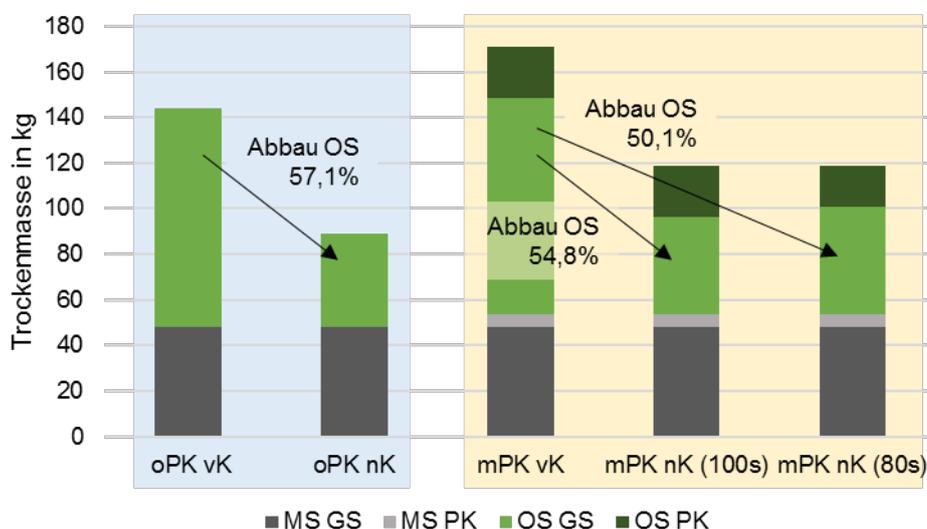


Abbildung 30: Abbau der organischen Substanz (OS) im Vergleich von Tag 1 und Tag 146 der Kompostansätze mit und ohne Pflanzenkohle (oPK: ohne Pflanzenkohle, mPK: mit Pflanzenkohle; vK: vor Kompostierung (Tag 1), nK: nach Kompostierung (Tag 146); MS: mineralische Sub Substanz, OS: organische Substanz; GS: Grünschnitt; 100s: PK zu 100% stabil, 80s: PK zu 80% stabil (20% der OS der PK werden während der Kompostierung umgesetzt); Pfeile und Prozentangaben beziehen sich auf den Umsatz von OS zwischen Tag 1 und 146)

Ein besonderes Augenmerk liegt auf dem Abbau der organischen Substanz in den Kompostansätzen, da ein interessanter Punkt der Wirkung von Pflanzenkohle die Stabilisierung von organischer Substanz während der Kompostierung ist. Der Vergleich zwischen beiden Ansätzen zeigt, dass bei Anwesenheit von PK ein etwas geringerer Abbau von Kohlenstoffverbindungen eintritt (Abbildung 30). Diese Bilanz bestätigt die Ergebnisse der CO₂ Messung, die ebenfalls einen etwas geringeren Umsatz im Ansatz mit PK detektierte.

In Tabelle 19 sind die Schwermetallgehalte der gesetzlich geregelten Parameter dargestellt. Bei den Schwermetallgehalten werden keine Grenzwerte der BioAbfV (2017) oder BGK (2018) überschritten.

Tabelle 19: Ergebnisse der Schwermetallanalyse, mit Grenzwerten nach BioAbfV (2017) und BGK (2018) für den Kompost (Tag 146)

	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	mg/kg						
Kompostgemisch ohne Pflanzenkohle (oPK)	0,8	46,4	43,7	23,0	36,7	30,8	202,4
Kompostgemisch mit Pflanzenkohle (mPK)	0,6	84,4	45,8	22,0	44,4	26,4	118,7
BioAbfV (20 t/ha)	1,5	k.A.	100	100	50	150	400
BGK (2018)	1,5	k.A.	100	k.A.	50	150	k.A.

Weitere Inhaltsstoffe sind in der Tabelle 20 aufgeführt. Diese Tabelle zeigt ebenfalls die Ergebnisse der Leachingversuche. Bei den Werten für die Kompostgemische von Tag 146 zeichnen sich für beide Komposte relativ ähnliche Werte ab. Der Pflanzenkohlekompost weist vergleichsweise etwas höhere Magnesiumwerte und Cobaltwerte auf. Im Kompost ohne Pflanzenkohle ist vergleichsweise mehr Schwefel und mehr Zink enthalten. Die eluierbaren Anteile liegen bei 8 von 14 Elementen unter 0,5 %. Die höchsten mobilisierbaren Anteile zeigt Kalium, Natrium und Schwefel mit 5 bis 10 % der anfänglichen Gesamtgehalte. Ein Einfluss von Pflanzenkohle ist für den Kompost am Tag 146 nicht deutlich nachweisbar (6 von 14 zeigen eine geringere und 6 von 14 zeigen eine höhere prozentuale Mobilisierbarkeit).

Tabelle 20: Ergebnisse der Gesamtgehalte, eluierbare Bestandteile und der mobilisierbaren Anteile für den Kompost am Tag 146

	Gesamtgehalte		Eluierbare Bestandteile		Mobilisierbarer Anteil	
	mg/kg		mg/l		% - Anteil	
	mPK	oPK	mPK	oPK	mPK	oPK
Cd	0,6	0,8	0,001	0,001	0,17	0,13
Co	84,4	46,4	0,002	0,003	0,00	0,01
Cr	45,8	43,7	0,005	0,004	0,01	0,01
Cu	22,0	23,0	0,09	0,11	0,42	0,46
K	9047	9946	624,8	662,2	6,91	6,66
Mg	3962	2714	27,4	28,8	0,69	1,06
Mo	1,9	2,5	0,023	0,016	1,21	0,64
Na	657	532	52,3	49,8	7,96	9,37
Ni	44,4	36,7	0,011	0,010	0,02	0,03
P	2016	2316	22,7	24,6	1,12	1,06
Pb	26,4	30,8	0,02	0,02	0,07	0,07
S	1524	1939	75,5	75,6	4,96	3,90
Se	2,8	1,0	0,005	0,004	0,18	0,40
Zn	118,7	202,4	0,39	0,49	0,33	0,24

6.2 Kompostiersversuche im Gutsgarten Hellersdorf

6.2.1 Vorversuche und Optimierung

Der Vorversuch startete mit dem Mischungsverhältnis von 1 Teil Holzhäckseln zu 1 Teil Gemüse-/Obstreste. Für eine Kompostmiete wurden vier Lieferungen an Gemüse-/Obstresten zusammengefasst. Eine Kompostmiete bestand somit aus ca. 28 m³ Gemüse-/Obstreste und 28 m³ Holzhäckseln. Dazu wurde ein Anteil an Pflanzenkohle von ca. 2,5 - 10 Vol.-% zugegeben. Die verwendeten Pflanzenkohlen aus unbehandeltem Holz wurde im Botanischen Garten Berlin hergestellt sowie durch die Fa. NovoCarbo und Fa. DU-Willkommen bereitgestellt. Die Zusammensetzung ist in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Ausgewählte physikalische und chemische Parameter der verwendeten Pflanzenkohlen (PK) im Vergleich mit den Grenzwerten des EBC (MW: Mittelwert; STABW: Standardabweichung)

Parameter	Einheit	Grenzwert EBC ¹ (premium)	PK - BG MW±STABW	PK – DuWillkom- men	PK – NoVo- Carbo
Kohlenstoff C	% TM		65,8±16,4	70,8	68,0
Stickstoff N	% TM		0,78±0,19	0,67	1,16
H/C-Verhältnis	-	<0,7	0,11±0,08	0,337	0,368
O/C-Verhältnis	-	<0,4	0,06±0,05	0,04	0,05
Flüchtige Bestandteile	% TM		5,3±2,1	13,1	14,8
16 EPA-PAK2	mg/kg TM	4	1,15±1,07	2,9	4,0
6 PCB	ng/kg TM	<0,2	0,001±0,0007	0,004	0,003
7 PCB	ng/kg TM	<0,2	0,001±0,0007	0,004	0,004
Brennwert	kJ/kg		21.000±6.669	26.500	25.900
Heizwert	kJ/kg		19.422±5.885	26.100	25.400

¹European Biochar Certificate (2012): Version 9.0E of 1stJune2020

²4h-Extraktion Toluol

In regelmäßigen Abständen wurden die Temperaturen, Geruch und Feuchte dokumentiert. Die Temperaturentwicklung in den ersten Mieten 1 – 4 ist in Tabelle 22 dargestellt. Die dokumentierten Werte zeigen deutlich langanhaltende hohe Temperaturen bis 80°C.

Tabelle 22: Temperaturentwicklung in den ersten Mieten 1 - 4. (Zeitraum 13.02. bis 28.06.2018)

Datum	Miete 1		Miete 2		Miete 3		Miete 4	
	Lieferung	Temp °C	Lieferung	Temp °C	Lieferung	Temp in °C	Lieferung	Temp °C
13. Feb	1	kalt						
27. Feb	2	52						
06. Mrz	3	66						
13. Mrz	4	57-62						
20. Mrz		62	5	kalt				
27. Mrz		60-66	6	40-45				
03. Apr		59-74	7	52-59				
10. Apr		68-76	8	62-69				
17. Apr		72-76		66-72	9	kalt		
24. Apr		72-74		66-78	10	41-54		
30. Apr		72-74		72-80	11	48-72		
08. Mai		72-76		76-77	12	64-74		
15. Mai		68-76		74-74		72-78	13	kalt
22. Mai		74-78		76-76		76-80	14	50-54
29. Mai		70-73		76-76		72-78	15	60-74
07. Jun		72-74		72-78		79-80	16	61-76
14. Jun		72-75		74-78		79-79		68-72
21. Jun		72-72		76-78		72-78		70-78
28. Jun		Nachrotte		76-78		72-76		60-70

Dies spricht auf der einen Seite für eine gute Hygienisierung des Kompostes. Auf der anderen Seite sind so hohe Temperaturen ungünstig, da bei den meisten Mikroorganismen eine Eiweißdenaturierung bei über 75 °C eintritt, und die Aktivität stark eingeschränkt ist, sowie chemische Reaktionen einsetzen, die die Kompostqualität vermindern.

Der erste Kompost wurde am 28.06.2018 nach viermonatiger Kompostierung auf 40 mm gesiebt und zur Nachrotte gelagert. Der Temperaturverlauf wurde dabei weiter dokumentiert und ausgewertet. Die abgesiebten Komposte wurde beprobt und im Labor analysiert.

Die Ergebnisse der physikalisch-chemischen Untersuchungen sind in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Physikalische und chemische Parameter der Komposte der Optimierungphase, HDK 1 und 2* (WG: Wassergehalt, SG: Salzgehalt, RD: Rohdichte, OS: organische Substanz, C: Kohlenstoff, N: Stickstoff, FM: Frischmasse)

Proben- bezeichnung	WG %	pH	SG g/l	RD (FM) g/l	OS %	C %	N %	
HDK <10mm	1	62,3	9,2	1,8	703,4	58,5	39,6	1,1
	2	60,9	9,1	1,8	564,3	59,9	34,1	1,3

* Kompostuntersuchung an Material < 10 mm

Beide, in der Optimierungsphase hergestellten Komposte, zeigen vergleichbare Werte. Die unterschiedliche Mischung (Kompost 1: Gemüsereste 1 Teil, Holzhäcksel 3 Teile, 10% PK; Kompost 2: Gemüsereste 1 Teil, Holzhäcksel 1,5 Teile, 2,5 % PK) haben vor allem Einfluss auf die Parameter Rohdichte (RD), Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N). Die Erhöhung des Gemüseanteils spiegelt sich in einer geringeren RD und eines höheren N-Gehaltes wider. Die Senkung der PK-Zugabe im Kompost 2 reduziert den C-Gehalt des Kompostes.

Ein Problem für die Kompostierung im Gut Hellersdorf ergibt sich aus der Länge der Intensivrotte. Wie in Abbildung 31 ersichtlich, ist die Zeit, die für die Intensivrotte (Temperaturen über 60°C) benötigt wird, wesentlich länger als in der Literatur beschrieben. Die in den Versuchen ermittelten 150 Tage sind fast dreimal so lang wie in der gelenkten Grün-schnittkompostierung.

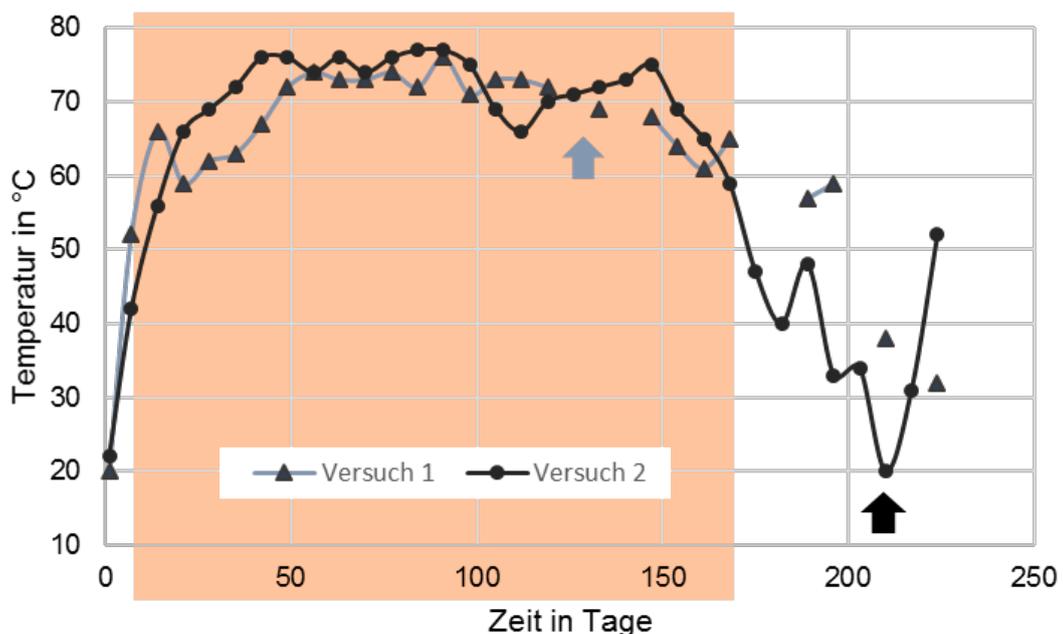


Abbildung 31: Temperaturverlauf der ersten beiden Kompostversuche. Die Pfeile markieren das Absieben des Kompostes und der Beginn der Nachrotte. Orange unterlegt ist die Dauer der Intensivrotte

Ursache ist die Zusammensetzung aus kohlenstoffreichen Hackschnitzel und stickstoffreichen Gemüseresten. Die lange Kompostierdauer führt zu einem Platzproblem, da die Kompostmieten zu lange den verfügbaren Platz beanspruchen.

In Tabelle 24 sind die Ergebnisse der Schwermetallanalysen im Vergleich zu den Schwermetallgrenzwerten geltender Verordnungen aufgeführt.

Tabelle 24: Schwermetallgehalte (MW±STABW) der Komposte mit Pflanzenkohle im Vergleich zu den Schwermetallanforderungen der geltenden Vorgaben der BGK und BBodSchV (Bodenart Lehm/Schluff)

Schadstoffe	Pb	Cd	Cu	Ni	Zn*	Cr*
	[mg/kg TM]					
Pflanzenkohle-Kompost 1	13,42±0,83	0,17±0,01	23,07±0,93	11,17±0,86	64,66±3,05	8,45±1,51
Pflanzenkohle-Kompost 2	11,14±8,3	0,27±0,01	27,34±3,89	12,56±5,59	72,65±0,90	12,10±2,51
Grenzwert BGK*	150	1,5	k. A.	50	k. A.	100
Vorsorgewert BBodSchV	70	1	40	50	150	60

*Qualitätskriterien der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. für Substratkompost

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die bisher hergestellten Komposte frei von schädlichen Schwermetallbelastungen sind.

Für den fertigen Kompost wurde nach erfolgter Nachrotte eine weitere Beprobung durchgeführt und verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse (Tabelle 25) zeigen die Qualität des erzeugten Kompostes im Vergleich zu den Qualitätskriterien der Güterrichtlinie der BGK e.V.

Tabelle 25: Ergebnisse Kompost (Auszug Qualitätskriterien und Güterichtlinien, BGK)

Qualitätsmerkmal	Qualitätsanforderung	Charge 1		
Hygiene	Nachweis der seuchenhygienischen Wirksamkeit des Behandlungsverfahrens	erfüllt		
	Salmonellen nicht nachweisbar.	erfüllt		
Fremdstoffe	Maximal 0,5 Gew.-% i. d. TS auslesbare Fremdstoffe über 2 mm Durchmesser.	erfüllt		
Organische Substanz	Mindestens 15 Gew.-% i. d. TS, gemessen als Glühverlust	erfüllt	55 - 63 Gew.-%	
Schwermetallgehalte	Richtwerte (mg/kg TS)			
	Blei 150	erfüllt	16	
	Cadmium 1,5	erfüllt	0,69	
	Chrom 100	erfüllt	11	
	Quecksilber 1,0	erfüllt	< 0,07	
	Nickel 50	erfüllt	25	
	Kupfer		46	
Zink		112		
Angaben zur Deklaration	Fertigkompost (Körnung),	20 mm		
	Hersteller,	Prinzessinnengartenbau		
	Rohdichte (Volumengewicht),	422 - 440 g/l FM (bei 14 % Wasser)		
	pH-Wert,	7,5 - 7,6		
	Salzgehalt,	1,7 - 1,9 g/l FM		
	Pflanzennährstoffe gesamt (g/kg TS):			
	Nitrat	13,5 g/kg		
	P ₂ O ₅	4,85 g/kg		
	K ₂ O	11,55 g/kg		
	MgO	4,98 g/kg		
	Schwefel	1,6 g/kg		
	Pflanzennährstoffe löslich (mg/l FM):			
	N _{min}	2,99 - 3,12		
	P ₂ O ₅	324 - 393		
	K ₂ O	1559 - 1826		
	Mikronährstoffe (mg/kg TS)*:			
	B	23		
	Cu	46		
	Zn	112		
Co	26			
Se	1			
basisch wirksame Stoffe (als CaO),	1,7 - 3,1 Gew.-%			

* nach Düngemittelverordnung https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/anlage_2.html

6.2.2 Kompostversuch zur Bestimmung der Wirkung von PK auf THG und Kompostparameter in der Großkompostierung mit Gemüse-/Obstabfällen

In der Großkompostierung wurde der Effekt von Pflanzenkohle als Zuschlagstoff zur Kompostierung bereits öfter untersucht, dabei variieren jedoch die einzelnen Bestandteile der Kompostmiete stark. In Hellersdorf war das Ziel, zu untersuchen, welche Emissionen die Mischung aus Gemüse-/Obstreste und Hackschnitzel verursachen und welchen Einfluss die Zugabe von Pflanzenkohle auf diese THG-Emissionen hat.

Da der Versuch auf Grund der Baumaßnahmen im Gut Hellersdorf zu einem abrupten Ende kam, können im Folgenden nur die Ergebnisse bis Komposttag 85 dargestellt werden. Eine Beprobung der Komposte konnte nicht mehr durchgeführt werden, so dass auch keine Feststoffuntersuchung der Komposte erfolgte.

6.2.2.1 Zusammensetzung des Kompostansatzes

Am 28.03.2019 wurde der Vergleichsversuch zur Bestimmung der Wirkung von PK auf THG-Emissionen und Kompostparameter gestartet. Dazu wurde im Vorfeld mit der Tafel abgesprochen, die Zugabe an PK für 14 Tage auszusetzen. Die Gemüse- und Obstreste wurden vor Ort mit Holzhackschnitzel gemischt, geteilt und ein Teil mit Pflanzenkohle versetzt und erneut gemischt. Das Mietenvolumen betrug nach vermengen der einzelnen Bestandteile ca. 3 m³. Die Komposte waren durch die hohen Anteile an Gemüseresten sehr feucht. Die einzelnen Materialien wurden beprobt und anschließend im Labor analysiert (Tabelle 26). Die Komposte wurden in unregelmäßigen Abständen gewendet, was auf die Verfügbarkeit eines Radladers zurückzuführen war.

Tabelle 26: Schadstoffgehalte der beprobten Gemüse- und Obstreste und Holzhäcksel im Vergleich zu den Schwermetallanforderungen der geltenden Vorgaben der DüMV und BioAbfV

Schadstoffe	Pb	Cd	Cu	Ni	Zn	Cr
[mg/kg TM] Min – Max-Werte						
Gemüse/Obst 1	6,3 – 6,7	0,3 – 0,4	21,1 – 21,5	2,1 – 3,5	41,8 – 47,4	2,5 – 4,0
Gemüse/Obst 2	8,4 – 9,0	0,3	30,9 – 39,5	3,9 – 7,3	56,6 – 59,3	4,1 – 4,3
Gemüse/Obst 3	0	0	13,5	40,5	24,1	31,4
Holzhäcksel	0	0	11,8	30,0	42,5	31,6
Grenzwert	150/	1,5/	100/	50/	400/	100/
BioAbfV 20t / 30t	100	1,0	70	35	300	70

Die Schwermetallgehalte beprobter Gemüse- und Obstreste und Holzhäcksels, die als Inputmaterial der Kompostierung in Hellersdorf dienen, zeigen eine gute Qualität und liegen ebenfalls unter den geltenden Vorgaben für Schwermetallbelastungen der BioAbfV (2017).

6.2.2.2 Ergebnisse Temperatur und Gasentwicklung

Die Messungen der THG erfolgte wie in Kapitel 5.3 beschrieben mittels Hauben- und Lanzenmessung. Die Lanzenmessung erfolgte an drei verschiedenen Punkten jeweils 20 cm unter der Mietenoberfläche. Für die Auswertung wurden pro Messpunkt 12 Einzelmessungen erfasst. In Abbildung 32 ist der Verlauf der Kompostierung anhand der Temperatur und in Abbildung 33 sind der Verlauf der Emissionen von CO₂-, CH₄- und NH₃ sowie von H₂S dargestellt.

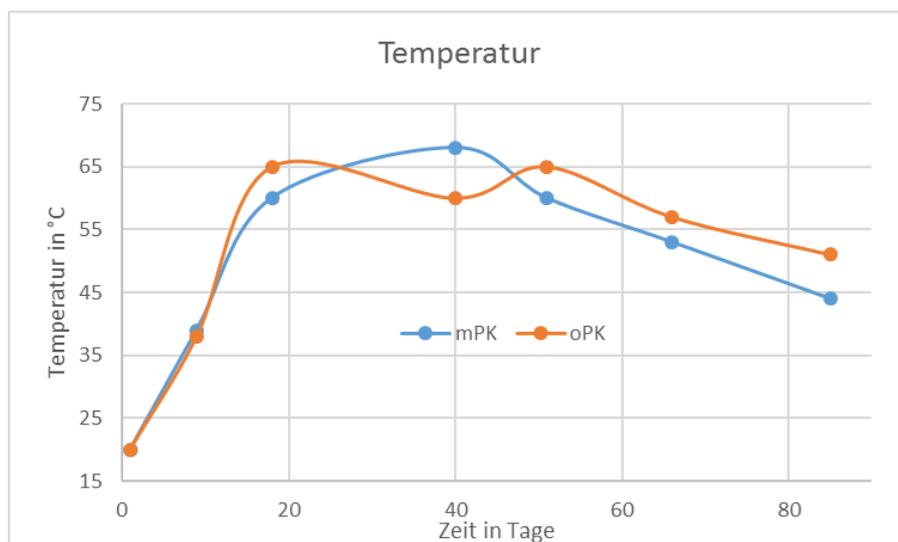


Abbildung 32: Temperaturverlauf der beiden Kompostversuche mit und ohne Pflanzenkohle

Die Temperatur zeigt eine gute Hygienisierung des Materials an. Zum Zeitpunkt des ungeplanten Abbruchs des Versuches⁵ befanden sich die Komposte am Ende der Intensivrotte. Unterschiede in der Temperaturentwicklung zwischen mit PK und ohne PK sind im Verlauf leicht ausgeprägt. Die CO₂ Konzentrationen im inneren des Kompostes (Lanze) ist im Ansatz ohne PK am höchsten. Durch höhere CO₂ Konzentrationen, die auf einen Sauerstoffmangel hindeuten, kommt es auch zu höheren Methankonzentrationen im Kompost ohne PK. Vergleicht man diese Gaskonzentrationen im Kompost mit den gemessenen Emissionen (Haube), ist bei CO₂ eine gute Übereinstimmung zu erkennen.

⁵ Der Versuch musste abgebrochen werden, da die einsetzende Entwicklung auf dem Standort, d. h. die bauliche Umgestaltung, diese Flächen zu Lagerzwecken benötigte.

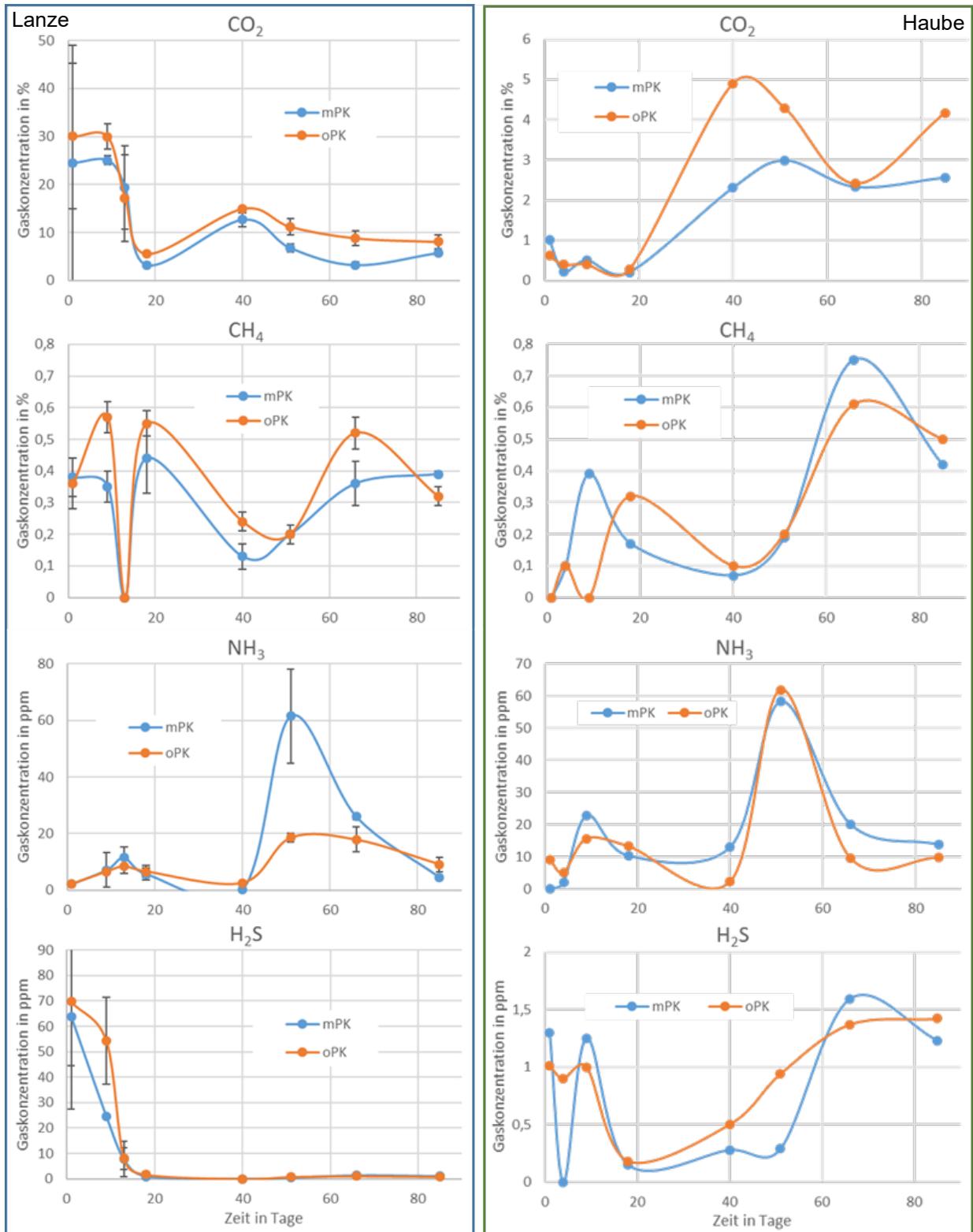


Abbildung 33: Verläufe von Kohlendioxid, Methan, Ammoniak und Schwefelwasserstoff für die Lanzenmessung (links, blauer Rahmen) und für die Messung mit einer Haube (rechts, grüner Rahmen)

Bei Methan wurden durch die Haubenmessung am Anfang und Ende gegenläufige Ergebnisse im Vergleich zur Lanzenmessung detektiert. Die gemessenen Werte für Methan sind jedoch sehr gering, was am hohen Anteil von Strukturmaterial und damit an einer guten Belüftung der Komposte liegen kann.

Bei der Entwicklung von NH_3 zeigt sich, mit Ausnahme von Tag 51, ebenfalls ein ähnlicher Verlauf der Lanzen- und Haubenmessung. Beim Verlauf der NH_3 -Emissionen zeigt die Variante mit PK eine leicht höhere Freisetzung, was wahrscheinlich durch den hohen pH-Wert der PK verursacht wurde. Bei Schwefelwasserstoff gibt es nur zu Beginn im Kompost höhere Konzentrationen, welche im Ansatz mit PK niedriger als im Ansatz ohne PK ausfallen. Die insgesamt niedrigen Messwerte sind auf die gute Belüftung des Kompostes und auf das geringe Mietenvolumen zurückzuführen.

6.3 Fazit - Wirkung von Pflanzenkohle in der Kompostierung

In der Studie am UBB wurde festgestellt, dass Pflanzenkohle die Bedingungen für die Kompostierung hinsichtlich der Minderung von Treibhausgasen optimiert. In der Studie führte Pflanzenkohle zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 32 % $\text{CO}_{2\text{eq}}$ im Vergleich zum Kontrollansatz ohne Pflanzenkohle. Die geringeren Emissionen liegen wahrscheinlich an einer besseren Auflockerung des Inputmaterials (Rasenschnitt und Gemüse-/Obstabfälle) und damit an einer verbesserten Belüftung des Kompostmaterials. Beobachtungen an verklebten Rasenmatten im Kontrollansatz legen dies nahe. Bezieht man diese Reduktionen auf die Emissionssituation der Berliner Eigenkompostierung könnten dadurch die Belastung um 37 kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ pro Tonne Bio- und Grünabfall gesenkt werden. Für die gesamten im Berliner Raum eigenkompostierten Biomassen könnte das eine Einsparung von ca. 3.700 Tonnen $\text{CO}_{2\text{eq}}$ pro Jahr bedeuten.

Für die Kompostqualität ließen sich ebenfalls positive Effekte beobachten. So zum Beispiel geringere Auswaschungsraten von Inhaltstoffen, sowie ein höherer Anteil organischer Substanz, der im Kompost erhalten bleibt. Die bessere Wasserhaltekapazität sowie Belüftung des Komposts mit Pflanzenkohle kann durchaus auf die Pflanzenkohle zurückgeführt werden. Der Kompost war vergleichsweise etwas feuchter und die geringeren Methanwerte deuten zudem auf eine bessere Durchlüftung hin. Die von Blackwell et al. (2009), Kammann et al. (2016) und Zhang et al. (2016) beschriebenen höheren Temperaturen unter Zugabe von Pflanzenkohle sowie eine verkürzte Rottephase konnten im Versuch am UBB und in Hellersdorf nicht bzw. nur teilweise beobachtet werden. Der vergleichsweise leicht höhere pH-Wert sowie der geringere Salzgehalt des Pflanzenkohlekomposts kann der Wirkung der Pflanzenkohle zugeschrieben werden, da sich hier zum einen ihre basische Wirkung aber auch eine erhöhte Adsorptionsfähigkeit für Nährsalze zeigt. Im Leachingversuch zeigte sich ein uneinheitliches Bild.

Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen viele Aussagen aus anderen Studien über die positiven Eigenschaften der Pflanzenkohle während der Kompostierung (Tabelle 27). Die Zugabe von Pflanzenkohle spielt eine wichtige Rolle im Kompostprozess und der Verbesserung der Kompostqualität. Die poröse Struktur von Pflanzenkohle kann die Dichte verringern und die Belüftung des Kompostes verbessern. Mit der Zugabe von Pflanzenkohle werden mehr Nährstoffe im Kompost zurückgehalten und weniger Treibhausgase emittiert.

Tabelle 27: Zusammenfassende Übersicht der Wirkung von Pflanzenkohle im Kompost

Parameter	Wirkung	Quelle
Temperatur	i.d.R. höhere Temperaturen während der Kompostierung	Zhang et al. 2016, Blackwell et al. 2009, Kammann et al. 2016
Feuchtigkeit	i.d.R. höhere Feuchtigkeit im Kompost und Erhöhung der maximalen Wasserhaltekapazität	Kammann et al. 2016 Awasthi et al. 2016
pH	i.d.R. Zunahme pH-Wert	Czekala et al. 2016 Zhang et al. 2016
Organische Substanz	i.d.R. vergleichsweise höherer Anteil an organischer Substanz im Kompost	Vandecasteele et al. 2016 (in: Godlewska et al. 2017), Wagner & Schatten 2016, Wagner et al. 2020
Nährstoffgehalt	i.d.R. Reduzierung von Nährstoffverlusten via Auswaschung oder Ausgasung	Kammann et al. 2016, Hua et al. 2008, Hagemann et al. 2018, Awasthi et al. 2016
Schadstoffe (z.B. Schwermetalle)	durch hohe Sorptionskraft der Pflanzenkohle, i.d.R. Immobilisierung von Schadstoffen	Sanchez-Monedero et al. 2018, Zhou et al. 2018, Kammann et al. 2016, Awasthi et al. 2016
Treibhausgasemissionen	i.d.R. deutliche Reduzierung der bei der Kompostierung entstehenden Treibhausgasemissionen (v.a. CH ₄ und N ₂ O)	Wagner et al. 2020, Hagemann et al. 2018, Awasthi et al. 2016, He et al. 2017, Wang et al. 2018

6.4 Wirkung und Einfluss von Pflanzenkohlekompost auf Böden und Pflanzen

6.4.1 Böden

Der **pH-Wert** lag im Juni und Oktober in den 4 Hochbeeten und 2 Untersuchungsflächen am UBB im neutralen bis schwach alkalischen Bereich (Tabelle 28). Im Hochbeet HD_PK10 ist der pH-Wert mit 7,45 im Vergleich zu den anderen 3 Hochbeeten am höchsten. Wie in Tabelle 10 (Kap. 5.4.2) dargestellt lag der Ausgangs pH-Wert in diesem Substrat vor der Einmischung mit 8,14 auch am höchsten. Marginale Unterschiede zwischen den Hochbeeten sind zum Ende der Vegetationsperiode und in den Gartenbeeten sowohl zu Beginn als auch am Ende der Versuchsdurchführung.

Die **Salzgehalte** liegen kurz nach Etablierung der Hochbeete zwischen 0,67 und 0,86 g/l und verringern sich im Laufe der Vegetationszeit im Hochbeet ohne Pflanzenkohle (HB_BG_K) um mehr als die Hälfte, in den anderen Hochbeeten ist die Reduzierung geringer. Im Gartenboden am UBB sind die Salzgehalte in der Variante mit PK geringfügig höher (0,55 g/l) im Vergleich zur Variante ohne PK (0,45g/l). Am Ende der Vegetationszeit sind die Salzgehalte in den Hochbeeten und Gartenbeeten niedriger und zwischen den Varianten keine Unterschiede nachweisbar.

Tabelle 28: pH-Wert und Salzgehalt [g/l FS] in den Oberböden der Hochbeete (0-15 cm) und Gartenbeeten (0-20 cm) an zwei verschiedenen Terminen

Variante	pH-Wert [-]		Salzgehalt [g/l FS]	
	06/2019	10/2019	06/2019	10/2019
HB_BG K	7,13	6,95	0,84	0,36
HB_BG PK10	7,25	7,17	0,67	0,39
HB_UBB PK10	7,15	7,16	0,76	0,41
HB_HD PK10	7,45	7,07	0,86	0,45
G_UBB_mPK	7,40 (± 0,05)	7,15 (± 0,06)	0,55 (± 0,06)	0,25 (± 0,04)
G_UBB_oPK	7,32 (± 0,18)	7,20 (± 0,02)	0,49 (± 0,04)	0,23 (± 0,01)

Die **Rohdichte** (Tabelle 29) der Trockensubstanz liegt in den vier Hochbeeten zu Beginn zwischen 603 und 715 g/l und ist in der Variante mit Kompost aus dem Botanischen Garten am höchsten und verändert sich während der Vegetationsperiode nicht. In den anderen Varianten erhöht sich die Rohdichte und ist in der HB-BG_PK10 Variante mit 825 g/l am höchsten.

In den Gartenbeeten am UBB weist die Variante mPK zu beiden Terminen eine höhere Rohdichte auf im Vergleich zur Variante oPK.

Zwischen 51 und 56 Vol. % liegt die **maximale Wasserhaltekapazität** zu Beginn in den Hochbeeten und verringert sich bis zum Ende der Vegetationsperiode geringfügig mit Ausnahme der HB_UBB_PK10 Variante. In den Gartenbeeten ist die Wasserhaltekapazität mit 46 Vol.-% in beiden Varianten zu Beginn schon niedriger im Vergleich zu den Hochbeeten und verringert sich um 6 bzw. 9 Vol.-% bis zum Ende der Vegetationszeit.

Tabelle 29: Rohdichte und maximale Wasserhaltekapazität der Hochbeete und am UBB zu zwei verschiedenen Terminen

Variante	Rohdichte [g/l TS]		WHK _{max} [Vol. %]	
	06/2019	10/2019	06/2019	10/2019
HB_BG K	715	710	56,1	51,5
HB_BG PK10	683	825	53,6	47,7
HB_UBB PK10	621	694	51,5	37,9
HB_HD PK10	603	699	51,7	49,4
G_UBB_mPK	1037(± 15)	1027 (± 5)	46,3 (± 1,4)	37,3 (± 2,3)
G_UBB_oPK	982 (± 11)	960 (± 57)	45,6 (± 0,7)	39,7 (± 2,1)

Kohlenstoff (C_t und C_{org}) und Stickstoff (N_t)

Durch das Vermischen der Gartenerde mit den verschiedenen Substraten wurde in den Hochbeeten in Hellersdorf ein unterschiedliches Ausgangsniveau des Gesamtkohlenstoffes (C_t: 6,08 – 7,47 %) hergestellt. Zu Beginn liegt in der HD_PK10 Variante der höchste C_t-Gehalt und die niedrigsten in der BG_K und UBB_PK10 Variante. Im Oktober weisen alle Varianten mit Ausnahme der UBB_PK10 niedrigere C_t-Gehalte auf. Die organischen Kohlenstoffgehalte (C_{org}) lagen in den Hochbeeten im Juni 2019 zwischen 5,8 und 7,2 % und im Oktober zwischen 5,2 und 6,3 %. Sie sind am höchsten in der Variante BG_PK10 und HD_PK10. Wie in Tabelle 10 (Kap. 5.4.2) beschrieben hatten diese beiden Pflanzenkohlekomposte auch die höchsten Gehalte an OS und C_t. Keine Unterschiede waren im C_t-Gehalt (2,5 %) und im C_{org}-Gehalt (2,3 %) am UBB in den beiden Varianten festzustellen. Die C_t- und C_{org}-Gehalte waren im Juni höher im Vergleich zum Oktober.

Die Gesamtstickstoffgehalte (N_t) lagen in den Hochbeeten zu Beginn zwischen 0,33 % und 0,41 % und am Ende zwischen 0,26 % bis 0,34 %. Die niedrigen N_t-Gehalte am UBB im Juni (< 0,14%) verringerten sich bis Oktober nochmals auf weniger als 0,06 %.

Das C/N- Verhältnis als ein Maß für die Stickstoffverfügbarkeit für Pflanzen und Mikroorganismen lag bei der ersten Beprobung in den Hochbeeten und am UBB zwischen 16,8 und 23,2 und kann mit Ausnahme der Probe UBB_mPK als eng bezeichnet werden. Im Herbst war im Hochbeet mit PK aus dem Botanischen Garten das C/N-Verhältnis etwas weiter (22,6) und am UBB haben sich die Bedingungen für die Umsetzungsprozesse mit einem weiten CN-Verhältnis von 37 verschlechtert.

Der berechnete Humusgehalt liegt in den Hochbeeten bei 10 Masse-%. Nach Ad Hoc (2005) gehören die mit den Substraten beaufschlagten obersten Schichten in die Klasse 8 bis <15 % (h5) und werden als sehr stark humos bezeichnet. Am UBB handelt es sich um mittel humose Oberböden (2 bis <4 %, h3).

Tabelle 30: C_t-, C_{org}- und N_t-Gehalte sowie C/N- Verhältnisse in den Hochbeeten und Gartenbeeten zu verschiedenen Terminen (Hellersdorf: 13.06.19/10.10.19; UBB 27.06.19/10.10.19)

Termin	C _t [%]		C _{org} [%]		N _t [%]		C/N		Humusgehalt M.-%
	06/19	10/19	06/19	10/19	06/19	10/19	06/19	10/19	10/19
HB_BG K	6,14	5,43	5,86	5,18	0,36	0,31	16,1	16,7	8,9
HB_BG PK10	7,12	6,13	6,78	5,94	0,36	0,26	18,9	22,6	10,2
HB_UBB PK10	6,08	6,01	5,81	5,75	0,33	0,33	17,6	17,2	9,9
HB_HD PK10	7,47	6,53	7,21	6,27	0,41	0,34	17,8	18,5	10,8
G_UBB mPK	2,70	2,55	2,53	2,35	0,12	0,06	21,8	37,0	4,0
	±0,2	±0,08	±0,25	±0,05	±0,02	±0,01			-
G_UBB oPK	2,68	2,49	2,52	2,34	0,14	0,06	17,7	37,8	4,0
	±0,1	±0,19	±0,07	±0,21	±0,04	±0,02			-

In Tabelle 31 sind die **Schwermetallgehalte** in nach Ausbringung der Substrate sowie die Grenzwerte nach gesetzlichen Vorgaben (BBodSchV, 2012) in Abhängigkeit der Bodenart dargestellt. Bei der Bodenart in Hellersdorf handelt es sich nach Geländeansprache (AD-HOC-AG Boden, 2005) um schluffig sandige Lehme und am UBB wie in Tabelle 5 (Kap. 5.4.2) beschrieben um Sande. Die Schwermetallgehalte in den Hochbeeten (0-15 cm Tiefe) liegen unterhalb der Grenzwerte und in den Gartenbeeten (0-20 cm Tief) unabhängig von der Variante teilweise darüber. Nach SenStadtUm (1992) liegen in Berliner Kleingärten die durchschnittlichen Pb-Gehalte bei 228 mg/kg Boden und die Cd-Gehalte bei 1,1 mg/kg Boden. Zu den anderen Schwermetallen sind keine Daten angegeben.

Tabelle 31: Schwermetallgehalte (As, Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Cr) der Oberböden in den Hochbeeten in Hellersdorf und am UBB

Variante	Schwermetall						
	As	Pb	Cd	Cu	Ni	Zn	Cr
	[mg/kg TM]						
HB_BG K	3	31	0,27	20	29	85	36
HB_BG PK10	3	66	0,28	20	29	91	36
HB_UBB PK10	3	36	0,59	19	30	97	35
HB_HD PK10	3	29	0,35	19	29	93	35
G_UBB mPK	3	40	0,86	20	28	98	36
	±0,20	±2,3	±0,28	±3,9	±0,4	±25	±2
G_UBB oPK	3	37	0,59	18	29	92	36
	±0,14	±5,98	±0,18	±0,9	±0,35	±16,7	±1,36
Vorsorgewert BBodSchV (Lehm/Schluff)	k.A.	70	1,0	40,0	50	150	60,0
Vorsorgewert BBodSchV (Sand)	k.A.	40,0	0,4	20,0	15,0	60,0	30,0

Pflanzennährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K)

Stickstoff ist ein zentraler Bestandteil von Eiweiß und Chlorophyll in Pflanzen und wird für das Wachstum benötigt. Die Hauptquellen anorganischen Stickstoffs für höhere Pflanzen sind Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) welches die Pflanzen über die Wurzeln aufnehmen (Marschner 1986). Der mineralisierbare Stickstoffs (N_{\min}) im Boden ist die Summe der Anteile von Nitrat und Ammonium.

Tabelle 32: N_{\min} -Gehalte im Juni und Oktober 2019 in den Hochbeeten

Variante	N_{\min} [mg/kg]	
	13.06.2019	10.10.2019
HB_BG K	25	9
HB_BG PK10	27	6
HB_UBB PK10	25	24
HB_HD PK10	20	13

Die N_{\min} -Gehalte (Tabelle 32) lagen am 13.06.2020 in allen vier Hochbeeten mit 20 bis 27 mg/kg auf einem gleichen Niveau, hingegen im Herbst mit Gehalten zwischen 6 und 24 mg/kg unterschiedlich hoch. Am höchsten sind sie in der Variante HB_UBB_PK10 (24 mg/kg) und am niedrigsten in der HB_BG_PK10 (6 mg/kg). In Abbildung 34 sind die Nitrat- und Ammoniumanteile am N_{\min} dargestellt. In den 4 Hochbeeten liegen die Nitratgehalte am 13.06.19 zwischen 5 und 20 mg/kg und sind in der Variante HB_HD_PK10 (höchste N_t Ausgangsgehalte, niedrigste N_{\min} -Ausgangsgehalte (vgl. Tabelle 10) am niedrigsten. Mit weniger als 5 mg/kg sind im Herbst die Nitratgehalte mit Ausnahme der Variante HB_UBB_PK10 als niedrig einzustufen. Im Sommer bedeutet ein hohes Nitratangebot ein niedriges Ammoniumangebot.

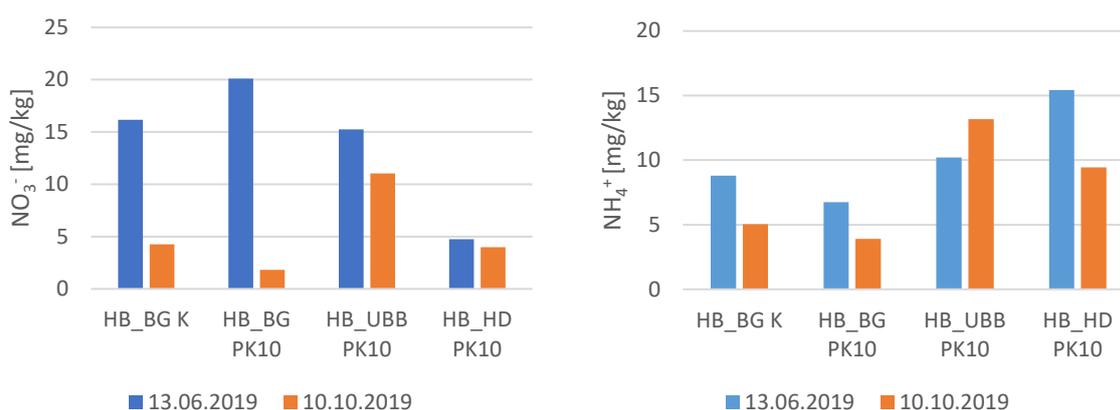


Abbildung 34: NO_3^- - und NH_4^+ - Gehalte [mg/kg] in den Hochbeeten am 13.06. und 10.10.2019

In den Gartenbeeten ist der N_{\min} im Juni (< 8 mg/kg) und im Herbst (< 6 mg/kg) in beiden Varianten niedrig. Das Nitratangebot (Tabelle 33) ist im Sommer in der Variante oPK etwas höher im Vergleich zur Variante mPK. Die NH_4^- -Gehalte sind in der mPK Variante unabhängig vom Termin höher.

Tabelle 33: Nitrat-N und Ammoniumgehalte [mg/kg] in den Oberböden (0-20 cm Tiefe) der Gartenbeete am 27.06 und am 10.10.19

Variante	NO ₃ -N [mg/kg]		NH ₄ -N [mg/kg]	
	27.06.2019	10.10.2019	27.06.2019	10.10.2019
G_UBB mPK	3,0 (± 0,5)	1,9 (± 0,3)	4,4 (± 0,4)	4,0 (± 0,4)
G_UBB oPK	5,8 (± 3,8)	1,6 (± 0,3)	1,9 (± 0,2)	2,0 (± 0,3)

Über den Zusammenhang von Pflanzenkohle und der Veränderung der Stickstoffdynamik in Böden sowie den Perspektiven mit Pflanzenkohle langsam freisetzende Düngemittel zu entwickeln berichten Clough et al (2013). Die Meta-Analyse von Borchard et al. (2019) zeigt, dass die Anwendung von Pflanzenkohle die N₂O Emissionen und NO₃⁻ Auswaschung im Acker- und Gartenbau reduziert, jedoch keinen Einfluss auf die Verluste im Grünlandanbau und mehrjährigen Pflanzenanbau hat. Wie in der mitkompostierten Pflanzenkohle im Vergleich zu nicht kompostierter Pflanzenkohle Nitrat festgehalten werden kann, und dadurch gegen Auswaschung geschützt ist, und als langsam freisetzender Dünger zur Verfügung steht, berichten Kammann et al. (2015). Über die Beeinflussung der Sorption von Ammonium und Nitrat durch unterschiedlichen pH-Wert der Pflanzenkohlen berichten Fidel et al. (2018).

Kalium und Phosphor

Neben Stickstoff sind auch Kalium und Phosphor primäre essentielle Nährstoffe für die Pflanzen. Kalium ist für die Regulierung des Wasserhaushalts der Pflanzen über den Turgordruck verantwortlich und Phosphor für die Energiegewinnung.

Die pflanzenverfügbaren Kaliumgehalte (K_{CAL}) in den vier Hochbeeten (Abbildung 35) unterscheiden sich zum ersten Termin stark und liegen zwischen 800 und 1350 mg /kg. Die höchsten K_{CAL}-Gehalte sind in der Variante mit Pflanzenkohlekompost aus Hellersdorf (HB_HD_PK10), in diesem Ausgangssubstrat sind die höchsten Kaliumgesamt- und K_{CAL}-Gehalte (vgl. Tabelle 10). Mit 1100 mg/kg sind in der HB_BG_K Variante hohe pflanzenverfügbare Gehalte obwohl in diesem Ausgangssubstrat die niedrigsten Gesamtgehalte und geringere K_{CAL} – Gehalte sind im Vergleich zur HB_UBB PK Variante. Im Herbst sind wie im Sommer die K_{CAL}- Gehalte mit 800 mg/kg in der HB_HD_PK10 am höchsten und in den anderen drei Varianten mit 600 mg/kg auf einem vergleichbaren Niveau. In den Oberböden am UBB (andere Skala) sind in der Variante mit Pflanzenkohlekompost zu beiden Terminen mit 150 bis 200 mg/kg die K_{CAL}-Gehalte höher im Vergleich zur Variante ohne PK (30 mg K/Ts).

Zur Beurteilung der Kalium- und P-Versorgung der Böden wird die Gehaltsklasseneinteilung nach Kerschberger et al. (1997) zitiert in Feller et al. (2011) herangezogen und dient wie von anderen Autoren auch beschrieben zur Einteilung der Nährstoffversorgung im Boden hinsichtlich des Düngungsstatus. Sehr niedrig ist der Status in der Klasse A und B, hier sollte die Düngung doppelt so hoch sein wie der K- bzw. P-Bedarf der Pflanzen. Optimal ist die Versorgung in der Gehaltsklasse C da die Pflanzen auch bei ungünstigen Standortbedingungen ausreichend versorgt sind, gedüngt wird was über die Ernte entzogen wird (Erhaltungsdüngung).

In den Gehaltsklassen D und E ist die Versorgung hoch bzw. sehr hoch. In der Klasse E kann über längere Jahre auf Düngung verzichtet werden. Bei der Einstufung der K-Versorgung wird die Bodenartgruppe berücksichtigt und erfolgt in der Einteilung leichte, mittel und schwere Böden. Die Einstufung von Phosphor ist unabhängig von der Bodenart.

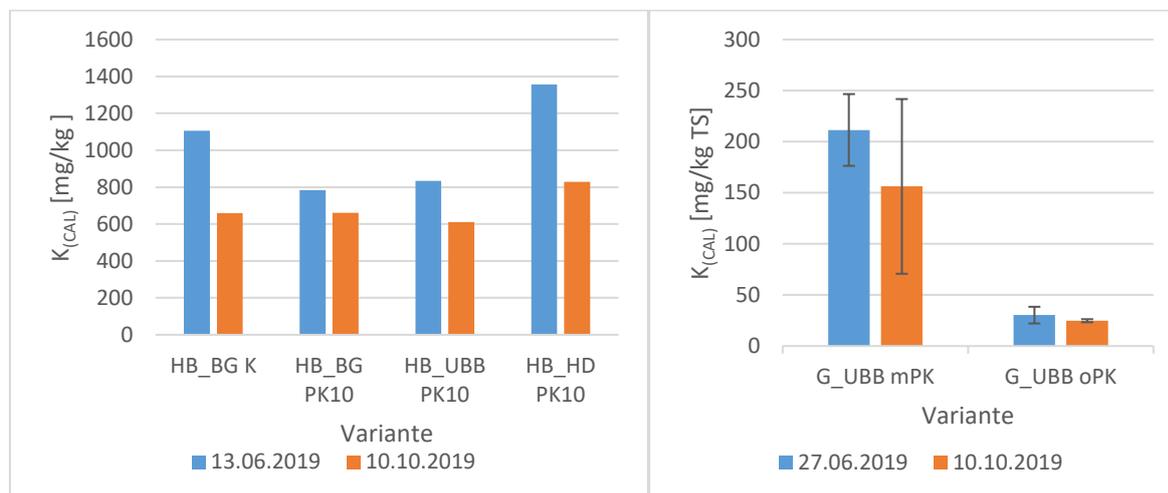


Abbildung 35: K_{CAL}- Gehalte [mg/kg] in den Hochbeeten und am UBB an zwei verschiedenen Terminen

Die Hochbeete werden in die Bodenartgruppe „mittel“ eingestuft und sind mit Gehalten von 600 bis 1350 mg K/kg weit über der Gehaltsklasse E (≥ 250 mg/kg), es liegt eine hohe Kaliumübersversorgung vor.

Bei den Böden am UBB handelt es sich um leichte Böden (vgl. Tabelle 5). Die mit Pflanzenkohlekompost beaufschlagten Flächen sind zu beiden Terminen übersversorgt und liegen im Juni in der Versorgungsstufe E (> 183 mg K/kg) und im Herbst in der Stufe D (116 bis < 183 mg K/kg). In der Variante ohne Pflanzenkohlekompost liegt die Gehaltsklasse der Stufen A (≤ 33 mg k/kg) vor. Die Kaliumversorgung ist sehr niedrig und bedarf einer Ergänzungsdüngung.

In den vier Hochbeeten liegen die P_{CAL}-Gehalte zu beiden Terminen zwischen 265 und 335 mg P/kg und entsprechen der Gehaltsklasse E (> 183 mg/kg). Unabhängig von der Versuchsvariante liegt generell eine sehr hohe P Versorgung bzw. Übersversorgung vor. In der Variante mit Kompost sind die P-Gehalte zum Vegetationsende etwas niedriger und in der Variante UBB_PK10 etwas höher, in den anderen beiden Varianten verändert sich das Angebot nicht wesentlich.

Am UBB sind die P_{CAL}-Gehalte in der Variante mPK zu beiden Terminen höher im Vergleich zur Variante oPK. Obwohl zu Vegetationsende die P-Versorgung in beiden Varianten geringfügig abnimmt liegen sie noch in der Gehaltsklasse D (87 - 148 mg P/kg) und sind übersversorgt.

Kalium wurde in unterschiedlichem Maße über den Kompost bzw. die Pflanzenkohlekomposte eingebracht und das pflanzenverfügbare Kalium ist am ersten Termin, kurz nach der Ausbringung höher im Vergleich zum zweiten Termin. Im Verlaufe der Vegetationszeit wird das eingebrachte pflanzenverfügbare Kalium von den Pflanzen aufgenommen, im Boden fixiert oder

ausgewaschen. In den Hochbeeten haben sich die K-Gehalte, trotz großer Unterschiede zu Beginn, am Ende der Vegetationszeit relativ angeglichen. Das Gartenbeet am UBB erfuhr durch das Aufbringen von Pflanzenkohlekompost eine deutliche Verbesserung der mangelhaften K-Versorgung die auch im Herbst noch nachzuweisen war.

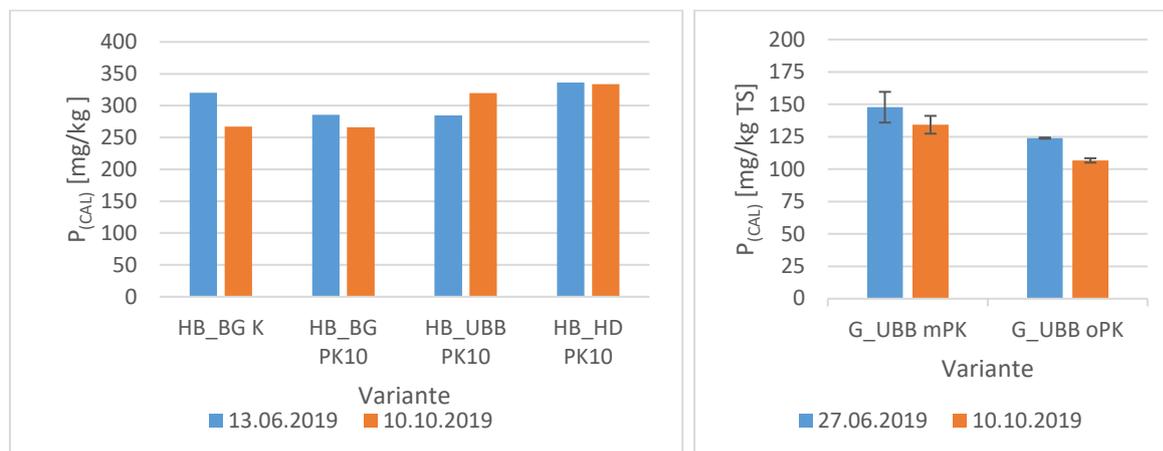


Abbildung 36: P_{CAL} Gehalte [mg/kg] in den Hochbeeten und am UBB an zwei verschiedenen Terminen

Die unterschiedliche K- und P- Freisetzung von Pflanzenkohlen wurde von Angst & Sohi (2013) anhand mehrerer Kaltwasserextraktionen getestet und sie konstatieren dass die Kaliumfreisetzung bei der ersten Extraktion hoch war und dann rapide abnahm. Im Gegensatz dazu war die P-Freisetzung zu Beginn quantitativ geringer und es kann von einer längerfristigen Freisetzung ausgegangen werden. In Feld- und Gefäßversuchen führte eine PKS-Düngung zur Erhöhung der Nährstoffvorräte und der K-, P und Mg-Verfügbarkeit (Weiß et al. 2013; Rademacher (2018). Die Mechanismen wie Nitrat, Phosphat und andere Nährstoffe durch die Mitkompostierung in Pflanzenkohleporen zurückgehalten werden beschreiben Joseph et al. (2017), die organische Beschichtung von Pflanzenkohlen erklärt die Nährstoffzurückhaltung und Stimulation der Bodenfruchtbarkeit (Hagemann et al. 2017). Es wird auch über den Einfluss der Pflanzenkohlezusammensetzung auf die Nährstofffreisetzung, Kohlenstoffmineralisierung und das potenzielle Umweltrisiko in der Literatur berichtet (El Naggar et al. 2019).

6.4.2 Pflanzenwachstum

Bei den Pflanzenerträgen werden die Trockensubstanzerträge für die jeweilige Menge der geernteten Pflanzen angegeben um die Unterschiede zwischen den Hochbeeten bzw. am UBB zwischen der Variante mit und ohne Pflanzenkohlekompost darzustellen. Ein Ertragsvergleich mit dem Erwerbsanbau wird nicht durchgeführt, da im kleingärtnerischen Bereich der Gemüseanbau unter anderen Bedingungen (Pflanzenanzahl/Fläche, Pflanzenschutz, Bodenbearbeitung) stattfindet. Gemüsepflanzen werden entsprechend ihrem unterschiedlichen Nährstoffbedarf in Starkzehrer (z.B. Kohlarten, Lauch, Tomaten) Mittelzehrer (Blattsalate, Zwiebel) und Schwachzehrer (Bohne, Möhre) eingeteilt (Kosmos 2006).

In Hellersdorf wurden am 09.07.2019 die Kohlrabipflanzen und der Salat geerntet und die Zwiebeln am 08.08.2019. Nach der Kohlrabernte wurden die Pflanzen in Knollen, Blätter und Wurzeln getrennt und gewaschen um die jeweiligen Gewichtsanteile bestimmen zu können. Die Trockensubstanzen der Knollen lagen zwischen 10,5 und 11,5 %. Die Trockenmasseerträge je Hochbeet (drei Knollen) waren mit 35 bis 92 g sehr unterschiedlich. Der höchste Ertrag war in der HB_BG-PK10 Variante gefolgt von der UBB_PK10 Variante. In der Kompostvariante war der Ertrag um das 2,5fache niedriger.

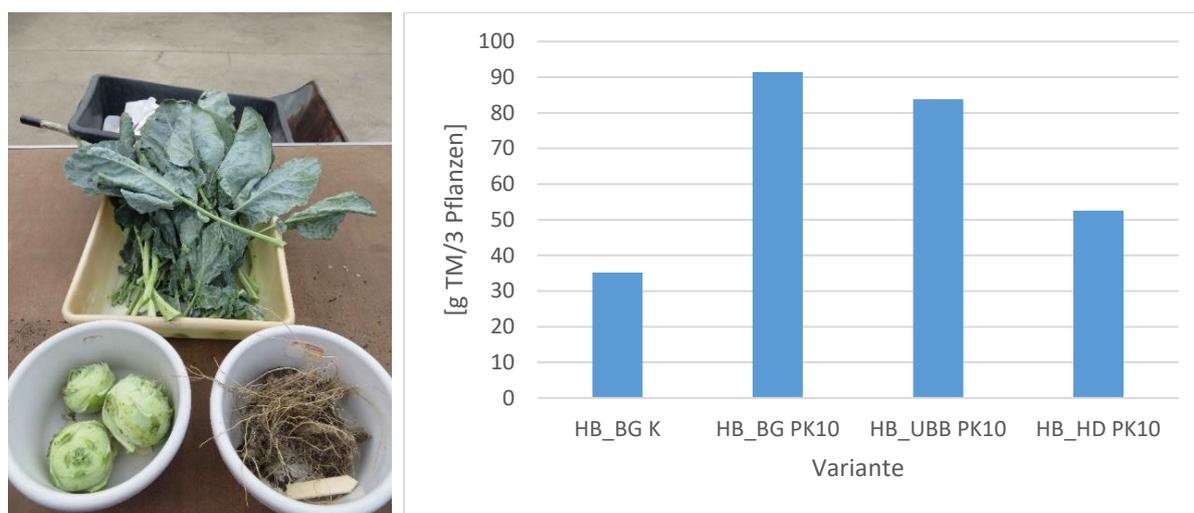


Abbildung 37: Aufbereitung der Kohlrabipflanzen für die Analysen (Blätter, Knollen, Wurzeln) und Trockenmasseerträge [g TM/3 Pflanzen] in den 4 Hochbeeten am Standort Gut Hellersdorf

Neben dem Ernteprodukt (Kohlrabiknolle) tragen auch Blätter und Wurzeln von Pflanzen zur Kohlenstoffspeicherung bei. Wie aus

Tabelle 34 ersichtlich wurde in den Varianten HB_BG PK10 und HB_UBB_PK10 (höchste Knollenmassen) im Vergleich zu den anderen beiden Varianten auch in den Blättern und Wurzeln das doppelte an Biomasse produziert. Die Trockensubstanzen der Blätter ist in allen vier Hochbeeten 12,1 bis 13,5 % TS auf einem ähnlichen Niveau hingegen beim Vergleich der Wurzeln in der Variante HB_BG_K nur halb so hoch.

Tabelle 34: Trockenmasseerträge der Kohlrabiblätter und -wurzeln [g TM/3 Pflanzen] und TS [%] in den 4 Hochbeeten am 09.07.2019

	Blätter		Wurzeln	
	[g TM/3 Pflanzen]	TS [%]	[g TM/3 Pflanzen]	TS [%]
HB_BG K	38,8	12,7	3,2	11,2
HB_BG PK10	88,1	13,5	13,1	20,5
HB_UBB PK10	84,2	12,1	12,1	20,6
HB_HD PK10	48,4	13,1	5,7	17,1

Die Salaterträge (Tabelle 35) lagen zwischen 6,6 und 26,8 g/3 Pflanzen und waren in der HB_HD_PK10 am höchsten und in der HB_UBB_PK10 Variante am niedrigsten. Bei den Zwiebelerträgen (27,6 – 42,7 g/10 Zwiebeln) ist es genau umgekehrt, die höchsten Erträge sind in der HB_UBB_PK10 Variante. Die Trockensubstanz mit 5,5 – 6,8 % lag zum Zeitpunkt der Ernte beim Salat in allen vier Hochbeeten auf einem vergleichbaren Niveau wie dies auch bei den Zwiebeln war (12,2 – 14,9 %). Diese Werte stimmen mit Literaturwerten (Salat 8 % TS und Zwiebeln 12 %TS) überein (LFULG 2020).

Tabelle 35: Salat- und Zwiebelerträge [g TS/ Pflanzen], TS [%], Erntetermine in den 4 Hochbeeten

Variante	Salat (09.07.2019)		Zwiebeln (08.08.2019)	
	[g TM/3 Pflanzen]	TS [%]	[g TM/10 Pflanzen]	TS [%]
HB_BG K	16,3	6,8	34,6	12,8
HB_BG PK10	15,4	6,3	30,7	12,2
HB_UBB PK10	6,6	5,3	42,7	12,9
HB_HD PK10	26,8	5,5	27,6	14,1

Am UBB war bei der Blumenkohlernte (25.07.2019) schon in den Gartenbeeten ein deutlicher Unterschied erkennbar. In der Parzelle mit Pflanzenkohlekompost war der Blumenkohl größer und vitaler. Der essbare Anteil (Kopf) lag nach auswiegen und Bestimmung der Trockenmasse 3mal höher (60 g/3 Pflanzen) in der Variante UBB mPK und der Blätteranteil doppelt so hoch (Abbildung 38). Berücksichtigt werden müssen jedoch auch die großen Standardabweichungen. Bei der Wurzelmasse waren hingegen die Unterschiede sehr gering. Die Trockensubstanzen lagen im Blumenkohlkopf bei 6,8- 8,7 %, in den Blättern bei 12 % und in den Wurzeln bei 50%.

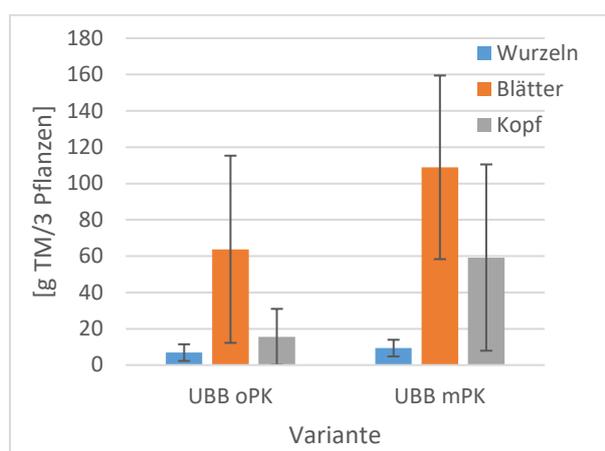


Abbildung 38: Blumenkohlertrag [g TM/3 Pflanzen] (Kopf-, Blatt und Wurzel) in den beiden Varianten mit am UBB (n=3, MW ± STABW)

In Tabelle 36 sind die Frischmassen, Trockensubstanzen und Trockenmassen des Rotkohlgemüses in beiden Varianten dargestellt. Mit 4,74 kg war der essbare Frischmasseanteil der drei Köpfe in der Variante mPK höher im Vergleich zu der Variante oPK mit 3,65 kg FM. Zum

Erntetermin unterschieden sich die Trockensubstanzen geringfügig.

Tabelle 36: Frischmasse, Trockensubstanz und Trockenmasse Rotkohl (3 Köpfe) am 18.09.2019 in den Varianten UBB oPK und UBB mPK

Variante	FM [kg/3 Köpfe]	TS [%]	TM [kg/3 Köpfe]
UBB_oPK	3,65	7,23	0,26
UBB_mPK	4,74	6,50	0,31

Bei den 7 Tomatenpflanzen je Variante erwies es sich als unpraktikabel und organisatorisch nicht durchführbar eine durchgehende Ertragserhebung durchzuführen. Die Tomaten wurden je nach Bedarf geerntet oder von Besuchenden gegessen.

In Freilandversuchen im Botanischen Garten in Berlin (TerraBoga Projekt) mit verschiedenen Gemüsearten (u.a. Weißkohl, Erdbeeren und Zucchini) konnten leichte Mehrerträge durch die Anwendung von Pflanzenkohlekompost nachgewiesen werden (Terytze et al. 2015). Höhere Biomasseerträge von *Chenopodium quinoa* wurden in einem Sandboden durch das Aufbringen von mitkompostierter Pflanzenkohle im Vergleich zur Kontrolle und nicht kompostierter Pflanzenkohle ermittelt. Begründet wird dies durch das Nitratrückhaltevermögen und die langsame Freisetzung von Nährstoffen für die Pflanzen (Kammann et al. 2015). Höhere Hafererträge wurden bei einem Gewächshausexperiment durch die Zugabe von Pflanzenkohlekompost erreicht (Schulz et al 2013).

6.4.3 Pflanzeninhaltsstoffe

Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium

In der folgenden Tabelle 37 sind die Nährstoffgehalte aller geernteten und untersuchten essbaren (Haupternteprodukt) und nicht essbaren (Nebenernteprodukt) Pflanzenteile der vier Hochbeete in Hellersdorf dargestellt und in Tabelle 39 der zwei Gartenbeete vom UBB. Über die Nährstoffgehalte der nichtessbaren Anteile (Blätter und Wurzeln) können in Abhängigkeit der Behandlungsvariante ebenso vergleichende Aussagen getroffen werden.

In den Hochbeeten liegen die Stickstoffgehalte in den Kohlrabiknollen (Mittelzehler) in der Variante HB_HD_PK10 mit 2,53 % sehr niedrig und in den anderen Varianten auf einem vergleichbaren Niveau wie in der Literatur (vgl. Tabelle 38) angegeben. Auch in den Blättern und Wurzeln sind in dieser Variante die N-Gehalte am niedrigsten.

Die K-Aufnahme war v.a. in den Varianten HB_BG_K und HB_UBB-PK10 sehr hoch und im Vergleich zur Literatur sind die K-Gehalte über dem Durchschnitt. In diesen Varianten war das K Angebot im Boden überdurchschnittlich hoch (vgl. Abb 35).

Die P- und Mg-Gehalte unterscheiden sich in den Varianten nicht und das Niveau entspricht den Literaturdaten. In den Blättern und Wurzeln sind die P-, K- und Mg-Gehalte in den einzelnen Varianten gering.

Im Salat (Mittelzehrer) sind die N-, P-, K- und Mg-Nährstoffgehalte in allen vier Varianten höher im Vergleich zu den Literaturwerten (Tabelle 38). Dies trifft v.a. für Stickstoff (3,59 – 4,40 % N) und Kalium (8,66 - 9,44 % K) zu hier sind die Gehalte bis um das 2fache höher.

Auch in den Zwiebeln sind die N-Gehalte mit Ausnahme der HB_HD_PK10 höher (2,61 – 2,95 %N) als der Durchschnittswert von 1,5 % N. Die K-Aufnahme der Zwiebeln war in allen vier Beeten überdurchschnittlich, die Mg-Aufnahme zu niedrig und die P-Aufnahme entsprechend den Vergleichswerten.

Tabelle 37: Nährstoffgehalte (N, P, K und Mg) von Kohlrabi, Salat und Zwiebeln von den Hochbeeten in Hellersdorf

		TS	N	P	K	Mg
		[%]	[% TS]	[% TS]	[% TS]	[% TS]
Kohlrabi						
Knollen	HB_BG K	10,7	3,69	0,54	5,46	0,15
	HB_BG PK10	11,5	3,48	0,55	4,96	0,14
	HB_UBB PK10	10,5	3,56	0,55	5,13	0,14
	HB_HD PK10	11,5	2,53	0,50	4,76	0,13
Blätter	HB_BG K	12,7	3,96	0,31	6,81	0,18
	HB_BG PK10	13,5	3,91	0,33	6,76	0,19
	HB_UBB PK10	12,1	3,76	0,31	7,03	0,19
	HB_HD PK10	13,1	2,95	0,31	6,64	0,14
Wurzeln	HB_BG K	11,2	1,63	0,49	2,19	0,13
	HB_BG PK10	20,5	1,71	0,50	2,36	0,13
	HB_UBB PK10	20,6	1,65	0,52	2,43	0,12
	HB_HD PK10	17,1	1,33	0,50	2,18	0,15
Salat						
	HB_BG K	6,8	4,40	0,51	9,10	0,18
	HB_BG PK10	6,3	4,36	0,52	9,15	0,19
	HB_UBB PK10	5,3	4,30	0,52	8,66	0,19
	HB_HD PK10	5,5	3,59	0,51	9,44	0,18
Zwiebel						
	HB_BG K	12,8	2,89	0,29	2,27	0,09
	HB_BG PK10	12,2	2,95	0,31	2,31	0,09
	HB_UBB PK10	12,9	2,61	0,29	2,45	0,08
	HB_HD PK10	14,1	1,75	0,23	2,34	0,07

Rückschlüsse auf die Versorgung der Gemüsepflanzen mit den Hauptnährstoffen N, P, K und Mg lassen sich im Vergleich zu den Literaturwerten (LFULG 2020, Tabelle 38) aus den in Tabelle 37 für Hellersdorf und Tabelle 39 für das UBB zusammengestellten Analysen des Erntegutes ziehen.

Das Nitratangebot war in den ersten 3 Varianten zu Beginn der Vegetationsperiode höher im Vergleich zur HB_HD_PK10 Variante (Abbildung 34) und die sehr hohen P- und K- Gehalte im Salat sowie K-Gehalte in den Zwiebeln sind durch das sehr hohe Nährstoffangebot im Boden erklärbar. Da Salat zu den Mittelzehrern zählt war das Nährstoffangebot aus dem Kompost und den Pflanzenkohlekomposten zu hoch und zu schnell verfügbar.

Tabelle 38: Stickstoff- (N), Phosphor- (P), Kalium- (K) und Magnesium- (Mg) Gehalte in Gemüse im Erwerbsgartenbau nach LFULG (2020)

	TS [%]	Nährstoffgehalt [% TS]			
		N	P	K	Mg
Kohlrabi	8	3,50	0,56	4,38	0,19
Blumenkohl	9	3,11	0,50	3,30	0,13
Rotkohl	13	1,69	0,27	2,30	0,12
Salat (verschiedene Arten)	8	2,38	0,38	4,63	0,15
Zwiebeln (ohne Laub)	12	1,50	0,29	1,67	0,13

Im essbaren Blumenkohlteil sind die N-Gehalte in der Variante oPK mit 3,2 % N auf einem vergleichbaren Niveau wie in der Literatur angegeben, hingegen in der Variante mPK niedriger (Tabelle 39). Die P- und Mg- Gehalte sind vergleichbar denen in der Literatur die K-Gehalte sind in der oPK-Variante mit 2,83 % K etwas zu niedrig. In den Blättern sind die P- und K-Gehalte der Variante mPK höher Mg hingegen niedriger.

Beim Rotkohl sind die N- und K- Gehalte in der Variante mit PK sehr hoch im Vergleich zu den Literaturdaten (Tabelle 38) und die P-Gehalte hoch. Mit 0,12 % Mg sind keine Gehaltsunterschiede in den Varianten und die Werte entsprechen dem Literaturdurchschnitt.

Tabelle 39: Nährstoffgehalte (N, P, K und Mg) der geernteten Pflanzenteile von den Gartenbeeten am UBB

Pflanze		TS [%]	N [%]	P [% in TS]	K [% TS]	Mg [% TS]
Blumenkohl						
Kohl	oPK	8,7	3,2 (±0,5)	0,49 (±0,02)	2,83 (±0,32)	0,17 (±0,01)
Kohl	mPK	6,7	2,7 (±0,3)	0,52 (±0,01)	3,57 (±0,03)	0,13 (±0,02)
Blätter	oPK	12,1	1,8 (±0,1)	0,37 (±0,04)	1,55 (±0,34)	0,25 (±0,06)
Blätter	mPK	13,0	1,7 (±0,4)	0,45 (±0,14)	2,79 (±0,16)	0,15 (±0,03)
Wurzeln	oPK	50,5	1,3 (±0,0)	0,30 (±0,02)	1,19 (±0,32)	0,21 (±0,00)
Wurzeln	mPK	50,0	1,2 (±0,2)	0,45 (±0,01)	2,06 (±0,19)	0,18 (±0,00)
Rotkohl						
	oPK	7,2	1,9	0,32	2,60	0,12
	mPK	6,5	2,4	0,37	3,16	0,12

Die Pflanzennährstoffe liegen im Boden in gelöster Form vor und gelangen per Massenfluss (angetrieben durch Transpiration), Diffusion (Konzentrationsgradient) und das Hinwachsen der Wurzel zum Nährstoff. Die Aufnahme kann passiv oder aktiv erfolgen (Marschner 1986). In der Pflanze selbst sind die Nährstoffe im Hinblick auf die Umlagerung mobil wie z.B. N, P K und Mg bzw. immobil (z.B. S, Cu, Zn) (Oehmich 1983). Durch den Kompost und die PK ist der pflanzenlösliche Kaliumanteil hoch und K wurde von den Pflanzen vermehrt aufgenommen. In den Zwiebeln sind höhere K-Gehalte bzw. niedrigere Mg-Gehalte. Hohe K-Gehalte in der Pflanzenkohle verursachen einen Mg-Mangel in Mais durch K-Antagonismus (Butan et al. 2015). Die Nährstoffgehalte von Pflanzenkohlen wirken sich fördernd auf die Pflanzenkohle-Wurzel Interaktionen aus (Prendergast-Miller 2014).

Schwermetalle

Schwermetalle können von Pflanzen auf dem systemischen Pfad, d.h. die Schadstoffe werden mit dem Bodenwasser über die Pflanzenwurzel mit dem Transpirationsstrom in andere Pflanzenteile transportiert, oder über den Verschmutzungspfad aufgenommen werden. Das Schadstoffanreicherungsvermögen z. B. für die Schwermetalle Cd, Pb und Thallium liegt in Abhängigkeit der Nutzpflanzenart zwischen niedrig bis hoch (LUA, 2010).

In der folgenden Tabelle 40 sind die Schwermetallgehalte Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Blei (Pb) und Zink (Zn) der in den Hochbeeten geernteten Pflanzenteile dargestellt.

Die Cadmiumgehalte sind im Kohlrabi (Blätter, Kohl, Wurzeln) und den Zwiebeln unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,09 mg/kg und im Salat in allen Varianten höher. Die Chromgehalte liegen zwischen 0,1 bis 1,4 mg/kg und sind tendenziell in den Kohlrabiblättern und -wurzeln höher. Die Kupfergehalte sind in den Kohlrabipflanzen in allen Teilen und in den Zwiebeln unterhalb von 4,5 mg/kg hingegen in den Salatpflanzen mit durchschnittlich 11,4 mg/kg in allen Varianten um bis das 3fache höher.

Im Salat und den Zwiebeln sind die Ni-Gehalte gering ($< 0,23$ mg/kg) und auch im essbaren Teil der Kohlrabi (Knolle) sind die Ni-Gehalte der einzelnen Varianten niedriger im Vergleich zu den Blättern und Wurzeln (0,26 - 0,62 mg/kg). Unterhalb der Bestimmungsgrenze ($< 1,0$ mg/kg) sind die Bleigehalte. Die Zinkgehalte sind in den Kohlrabipflanzen und Zwiebeln zwischen 25 und 43 mg/kg und in den Salatpflanzen sind die Zinkgehalte mit bis zu 80 mg/kg wie die Kupfergehalte viel höher im Vergleich zu den anderen zwei Kulturen. Generell hat im Salat eine höhere Anreicherung an Cadmium, Kupfer und Zink im Vergleich zu den anderen Pflanzen stattgefunden hat. Bei den geringen Unterschieden zwischen den Varianten kann jedoch keine klare Aussage über den Einfluss der unterschiedlichen Substrate getroffen werden.

Tabelle 40: Schwermetallgehalte (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zink) [mg/kg] der Gemüsepflanzen der vier Hochbeete in Hellersdorf

Pflanze	Variante	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
[mg/kg TS]								
Kohlrabi								
Knollen	KN	HB_BG K	< 0,09	0,71	3,14	0,33	< 1,0	29
	KN	HB_BG PK10	< 0,09	0,41	3,31	0,20	< 1,0	29
	KN	HB_UBB PK10	< 0,09	0,34	3,49	0,19	< 1,0	29
	KN	HB_HD PK10	< 0,09	0,53	2,88	0,26	< 1,0	23
Blätter	BL	HB_BG K	< 0,09	0,78	2,90	0,36	< 1,0	29
	BL	HB_BG PK10	< 0,09	1,43	2,92	0,62	< 1,0	37
	BL	HB_UBB PK10	< 0,09	1,07	3,13	0,50	< 1,0	32
	BL	HB_HD PK10	< 0,09	0,85	3,04	0,38	< 1,0	32
Wurzeln	WZ	HB_BG K	< 0,09	0,86	3,76	0,47	< 1,0	28
	WZ	HB_BG PK10	< 0,09	0,42	3,43	0,26	< 1,0	31
	WZ	HB_UBB PK10	< 0,09	0,96	3,29	0,49	< 1,0	32
	WZ	HB_HD PK10	< 0,09	0,50	3,83	0,30	< 1,0	31
Salat		HB_BG K	0,40	0,14	10,39	0,19	< 1,0	72
		HB_BG PK10	0,39	0,16	12,00	0,23	< 1,0	80
		HB_UBB PK10	0,32	0,14	11,16	0,22	< 1,0	74
		HB_HD PK10	0,44	0,22	12,01	0,21	< 1,0	79
Zwiebel		HB_BG K	< 0,09	0,11	4,47	0,17	< 1,0	43
		HB_BG PK10	< 0,09	0,14	4,85	0,17	< 1,0	43
		HB_UBB PK10	< 0,09	0,16	3,23	0,20	< 1,0	36
		HB_HD PK10	< 0,09	0,12	3,64	0,13	< 1,0	26

Die Schwermetallgehalte der Gemüsepflanzen am UBB sind in Tabelle 41 dargestellt. Auch im Blumenkohl (Ausnahme Blätter) und Rotkohl sind die Cd-Gehalte in beiden Varianten unterhalb von 0,09 mg/kg TS. Die Cr, Cu und Ni-Gehalte sind in beiden Kohlgemüsen unabhängig von der Variante in vergleichbaren Größenordnungen mit Ausnahme der Blumenkohlwurzeln in denen die Gehalte höher sind. In den Blumenkohlblättern und im Rotkohl sind in beiden Varianten niedrigere Zn-Gehalte (20 mg/kg) im Vergleich zum essbaren Teil und den Wurzeln (33 mg/kg).

Tabelle 41: Schwermetallgehalte (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Zink) [mg/kg] der beprobten Gemüsepflanzen in beiden Varianten am UBB

Pflanze	Variante	Schwermetall [mg/kg]					
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
		[mg/kg TS]					
Blumenkohl	KO UBB_oPK	< 0,09	0,39	3,79	0,18	< 1,0	38
	KO UBB_mPK	< 0,09	0,36	3,71	0,21	< 1,0	30
	BL UBB_oPK	0,11	0,62	2,23	0,28	< 1,0	19
	BL UBB_mPK	0,12	0,44	2,27	0,24	< 1,0	19
	WZ UBB_oPK	< 0,09	1,79	5,67	2,27	< 1,0	33
	WZ UBB_mPK	< 0,09	1,73	4,32	1,12	< 1,0	34
Rotkohl	UBB_oPK	< 0,09	0,30	2,97	0,20	< 1,0	18
	UBB_mPK	< 0,09	0,14	2,96	<0,1	< 1,0	20

Für die Gesundheit des Menschen sind Höchstgehalte an Kontaminanten (Pb und Cd) für Gemüse definiert (Verordnung (EG) Nr. 1881/2006). Diese Gehalte werden nach dem Waschen des Gemüses und Abtrennen der genießbaren Teile ermittelt und im Frischgewicht angegeben (Tabelle 42). Die Pb-Gehalte im Kohlgemüse und Salat (< 1,0 mg/kg TM) liegen unterhalb der Höchstgehalte von 0,3 mg/kg FM und die durchschnittlichen Cd-Gehalte von 0,39 mg/kg TS im Salat bzw. 0,025 mg/kg FM sind unterhalb der Höchstgehalte von 0,2 mg/kg FM für Salat.

Tabelle 42: Zulässige Pb- und Cd- Höchstgehalte in Lebensmitteln (Verordnung (EG) Nr. 1881, 2006)

Erzeugnis	Höchstgehalt [mg / kg FM]
Blei	
Gemüse, ausgenommen Kohlgemüse, Blattgemüse, frische Kräuter und Pilze (Zwiebel, Tomaten)	0,10
Kohlgemüse, Blattgemüse (Blumenkohl, Kohlrabi, Rotkohl, Salat)	0,30
Cadmium	
Gemüse und Früchte, ausgenommen Blattgemüse, frische Kräuter, Pilze, Stängelgemüse, Pinienkerne, Wurzelgemüse und Kartoffeln (Blumenkohl, Kohlrabi, Rotkohl, Tomaten)	0,050
Blattgemüse, frische Kräuter, Kulturpilze und Knollensellerie (Salat)	0,20
Stängelgemüse, Wurzelgemüse und Kartoffeln, ausgenommen Knollensellerie (Zwiebel)	0,10

Transferfaktor

Um in Pflanzen das Anreicherungsvermögen von Schwermetallen in Abhängigkeit des Standortes zu bestimmen und damit eine Beurteilung des Übergangs des Schwermetalls aus dem Boden in die Pflanze können Transferfaktor (TF) gebildet werden. Er gibt das Verhältnis Gesamtgehalt Metall Pflanze zu Gesamtgehalt Metall Boden an.

In Hellersdorf ist der TF für die Schwermetalle Cr, Ni und Pb in allen Pflanzenteilen (Haupt- und Nebenprodukt) mit $< 0,1$ sehr niedrig und geringfügig höher für die Elemente Cd, Cu ($< 0,3$), und Zn ($< 0,5$) im Kohlrabi und den Zwiebeln. Bei Cd und Zn sind die höchsten Transferfaktoren im Salat (Abbildung 39). Cadmium wurde mit Ausnahme der HB_HD_UBB PK10 Variante verstärkt angereichert, beim Zink liegt der Transferfaktor bei 0,8.

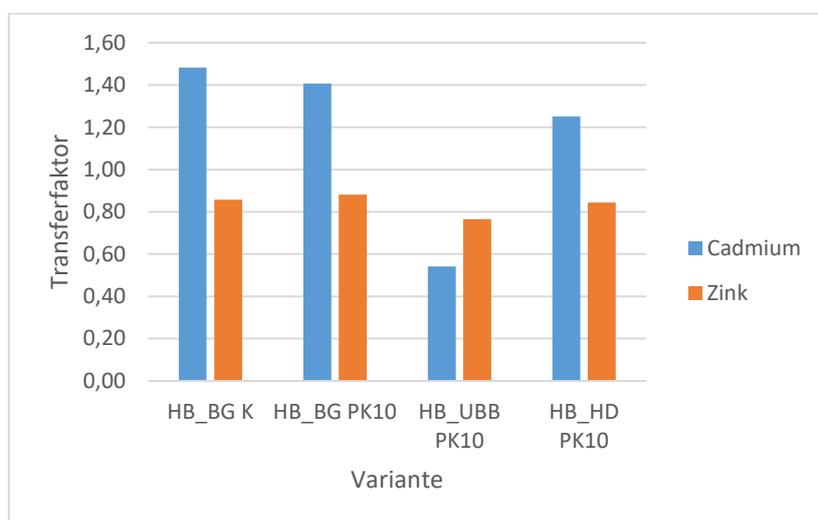


Abbildung 39: Transferfaktoren für Cd und Zn im Salat in den Hochbeeten

Bei den Pflanzen am UBB ist beim Blumenkohl (Haupt- und Nebenernteprodukt) der Transferfaktor von Cd ($< 0,2$), Cr, Ni, Pb (jeweils $< 0,1$) sehr niedrig und von Zn im Blumenkohl in der Variante oPK ($< 0,5$) geringfügig höher.

Die Schwermetallakkumulation von Nutzpflanzen ist sehr unterschiedlich und von der jeweiligen Kultur abhängig. Die Schadstoffanreicherung für Cd, Pb und Thallium verschiedener Nutzpflanzenarten kann nach LUA (2010) in hoch, mäßig und niedrig eingeteilt werden. Ein hohes Anreicherungsvermögen für Cd und Pb haben Salate, ein mäßiges Anreicherungsvermögen Blumen- und Rotkohl. Von Zwiebeln wird Pb mäßig und Cd niedrig angereichert. Wie unterschiedlich Pflanzenteile (Knolle, Blätter, Frucht, Stamm) Schwermetalle akkumulieren beschreiben Strumpf & Reichmuth (2009). Durch den Einsatz von Pflanzenkohle können Schwermetalle in kontaminierten Böden immobilisiert werden wie Chen et al. (2018) in einer Meta-Analyse beschreiben. Einen wesentlichen Einfluss auf die Wirkung haben die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Pflanzenkohle sowie der behandelte Boden. Pflanzenkohle kann die Verfügbarkeit und Phytotoxizität von Schwermetallen (Cd, Cu und Pb) reduzieren wie Park et al. (2011) für Braunen Senf (*Brassica juncea*) nachgewiesen haben. Die Mobilität von

Cd, Pb und Zn im Boden wird durch Zugabe von Pflanzenkohle reduziert, dies zeigt sich jedoch nicht in den Schwermetallgehalten der Miscanthuspflanzen im Vergleich zur Kontrolle (Karer et al., 2018). In einem Cd belasteten Boden reduzierte die Zugabe von Pflanzenkohle die Cd-Konzentration in den Blättern und Stängeln der zwei verschiedenen Blattgemüse (Chen et al., 2020). Wie Pflanzenkohle die Cd-Toleranz in Spinat durch Modifizierung der Cd-Aufnahme und physiologischer und biochemischer Eigenschaften verändert berichten Younis et al. (2016). Durch Zugabe von PK kann die Cd-Verfügbarkeit im Boden verringert werden und trägt dadurch zur Gefährdungsminderung beim Anbau von Blatt- und Wurzelgemüse bei (Herwig et al., 2020). Es wird ein umweltbewusstes gärtnern unter Berücksichtigung belasteter Böden und Schwermetallanreicherungsvermögen in der Großstadt (Bezirksamt Spandau Berlin 2014) empfohlen.

Zusammenfassend können folgende Schlussfolgerungen nach einer Vegetationsperiode aus den Untersuchungen in den vier Hochbeeten und den beiden Gartenbeeten anhand der ermittelten physikalisch-chemischen Bodeneigenschaften gezogen werden. In den Hochbeeten konnte durch das Vermischen der Gartenerde mit den Substraten die Rohdichte zu Beginn verringert werden. Im Verlauf über den Sommer fand eine Verdichtung in den PK-Varianten statt. Die maximale Wasserhaltekapazität war zum Ende der Vegetationszeit in den Hochbeeten und am UBB niedriger im Vergleich zum Beginn.

In den Hochbeeten konnten die C_{org} -Gehalte der Gartenerde erhöht werden. In Abhängigkeit der bodenchemischen Eigenschaften der eingebrachten Substrate sind in den Hochbeeten die pH-Werte und Salzgehalte zu Beginn der Vegetationszeit unterschiedlich, am Ende der Vegetationszeit gleichen sich die pH-Werte an. Die Salzgehalte sind in den Hochbeeten und am UBB zum Ende der Vegetation niedriger.

Im Hinblick auf den pflanzenverfügbaren Stickstoff erwiesen sich die zugegebenen Substrate in den Hochbeeten und im Gartenbeet als sehr vorteilhaft. Die Versorgung mit den pflanzenverfügbaren Nährstoffen Kalium und Phosphor war jedoch über den ganzen Vegetationszeitraum zu hoch.

Die Vorteilswirkung der sehr guten Nährstoffversorgung zu Beginn der Vegetationszeit wirkte sich positiv auf das bessere Wachstum der Starkzehrer (Blumenkohl, Rotkohl) aus. Für ein gesundes Pflanzenwachstum und für die Inhaltsstoffe der Pflanzen ist es wesentlich nach Ausbringung von PK-Substraten zuerst Starkzehrer einzusetzen damit das hohe Nährstoffangebot voll ausgeschöpft wird und dadurch Düngerkosten eingespart werden können.

7 Stoffstrom- und Ökobilanzierung

Im Rahmen der Stoffstrombewertung und Ökobilanzierung werden an beiden Standorten (UBB und Gut Hellersdorf) alle relevanten Informationen für ein standort-prozessbezogenes Stoffstrommanagement zusammengefasst und ausgewertet und die Situation vor Projektbeginn mit den Ergebnissen des Projektes abgeglichen. Anhand der Stoffstromszenarien werden die Ökobilanzen (Indikator $\text{CO}_{2\text{eq}}$, Wirkungskategorie Treibhauseffekt) dargestellt und vergleichend bewertet. Als systembezogener Ansatz (Modellstandort UBB) wird der Corporate Carbon Footprint (CCF) herangezogen. Dieser wird in Anlehnung nach DIN EN ISO 14064-1: 2019-06⁶ durchgeführt.

Für die Kompostierung im Gut Hellersdorf wurde ein produktorientiertes Stoffstrommanagement durchgeführt. Die Verwertung der organischen Rückstände zu Pflanzenkohle und Pflanzenkohlesubstrat wurde dabei auf 1 Mg des entstandenen Produktes mittels des Carbon footprint von Produkten (PCF) bewertet. Der PCF wird in Anlehnung nach DIN CEN ISO/TS 14067: 2014-09⁷ und der DIN EN 16760: 2016-02⁸ durchgeführt.

Grundlage für die Ausführungen dieser Normen sind EN ISO 14040 und EN ISO 14044. Danach umfasst die Ökobilanz vier wesentliche Elemente, die Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, die Sachbilanz, eine Wirkungsabschätzung und eine Auswertung.

Zum Vergleich der $\text{CO}_{2\text{eq}}$ werden die Entsorgung sowie die Erzeugung von Energie aus dem Biogasprozess der BSR betrachtet sowie die Kompostierung und Verbrennung. Bei der Entsorgung werden generell die Einzelprozesse Lagerung, Transportfahrten und Weiterverwertung in den Entsorgungsbetrieben berücksichtigt. Dabei werden Daten von ifeu (Vogt und Ludmann, 2019) für die Bilanz der Vergärung (Biogas) der Anlage BSR Biogas West, der Kompostierung von Laub und Mähgut in diversen Kompostanlagen und der Verbrennung von Holz in Holz-HKW und Kohlekraftwerken und die Kompostierung von Baum- und Strauchschnitt herangezogen. Diese Daten liefern Informationen zu der Klimagasbilanz auf Basis von Bilanzdaten des Landes Berlin (Abfallbilanz-Berichterstattung Berlin). Nettoentlastungen werden dabei mit negativem Vorzeichen ausgewiesen (Tabelle 43).

⁶ DIN EN ISO 14064 2019-06: Treibhausgase – Teil 1: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene. Teil 2: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung, Überwachung und Berichterstattung von Reduktionen der Treibhausgasemissionen oder Steigerungen des Entzugs von Treibhausgasen auf Projektebene. Teil 3: Spezifikation mit Anleitung zur Validierung und Verifizierung von Erklärungen über Treibhausgase

⁷ DIN CEN ISO/TS 14067:2014-09: Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung und Kommunikation (ISO/TS 14067:2013); Deutsche und Englische Fassung CEN ISO/TS 14067:2014

⁸ DIN EN 16760:2016-02: Biobasierte Produkte - Ökobilanzen; Deutsche Fassung EN 16760:2015

Tabelle 43: Treibhauspotenzial untersuchter Stoffflüsse auf Basis der Abfallbilanz/Berichterstattung von Berlin (ifeu, 2019)

Stofffluss	CO ₂ eq kg/ Mg Biomasse			Standortrelevanz	
	Belastung	Entlastung	Saldo (Netto)	UBB	Gut HD
Biotonne (Biogas)	131	266	-135	x	x
Laub (Kompostierung)	163	111	52	x	
Mähgut (Kompostierung)	154	54	100	x	
Baum- & Strauchschnitt (Kompostierung)	117	102	15	x	
Baum- & Strauchschnitt (Verbrennung)	30	419	-389		x

Der Stofffluss der Biotonne wird für beide Standorte nur hinsichtlich der Biogaserzeugung betrachtet (Abbildung 40), da die betrachteten Obst- und Gemüsereste leicht abbaubar sind und die Kategorie gut vergärbare erfüllen.

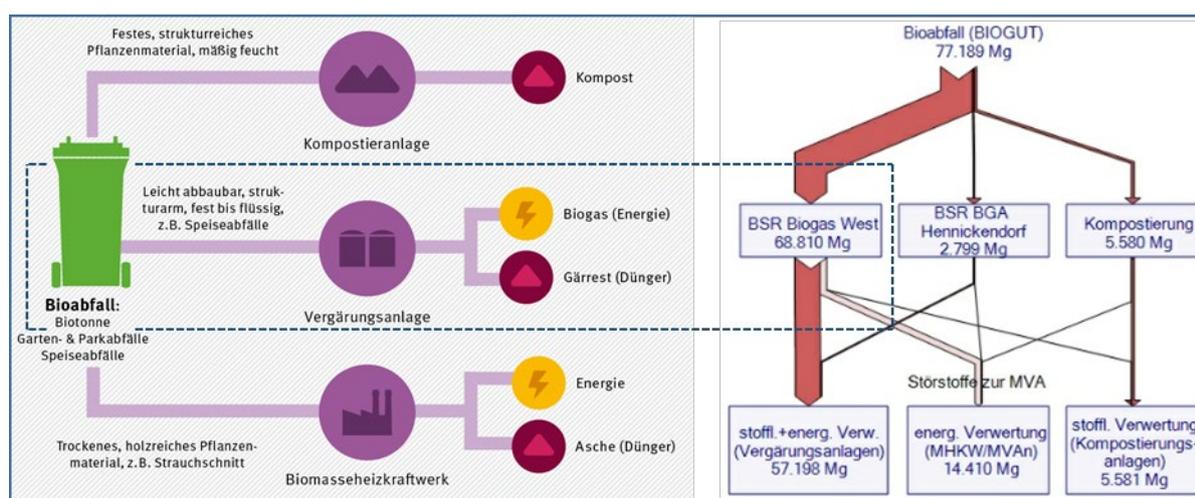


Abbildung 40: Verwertungswege der Berliner Bioabfälle aus der Biotonne und Stoffflussmengen in Tonnen Frischmasse (verändert nach ifeu, 2019 und UBA

(https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/4_schaubild_verwertungswege-bioabfall.pdf)

Die Freisetzung von CO₂ aus biologischen Prozessen fließt generell nicht in die CO₂ Bilanz ein, da es sich um eine kurzfristige biologische Festlegung handelt. Die CO₂ Emissionen werden dennoch dargestellt, da es hinsichtlich der Festlegung von Kohlenstoff durch die Karbonisierung um einen relevanten Parameter handelt. Die Freisetzung von CO₂ wird über den gesamten Prozess Lagerung, Behandlung und Ausbringung betrachtet. Dabei werden bei den verschiedenen Prozessen unterschiedliche Reduzierungsraten (Abbau org. Substanz) angesetzt. In der Summe werden von der ursprünglichen Abfallmenge eine Abbaurate von 80 bis 90 % angenommen. Das heißt es verbleiben 10 bis 20 % nach der Ausbringung im Boden als Dauerhumus.

Zur Auswertung des Treibhauseffektes wurden die einzelnen Treibhausgase hinsichtlich ihrer CO₂-äquivalenten Wirkung (CO_{2eq}) zusammengefasst. Die wichtigsten Treibhausgase und ihre aktuellen CO₂-Äquivalenzwerte nach IPCC (2007) sind in Tabelle 44 aufgeführt.

Tabelle 44: Treibhauspotenzial der wichtigsten Treibhausgase nach IPCC (2007)

Treibhausgas	CO ₂ -Äquivalentsfaktor
Kohlendioxid (CO ₂), fossil	1
Methan (CH ₄) regenerativ	25
Methan (CH ₄) fossil	27,75
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	298
Ammoniak (NH ₃)	2,98

Die quantitative Bewertung weiterer Umwelteffekte durch eine Wirkungsbilanz, kann auf Basis der vorhandenen Datengrundlage nicht realisiert werden.

7.1 UBB

7.1.1 Stoffstromanalyse und Massenbilanz Ist-Zustand

Die Fläche des UBB entspricht ca. 0,5 Hektar, eingebettet in den Ökopark Kladow. Die Frei-/Außenfläche ist durch Wiesen und Beetanlagen gekennzeichnet und entspricht ca. 0,3 Hektar. Als Bilanzierungsrahmen wird das UBB als offene Systemeinheit betrachtet (Abbildung 41). Um das theoretische Potenzial an Biomasse zu erfassen, wurden auf Grundlage der Entsorgungsintervalle der Biotonne und den anfallenden Biomassen aus der Grünflächenpflege die maximal verfügbare Biomasse abgeleitet.

Der Einkauf von Lebensmitteln (Gemüse, Obst, Kaffee etc.) wird nicht betrachtet, da dieser im Bilanzmodell keine Rolle spielt. Hier sind nur die Abfälle von Interesse. Der Einkauf von Lebensmitteln wird durch die Umstellung auf Kreislaufwirtschaft tendenziell nicht verändert. Die Eigenproduktion an Gemüse wird in beiden Szenarien als gleich angenommen und daher ebenfalls nicht betrachtet.

Auf der Input- und Output Seite sind folgende wesentliche Kategorien von Bedeutung:

- Input:
- 1) Kompost, Dünger
 - 2) Gemüse, Obst (bzw. der Teil, der als Abfall anfällt)
 - 3) atmosphärische Depositionen
 - 4) CO₂ zum Aufbau der Biomasse (Rasen, Laub, Holz)
- Output:
- 1) Pflanzenreste (Rasen, Laub, Holz)
 - 2) Entsorgte Küchenabfälle über Biotonne
 - 3) Emissionen (CO₂, CH₄, N₂O, NH₃) aus Abbau-/Verbrennungsprozessen
 - 4) O₂ aus der Photosynthese

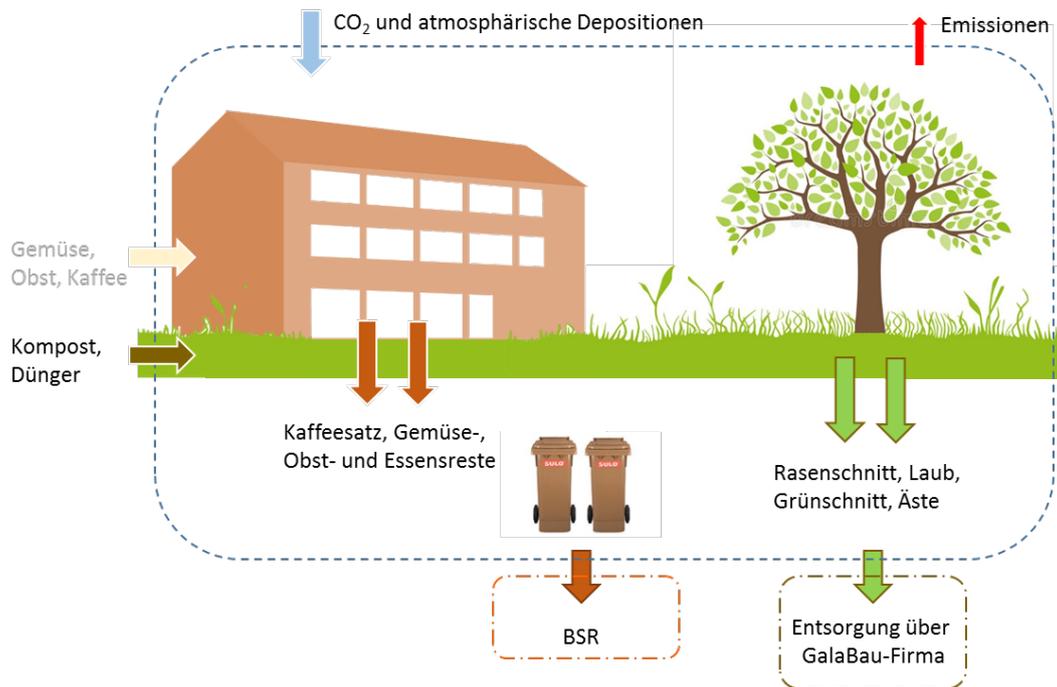


Abbildung 41: Schematische Darstellung des Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalts des Umweltbildungszentrums Berlin und Darstellung des Ist-Zustandes (Entsorgung), Pfeile weisen auf den Stoffstrom der Elemente in und aus dem System hin

In Tabelle 45 sind die Stoffströme mengenmäßig erfasst. Im Folgenden werden die zugrundeliegenden Teilprozesse näher dargestellt und erläutert.

Im Jahr fallen durch Pflegemaßnahmen durchschnittlich 5 m³ Rasenschnitt, 8 m³ Laub und 2 m³ Astschnitt aus dem Außengelände an. Rasenschnitt und Laub sowie der größte Teil des Holzes wird entsorgt. Damit verlassen 553 kg C, 13 kg N, 1,7 kg P und 9 kg K das System UBB. Ein Teil des Holzes wird für Lagerfeuer genutzt. Dabei werden 40 kg C freigesetzt sowie über die Verbrennung und Entsorgung der Asche weitere 0,6 kg N, 0,1 kg P und 0,3 kg K dem System entzogen. Das aufgenommene CO₂ durch die pflanzliche Biomasse (ca. 1.500 kg) wird damit ausgeglichen.

Aus dem Küchenbereich fallen durchschnittlich 2 m³ unverarbeitete Gemüse- und Obstreste pro Jahr an. Die Bilanz der Küchenabfälle ist ausgeglichen, da im vorliegenden Szenario alle Küchenabfälle entsorgt werden und sich somit In- und Output aufheben.

Die extern zugeführten Materialien (Kompost, Dünger) werden teilweise über mehrere Jahre umgesetzt. Ein Teil geht dabei in den Bodenvorrat über und erhöht z.B. temporär die im System gespeicherten Kohlenstoff- und Nährstoffvorräte. Ein weiterer Teil wird über die Pflanzen entsorgt. Bei der Nutzung kommt es durch Mineralisierung und Emissionen zu Verlusten an C, N, P und K. Insgesamt wird ein Gleichgewicht zwischen Zufuhr und Mineralisierung sowie durch die Entsorgung der Pflanzenreste angenommen.

Die Einträge aus der Luft (Deposition) betragen für Stickstoff ca. 4,5 kg/a. Phosphoreinträge werden mit ca. 0,5 kg angesetzt. Kalium wird über atmosphärische Deposition in Höhe von 0,5 kg eingetragen.

Tabelle 45: Jährliche In- und Outputströme, dargestellt als Massenbilanz und Nährstoffbilanz C, N, P und K (Bilanzzeitraum 2018/2019)

Prozess	Bemerkung	Vol. (m ³)	Masse (kg) FS	WG (%)	Masse (kg) TS	C (kg) TS	N (kg) TS	P (kg) TS	K (kg) TS	Quellen für CNPK
Kompost			25	30	17,5	2,85	0,09	0,01	0,02	a
Dünger			50	5	47,5	16,57	4,28	0,62	1,97	b
Küchenabfälle*	Obst-, Gemüse- & Essensreste, Eierschalen, Kaffeesatz etc.	2	1.300	69	403	161	7,42	2,34	10,1	c
atmosphärische Depositionen	Nährstoffeinträge (NPK)		8		8		4,50	0,50	3,00	d
CO ₂	Biomasseneubildung		1.476		1.476	553				e
Gesamt Input			1952		1952	733	16,3	3,47	15,1	
Laub	Mischlaub	8	800	17	664	312	5,25	0,73	2,99	c
Rasenschnitt	Wiesenmahd	5	750	62	285	120	6,24	0,77	4,56	c
Holz	Ast- & Strauchschnitt	1,5	300	16	252	121	1,69	0,18	1,01	c
Biotonne	Obst-, Gemüse- & Essensreste, Eierschalen, Kaffeesatz etc.	2	1.300	69	403	161	7,42	2,34	10,1	c
THG (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, NH ₃)	Abbau und Lagerfeuer	0,5	100	16	84	40	0,56	0,06	0,34	e
Sauerstoff	Photosynthese				275					e
Gesamt Output			1963		1963	754	21,2	4,08	19,0	
Saldo	Kg (Abweichung von Input)		11		20,90	4,87	0,61	4		
	% (Abweichung von Input)		0,6		2,9	29,9	17,7	25,9		

a) https://images.obl.de/PROD/DE/document/123/123796_specification_1.pdf

b) https://images.obl.de/PROD/AT/document/439/439145_manual_1.pdf

c) Eigene Analyse

d) Für die Stickstoffeinträge wurden Zahlen des UBA (2018, S. 126) herangezogen, die für das Untersuchungsgebiet einen Stickstoffeintrag von 15kg N/ha a ausweise (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-10-17_texte_79-2018_pinet3.pdf) / Phosphoreinträge werden abgeleitet von Berthold et al (2019) mit 1,5kg P/ha a angegeben. (<https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-019-0208-y>) / Kalium wird über atmosphärische Deposition Freiland mit 1 kg/ha a und im Bestand bei 18 kg/ha a angegeben und für das UBB als Mittel von 10 kg/ha a angesetzt. (<https://fawf.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/FUM/luftschadstoffe/dep0/110/3.html>)

e) Berechnet aus eigenen Analysen

7.1.2 Stoffstromszenarium und Massenbilanz Eigenverwertung und Vergleich mit Entsorgung

Durch die Umstellung zu einer Eigenverwertung der anfallenden organischen Reststoffe (Abbildung 42) entfallen ein Großteil der Entsorgungen. Die vorher entsorgte Menge an Küchenabfällen hat sich im neuen Stoffstrommodell halbiert. Ebenso hat sich die Entsorgung aus dem Gartenbereich von Laub, Rasenschnitt und Holz stark vermindert. Dies spiegelt sich in der Kohlenstoff- und Nährstoffbilanz wieder.

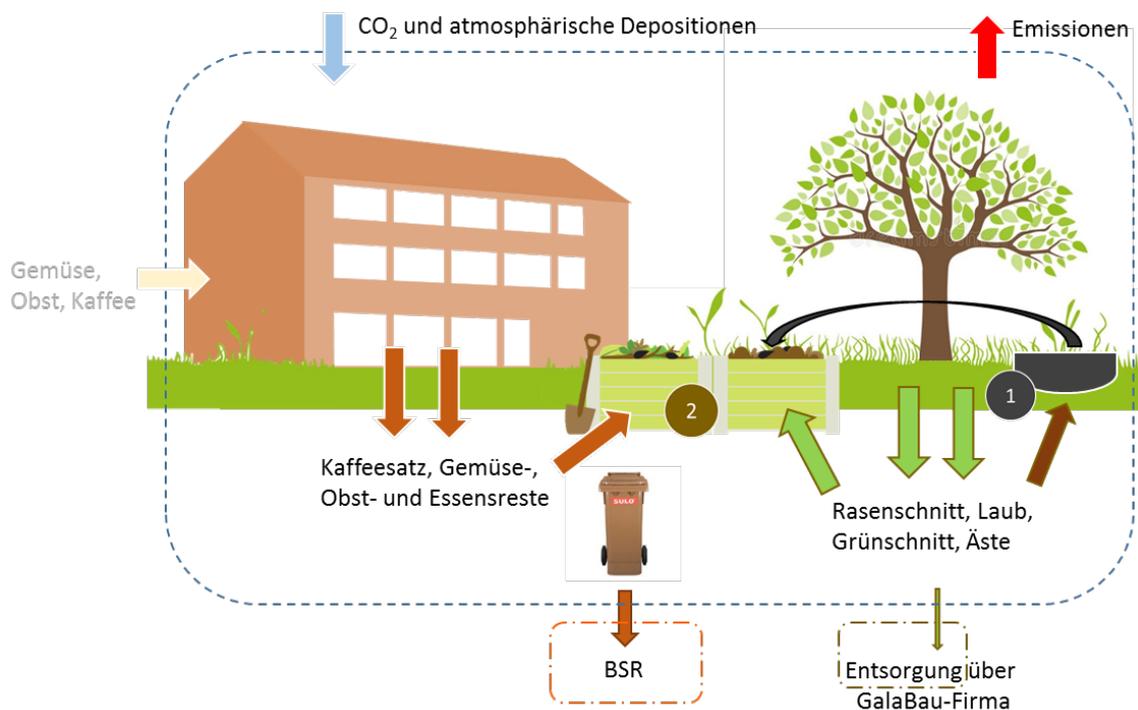


Abbildung 42: Schematische Darstellung des Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalts nach erfolgreicher Kreislaufschließung und Eigenverwertung organischer Reststoffe zu Pflanzenkohle (1) und Kompost (2), Pfeile weisen auf den Stoffstrom der Elemente im sowie in und aus dem System hin

Die Einträge aus der Atmosphäre bleiben, wie die Mengen der entnommenen Biomasse, konstant. Der Einkauf reduziert sich durch den wegfallenden externen Kompost und Dünger. Pro Jahr werden dadurch noch durchschnittlich 714 kg C, 12 kg N, 3 kg P und 13 kg K in das System UBB eingetragen/eingeführt.

Die holzigen Pflanzenreste werden als Strukturmaterial zur Kompostierung (ca. 130 kg TS) und, wie zuvor auch, als Holz für Lagerfeuer genutzt (ca. 125 kg TS). Der Unterschied zum Grundscenario im Prozess Lagerfeuer besteht darin, dass jetzt gleichzeitig Pflanzenkohle (25 kg TS) durch frühzeitiges Ablöschen der Glut gewonnen wird.

Die Hälfte der Küchenabfälle, ein Viertel des Laubes und der gesamte Rasenschnitt werden kompostiert. Die erzeugte Pflanzenkohle wird dabei als Zuschlagstoff verwendet.

In Tabelle 46 und Tabelle 47 sind die In- und Outputströme sowie die Massenbilanz dargestellt.

Tabelle 46: In- und Outputströme im Szenario Eigenverwertung, dargestellt als Massenbilanz und Nährstoffbilanz C, N, P und K

Prozess	Bemerkung	Vol. (m³)	Masse (kg) FS	WG (%)	Masse (kg) TS	C (kg) TS	N (kg) TS	P (kg) TS	K (kg) TS	Quellen für CNPK	
Input	Küchenabfälle*	2	1.300	69	403	161	7,42	2,34	10,1	a	
	atmosphärische Depositionen		8		8		4,50	0,50	3,00	b	
	CO ₂		1.476		1.476	553				c	
	Gesamt Input				1.887	714	12	3	13		
Eigenverwertung	zu Pflanzenkohlekompost	1	847	40	508	214	9,35	2,54	11,2	siehe Tab. 47	
Output	Biotonne	1	650	69	202	81	3,71	1,17	5,0	a	
	Laub	6	600	17	498	234	3,93	0,55	2,24	a	
	THG (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, NH ₃)				481	226	4,16	0,00	0,00	Siehe Tab. 47	
	Sauerstoff				102	100	1,78	0,03	0,78		
	Gesamt Output				1.557	641	14	2	8	c	
	Saldo	Kg (Abweichung von Input)				-330	-73	2	-1	-5	
		% (Abweichung von Input)				-15,0	-8,6	9,5	-26,0	-26,1	

* Als Inputmaterial werden hier sämtliche Küchenabfälle aus der Hotel- und Lehrküche verstanden, da die Menge an eingekauften Lebensmitteln in der Bilanz keine Rolle spielen (vgl. Grundszenario).

- Eigene Analyse
- Für die Stickstoffeinträge wurden Zahlen des UBA (2018, S. 126) herangezogen, die für das Untersuchungsgebiet einen Stickstoffeintrag von 15kg N/ha a ausweisen. (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-10-17_texte_79-2018_pineti3.pdf) / Phosphoreinträge werden abgeleitet von Berthold et al. (2019) mit 1,5kg P/ha a angegeben. (<https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-019-0208-y>) / Kalium wird über atmosphärische Deposition Freiland mit 1,3 kg/ha a und im Bestand bei 18 kg/ha a angegeben und für das UBB als Mittel von 10 kg/ha a angesetzt. (<https://fawf.wald-rip.de/fileadmin/webseite/fawfseiten/fawf/FUM/luftschadstoffe/depo/110/3.html>)
- Berechnet aus eigenen Analysen

Tabelle 47: Massenbilanz und Nährstoffbilanz C, N, P und K der Herstellung von Pflanzenkohle und Kompost im UBB

Prozess	Input	Output	Volumen (m ³)	Masse (kg)	WG (%)	Masse (kg) TS	C (kg) TS	N (kg) TS	P (kg) TS	K (kg) TS	Quellen für CNPK
Lagerfeuer & PK (1)	Holz		0,75	150	16	126	60	0,84	0,09	0,50	a
	Pflanzenkohle		0,126	50,4	50	25,2	20,16	0,1764	0,04536	0,2394	b
	Asche		0,005	2,5	20	2	0,024	0,0006	0,08	0,44	c
		Freisetzung (Atmosphäre)				99	40	1	k. A.	k. A.	b
Kompostierung (2)	Pflanzenkohle		0,126	50,4	50	25,2	20,16	0,1764	0,04536	0,2394	siehe Output
	Asche					2	0,024	0,0006	0,0777	0,441	
	Laub		2	200	17	166	78	1,31	0,18	0,75	a
	Rasenschnitt		5	750	62	285	120	6,24	0,77	4,56	a
	Holz		0,75	150	16	126	60	0,84	0,09	0,50	a
	Küchenabfälle		1	650	69	202	81	3,71	1,17	5,0	a
	Kompost			1434	717	45	394	190	7,26	1,97	8,7
		Freisetzung (Atmosphäre)				411	169	5,03	0,00	0,00	b
Freisetzung (Atmosphäre) Prozess 1 und 2							510	210	6	0	0

- a) Eigene Analyse
b) Berechnet aus eigenen Analysen
c) https://www.kompost.de/uploads/media/Zumischung_von_Holzasche_bei_der_Kompostierung_.pdf

Die Kompostierung mit Pflanzenkohle zeigte im Kompostversuch eine verringerte Emission an Methan, Lachgas und Ammoniak sowie einen geringeren Abbau von organischer Substanz als ohne Pflanzenkohle (vgl. Kap. 6.1.2). In der Eigenkompostierung mit Pflanzenkohle werden pro Jahr aus ca. 1.750 kg Biomasse (FS) und 50 kg Pflanzenkohle (FS) ca. 720 kg Pflanzenkohlekompost (TS). Dabei werden insgesamt 170 kg C als CO₂ und CH₄ und 5 kg N als N₂O und NH₃ freigesetzt. Eine Auswaschung (Austrag mit Regenwasser ins Grundwasser) wurde nicht betrachtet, da der Kompost abgedeckt ist, und wird vernachlässigt. Durch das Lagerfeuer werden durch das frühzeitige Ablöschen noch 40 kg C und 1 kg N freigesetzt (Tabelle 47).

Kompost ist der ideale Dünger für das Gartenbeet und den Rasen. Er liefert wichtige Nährstoffe und sorgt für ein verbessertes Pflanzenwachstum und unterstützt die Bodenfauna. Eine Kompostgabe von 1 - 2 Liter pro m² über das Jahr gilt als genereller Richtwert. Im UBB könnte somit der gesamte Kompost zur Düngung und Bodenverbesserung eingesetzt werden. Die Anwendung des Kompostes führt durch Abbau und Mineralisierungsprozesse ebenfalls zu Emissionen. Nach Reinhold (2013) werden in einem lehmigen Sandboden Wiederfindungsraten von 47 % C_{org} bei der Kompostanwendung eines Biogut-Fertigkompostes erzielt. Für Stickstoff wurde ein Verlust von 19 % N bei regelmäßiger Kompostanwendung ermittelt. Übertragen auf das UBB müssen damit ca. 89 kg C und 1,4 kg N als Verlust in die Bilanz mit aufgenommen werden. Für Kalium und Phosphor werden durch Auswaschung 1 % Verluste für P (0,02 kg) und 7 % Verlust für K (0,61 kg) angesetzt (vgl. Tabelle 18, Kap. 6.1.2.3).

Durch die notwendige Entsorgung der restlichen, für die Kompostierung ungeeigneten, Küchenabfällen und Laub verlassen 315 kg C, 7,6 kg N, 1,7 kg P und 7,2 kg K das System UBB.

Der *Vergleich beider Bilanzen* in Tabelle 48 zeigt, dass durch die Eigenverwertung Kohlenstoff im UBB gespeichert werden kann, der Verlust an Stickstoff verringert wird und Nährstoffe wie Phosphor und Kalium mehr als ausreichend zur Verfügung gestellt werden können, was den Pflanzen (Gemüse, Rasen, Blumen) eine bessere Wachstumsgrundlage bietet. Im UBB müsste auf langer Sicht nur eine zusätzliche organische Stickstoffdüngung (z. B. Hornspäne) erfolgen.

Tabelle 48: Vergleich der Nährstoff und Kohlenstoffmassenbilanz im UBB (positiv: verlässt das System, negativ: verbleibt im System)

Bilanz	Masse (%)	C (%)	N (%)	P (%)	K (%)
Entsorgung	0,0	2,6	29,4	17,5	25,8
Verwertung	-19,7	-17,1	13,8	-30,2	-31,0

7.1.3 CO₂-Bilanz der Entsorgung und Eigenverwertung

Als wesentliche Bilanzbereiche in der vorliegenden Untersuchung am UBB werden die Verwertung der Kaffeesatz, Gemüse- und Obstreste (Biotonne) durch die BSR zu Biogas und der Weiterverarbeitung der Gärreste in der Kompostierung sowie die Verwertung von Grünschnittresten aus der Gartenpflege (Grünanlagenpflege) zu Kompost betrachtet. Darüber hinaus wird für den eingekauften Kompost und Dünger der produktspezifische Carbon Footprint erfasst.

Dies wird den durch die Eigenverwertung hervorgerufenen Effekten gegenübergestellt. Dabei gehen insbesondere die bei der Kompostierung und Pflanzenkohleerzeugung auftretenden THG-Emissionen in die Berechnung ein.

7.1.3.1 Ausgangslage (Ist-Zustand Entsorgung)

Die vor Projektbeginn angetroffenen Stoffströme wurden im vorigen Kapitel 7.1.1 dargestellt und dienen als Grundlage der weiteren Betrachtungen und Vergleiche der neustrukturierten Stoffströme nach Einführung der Eigenkompostierung.

Im Folgenden werden die einzelnen Kategorien wie Einkauf, Entsorgung und Kompostierung etc. hinsichtlich der Klimawirkung (CO₂-Bilanz) betrachtet.

Das UBB bezog den externen **Kompost** aus dem nächst gelegenen Baumarkt. Für die Bilanzierung wird angenommen, dass dieser Kompost in Berlin hergestellt wurde. Dabei wird nach ifeu (2019) für die Kompostierung im Raum Berlin die Emissionen auf Basis einer Tonne eingesetzten Biomassen angesetzt. Da im Durchschnitt für eine Tonne Fertigkompost 2,5 Tonnen Biomasse eingesetzt werden müssen, ergibt sich die Belastung für eine Tonne Fertigkompost aus dem zweieinhalbfachen der durchschnittlichen 70 kg CO_{2eq} für die Behandlung von Biomasse in der Kompostierung (incl. Gutschrift). Die Herstellung von 1 Tonne Kompost verursacht demnach 175 kg CO_{2eq}. Der Transport und die Emissionen für die Bereitstellung des Produktes im Baumarkt werden vernachlässigt. Für das UBB werden für 40 kg Kompost 7 kg CO_{2eq} verursacht.

Die Herstellung von **Dünger** verursachen nach Ifeu (2008) für Stickstoffdünger 6,5 kg CO_{2eq}/ kg N, für Phosphordünger 1,2 kg CO_{2eq}/ kg P und für Kaliumdünger 0,67 kg CO_{2eq}/ kg K. Für die 50 kg Dünger entstehen so Gesamtemissionen von 30 kg CO_{2eq}.

Die Entsorgung der pflanzlichen Reststoffe (Laub, Rasenschnitt, Ast- und Strauchschnitt) werden nach ifeu (2019) nach Tabelle 43 bewertet. Demnach entstehen für die **Entsorgung** und Verwertung (Kompostierung) von 800 kg Laub ca. 42 kg CO_{2eq} und für 750 kg Rasenschnitt ca. 75 kg CO_{2eq}. Ast- und Strauchschnitt wird ebenfalls kompostiert und wird für 300 kg mit einer Belastung von 16 kg CO_{2eq} bilanziert. Ebenso ist die Verwertung von Küchenabfällen durch Vergärung und der weiteren Nutzung klimafreundlich bewertet. Für das UBB erzeugt diese Verwertung eine Gutschrift von 176 kg.

Der Nutzung von Holz für **Lagerfeuer** erzeugt nach Haakson und Kvingedat (2001) eine Belastung von 0,15 kg CO_{2eq} pro Kg Holz. Für das UBB werden danach 15,5 kg CO_{2eq} angesetzt. Die einzelnen Daten sind in Tabelle 49 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 49: Vergleich der Nährstoff und Kohlenstoffmassenbilanz im UBB (positiv: verlässt das System, negativ: verbleibt im System)

Prozess	Bemerkung	Masse (kg)	CO _{2eq} (kg)		
			Belastung	Entlastung	Saldo (Netto)
Kompost	Input	40	k. A.	k. A.	7,0
Dünger	Input	50	k. A.	k. A.	29,9
Laub	Output	800	130,4	88,8	41,6
Rasenschnitt	Output	750	115,5	40,5	75,0
Holz	Output	300	35,1	30,6	4,5
Biotonne	Output	1.300	170,3	345,8	-175,5
Lagerfeuer	intern	100	15,5	0,0	15,5
Summe					- 2,1

Insgesamt ist das Szenario Entsorgung weitgehend ausgeglichen. Die Summe aller betrachteten Prozesse ergibt eine geringe Entlastung von 2 kg CO_{2eq} pro Jahr.

7.1.3.2 Eigenverwertung zu Pflanzenkohlekompost

Als Grundlage der weiteren Betrachtungen dienen die veränderten Stoffströme wie im vorigen Kapitel 7.1.2 dargestellt.

Das UBB bezieht im Szenario Eigenverwertung keinen Kompost und keinen Dünger mehr, damit entfallen die im Szenario Entsorgung aufgeführten Emissionen.

Die Entsorgung der pflanzlichen Reststoffe begrenzt sich nur noch auf einen Teil des Laubes. Für die **Entsorgung** und Verwertung (Kompostierung) von nur noch 600 kg Laub werden ca. 31 kg CO_{2eq} emittiert. Ebenso ist die Entsorgung und Verwertung von Küchenabfällen auf die Hälfte reduziert. Durch die Vergärung und der weiteren Nutzung werden noch 88 kg CO_{2eq} gutgeschrieben (Werte nach ifeu (2019)).

Die Nutzung von Holz für **Lagerfeuer** und der gleichzeitigen **Herstellung von Pflanzenkohle** wird mit den CO_{2eq}-Werten von Haakson und Kvingedat (2001) und der Anrechenbarkeit von Pflanzenkohle als CO₂-Senke berechnet. Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) führt in seiner Richtlinie für ein nationales Treibhausgasinventar die Anrechenbarkeit von Pflanzenkohle für die Kohlenstoffsequestrierung an. Darin wird ausgeführt, dass 89 % (+/- 13%) des ursprünglichen Kohlenstoffes in der Pflanzenkohle für mehr als 100 Jahre stabil verbleibt, wenn eine Karbonisierungstemperatur von 600 °C vorliegt (IPCC, 2019; TABLE 4AP.2). Daran orientiert wird für Pflanzenkohle, gewonnen im Lagerfeuerprozess, ein Stabilitätswert von 76 % (unterer Schwankungsbereich) angesetzt.

Die Stabilität von Pflanzenkohle von mehr als 100 Jahren wurde bereits in einer 2016 erschienen Studie des Umweltbundesamts angeführt: „Aufgrund der bisher vorliegenden Ergebnisse können für Pyrolysekohlen unter Freilandbedingungen mittlere Verweilzeiten von mehr als 100 bis über 1000 Jahre angenommen werden.“ (UBA, 2016, S. 46). Aus einer Tonne Holz (FS) entsteht somit eine Klimaentlastung (Negativemissionen von 232 kg CO_{2eq}, Tabelle 50).

Tabelle 50: CO_{2eq} Prozess Pflanzenkohle (Lagerfeuer) im System UBB, Szenario Verwertung

	FS Holz (kg)	WG (%)	TS Holz (kg)	C Holz (kg)	C PK ¹ (kg)	Stabilität (%) ²	CO ₂ -Faktor	CO ₂ gespeichert (kg/Mg Holz)	CO _{2eq} Freisetzung (kg/ Mg Holz) ³	Saldo CO _{2eq} (kg/ Mg Holz)
PK	1000	16	840	420	139	76	3,67	386,6	154,5	-232,1

¹ aus 1 kg Kohlenstoff werden mittels frühzeitigem Ablöschen der Glut ca. 1/3 Pflanzenkohle, 2 Stabilitätsfaktor abgeleitet aus IPCC, 2019; TABLE 4AP.2, ³ Ansatz von Haakson und Kvingedat (2001) für die Emissionen bei Lagerfeuer

Für das UBB wird demnach eine Gutschrift von 35 kg CO_{2eq} angesetzt (ausgehend von 150 kg verwertetes Holz für PK-Herstellung/Lagerfeuer).

Für die **Eigenkompostierung mit Pflanzenkohle** werden Werte von ifeu (2019) und Ergebnisse aus Kap. 6.1.2.2 herangezogen. Nach ifeu (2019) belastet die Eigenkompostierung das Klima mit 15 kg CO_{2eq} pro Tonne Grünabfall. Die Ergebnisse des Kompostversuches haben gezeigt, dass durch Zugabe von PK eine Verminderung der CO_{2eq} um 32% erzielt wurde. Berücksichtigt man dies bei der Berechnung der Klimabelastung, so wird diese von 117 kg CO_{2eq} auf 83 kg CO_{2eq} pro Tonne Grünabfall gesenkt. Die Entlastung steigt zusätzlich, durch den erhöhten Humusaufbau von 102 auf 128 kg CO_{2eq} pro Tonne Grünabfall. Insgesamt erzielt die Eigenkompostierung mit PK damit eine Klimaentlastung von insgesamt 45 kg CO_{2eq} pro Tonne Grünabfall.

Für das UBB kann damit eine weitere Gutschrift von 78 kg CO_{2eq} angesetzt werden (ausgehend von 1.750 kg verwertete Grünabfälle für Kompostierung).

Die einzelnen Daten sind in Tabelle 51 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 51: CO_{2eq} einzelner Prozesse im System UBB, Szenario Verwertung

Prozess	Bemerkung	Masse (kg)	CO _{2eq} (kg)		
			Belastung	Entlastung	Saldo (Netto)
Kompost	Input	0	--	--	0,0
Dünger	Input	0	--	--	0,0
Laub	Output	600	98	67	31
Rasenschnitt	Output	0	--	--	0,0
Holz	Output	0	--	--	0,0
Biotonne	Output	650	85	173	-88
Pflanzenkohle	intern	150	23	58	-35
Kompost	intern	1750	145	223	-78
Summe					-170

Insgesamt ist das Szenario Verwertung klimapositiv, d. h. die Entlastungen überwiegen die Belastungen. Die Summe aller betrachteten Prozesse ergibt eine gesamte Entlastung von 170 kg CO_{2eq} pro Jahr.

7.1.3.3 Vergleich Entsorgung zu Eigenverwertung

Die Veränderung hin zu einer Eigenverwertung verbessert die CO₂-Bilanz hinsichtlich der untersuchten Entsorgungs-/Verwertungswege des UBB beträchtlich.

Das Szenario Entsorgung ergibt eine geringe Entlastung von 2 kg CO_{2eq} pro Jahr. Die Umstellung hin zur Eigenverwertung führt durch die Herstellung von Pflanzenkohle und durch die Kompostierung mit Pflanzenkohle zu einer Entlastung von 170 kg CO_{2eq} pro Jahr (Abbildung 43).

Diese Bilanz ist stark anhängig von der Verwertung des Holzes. Würde das anfallende Holz im Szenario Entsorgung theoretisch einer energetischen Verwertung zugeführt, würde sich die Entlastung auf 123 kg CO_{2eq} erhöhen, da die energetische Verwertung von Holz mit minus 389 CO_{2eq}/Mg berechnet wird. Eine Verbesserung ist dennoch bilanzierbar.

Ein weiterer Punkt ist die Herstellung von Pflanzenkohle durch das frühe Ablöschen von Lagerfeuer. Hier könnte durch den Kauf eines Kon-Tiki⁹, der explizit für die Herstellung von Pflanzenkohle entwickelt wurde, eine größere Menge an Pflanzenkohle gewonnen werden. Andererseits ist die Möglichkeit von Lagerfeuern stark abhängig von den klimatischen Bedingungen. Bei starker Trockenheit ist es durch die Nähe zum Forst untersagt Feuerschalen etc. zu betreiben. Damit könnte dann auch keine Pflanzenkohle erzeugt werden. Die Pflanzenkohle müsste dann eingekauft und das Holz würde kompostiert werden. Die Gutschrift aus der externen Herstellung der Pflanzenkohle würde jedoch ebenfalls in die Bilanz des UBB eingerechnet und zu keiner großen Verschiebung bei gleicher Menge führen. Würde jedoch mehr Pflanzenkohle eingekauft, würde auch die Entlastung steigen, da im UBB die Pflanzenkohle angewendet wird und schließlich als Kohlenstoffspeicher in den Boden gelangt und dort als Senke dient.

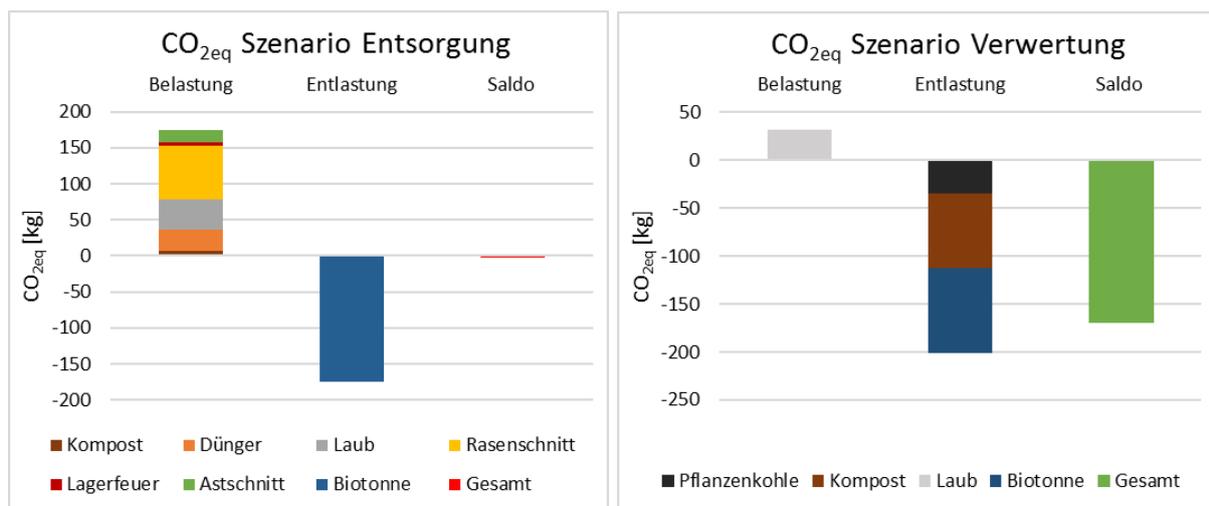


Abbildung 43: Vergleich der CO_{2eq}-Bilanzen der Szenarien Entsorgung und Eigenverwertung im UBB

⁹ <http://www.ithaka-institut.org/de/kon-tiki> (letzter Zugriff: 26.10.2020)

7.2 Gut Hellersdorf

7.2.1 Stoffstromanalyse und Massenbilanz Kompostierung

Das Ziel der Kompostherstellung im Gut Hellersdorf war es Stoffströme zu verwerten, die ursprünglich einer energetischen Verwertung zugeführt wurden. Der systemische Ansatz findet im Gut Hellersdorf keine Anwendung, da der Focus auf der Herstellung eines Produktes liegt. Die Massenbilanz wird auf die Inputmaterialien und den Output Kompost bezogen.

Zur Herstellung des Kompostes werden im Gut Hellersdorf Gemüse- und Obstabfälle der Tafel Berlin e. V. und Holzhackschnitzel aus der Grünanlagenpflege sowie als Zuschlagstoff Pflanzkohle verwendet (Abbildung 44). Als weiteres Inputmaterial wird die zugeführte Energie in Form des Dieserverbrauches eines Radladers und des Transportes der Inputmaterialien betrachtet. Als Output wird der Kompost und die während des Kompostprozesses freigesetzten Treibhausgase (THG) incl. der Abgase aus den Transport- und Umsetzungsprozessen betrachtet. Freigesetztes Wasser geht ebenfalls in die Massenbilanz ein.

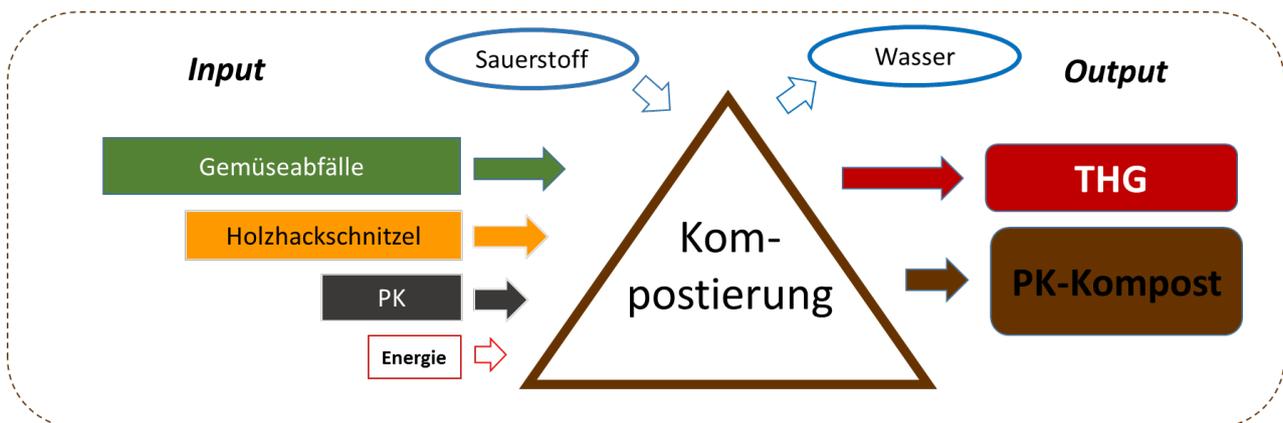


Abbildung 44: Vereinfachtes Stoffstrommodell des Kompostprozesses mit In- und Outputstellen

Um das theoretische Potenzial an Biomasse zu erfassen, wurden auf Grundlage der Entsorgungsintervalle der Tafel Berlin e. V. und den anfallenden Biomassen aus der Grünflächenpflege die maximal verfügbare Biomasse abgeleitet.

Die betrachtete vorhergehende Nutzung, die der Herstellung von PK-Kompost vergleichend gegenübergestellt wird, ist:

- a) Berliner Bioabfälle aus der Biotonne zur Erzeugung von Biogas (Energie) und Gärreste (Dünger) und
- b) Verbrennung von Baum- und Strauchschnitt (Energie).

In Tabelle 52 sind die Stoffströme mengenmäßig erfasst. Dabei werden die Stoffströme auf die verarbeitbare Menge an Biomasse im Gut Hellersdorf als Referenzgröße ausgelegt. Pro Jahr können 460 m³ Bioabfälle und 230 m³ Holzabfälle in Form von Hackschnitzel zusammen

kompostiert werden. Durch die Versuche wurde eine Pflanzenkohlemenge von 2,5 Vol.-% als Zielgröße eruiert. Mengenmäßig sind das 17,25 m³ die für die Herstellung von PK-Kompost eingesetzt werden müssen.

Aus diesen ca. 700 m³ Ausgangsmaterial (380 Mg Frischsubstanz) werden im Kompostierprozess ca. 120 – 210 m³ Pflanzenkohle-Kompost (PKK) (90 – 130 Mg Frischsubstanz). Das heißt, ca. 2/3 der ursprünglichen Frischmasse geht, bedingt durch den hohen Wassergehalt der Gemüse-/Obstreste und der vielen holzigen Anteile verloren bzw. wird ausgesiebt. Durch den Abbau des Kompostes werden 185 Mg Wasser, 51 Mg CO₂ und 1,4 Mg weiterer THG freigesetzt. Durch das Absieben des Kompostes in handelsübliche Korngrößen werden je nach Siebgröße zusätzlich 40 – 80 Mg Überkorn (Holz) ausgesiebt. Dieses Überkorn beinhaltet neben Holz auch vererdete Bestandteile. Zusammen mit einem kleinen Teil des fertigen Kompostes wird dies wieder den Kompostprozess zugeführt. Für die Berechnungen werden dafür 20 m³ Kompost wieder in den Prozess integriert. Für den Verkauf stehen damit 100 bis 190 m³ (entspricht 70 – 110 Mg) PK-Kompost pro Jahr zur Verfügung. Das Verhältnis von Input zu Output (verkaufsfähiges Produkt) beträgt damit ca. 4:1 (Abbildung 45).

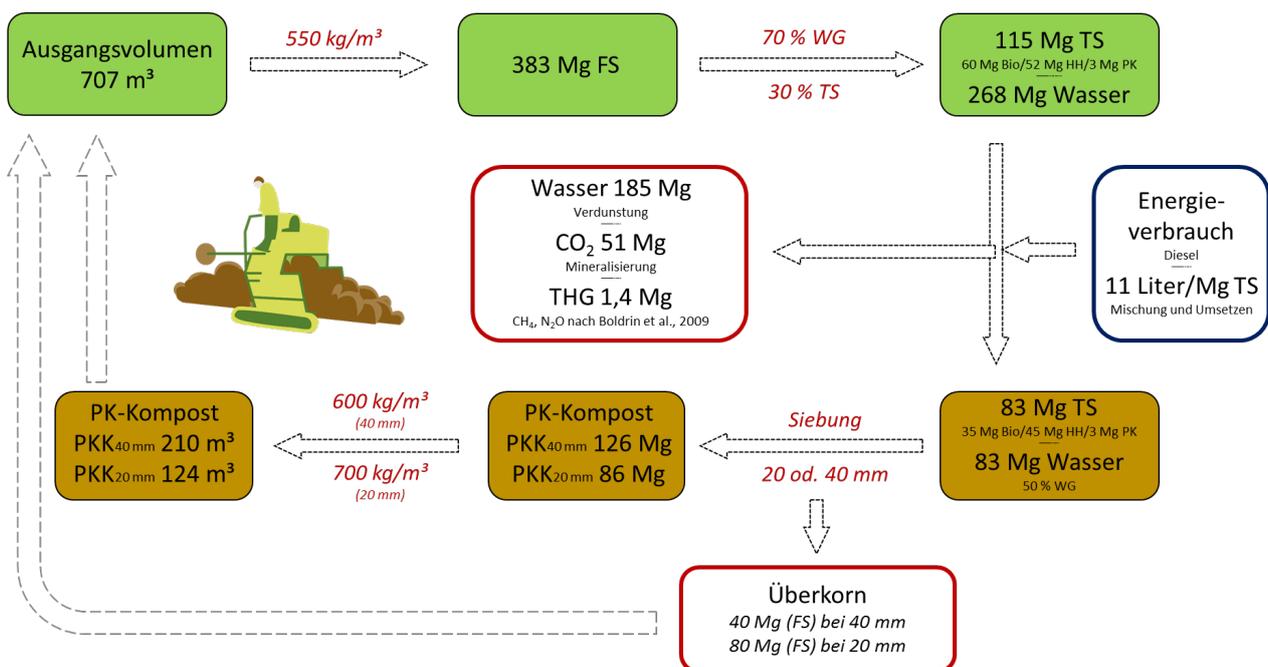


Abbildung 45: Massenbilanz des Kompostprozesses am Standort Gut Hellersdorf

Da die Holzhackschnitzel im Prozess nur teilweise umgesetzt und ein Großteil am Ende wieder ausgesiebt werden, und wieder für den Prozess der Kompostierung genutzt werden können, besteht ein wachsender Überhang an Holzabfällen. Für die Bilanzierung werden daher zwei Unterszenarien betrachtet. Diese Holzabfälle können a) wieder entsorgt werden oder b) für eine Pflanzenkohleherstellung vor Ort eingesetzt werden.

Tabelle 52: Jährliche In- und Outputströme, dargestellt als Massenbilanz und Nährstoffbilanz C, N, P und K (Grundlage Kapazität Kompostplatz und wissenschaftliche Untersuchungen sowie Erfahrungsberichte Betreiber Prinzessinnengarten)

Ausgangsmaterial/ Produkt	Bemerkung	Masse				Quellen für CNPK				
		Vol. (m³)	Masse (Mg FS)	WG (%)	Masse (Mg TS)	C (Mg TS)	N (Mg TS)	P (kg TS)	K (kg TS)	
Input										
Bioabfälle	Obst- & Gemüsereste etc.	460	299	79,9	60,0	25,6	0,95	157	1379	a
Holzabfälle	Hackschnitzel	230	80,5	35,4	52,0	26,0	0,50	58,8	216	a
Pflanzenkohle	2,5 Vol.-%	17,3	3,98	20	3,19	2,99	0,012	1,34	11,8	a
Sauerstoff	Mineralisierungsprozess		37,3		37,3					b
Gesamt Input			421	63,74	153	55	1,5	217	1607	
Output										
Pflanzenkohlekompost (PKK)	Körnung 40 mm	210	126	50,0	63,0	25,0	1,03	145	838	a
THG	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, NH ₃		52,4		52,4	15,4	0,10			c
Wasser	Verdunstung & Sickerwasser		185		17,2	4,2	0,15	49,9	686	d
Überkorn	> 40 mm Korngröße	114	40,0	50,0	20,0	10,0	0,19	22,6	83,0	a
Gesamt Output			403		153	55	1,5	217	1607	

- Eigene Analyse
- Berechnet aus C-Abbau und der dafür notwendigen Sauerstoffmenge (Der Abbau von 1 kg C benötigt 2,67 kg O₂)
- Boldrin et al. (2009) und Cuhls et al. (2015), Mittelwerte aus Spannweite untersuchter Emissionen aus der offenen Kompostierung von Bio- und Grüngutabfällen (3.400 g/Mg CH₄, 242 g/Mg NH₃ und 100 g/Mg N₂O)
- Wasserverlust während des Kompostprozesses aus Verdunstung und der Entstehung von Sickerwasser. Bei Sickerwasser ist mit einem Austrag von CNPK zu rechnen. Die Werte für CNPK wurden berechnet aus der Differenz der Inputmenge und Summe aus Output PKK, THG und Überkorn (Siebrest)

7.2.2 Pflanzenkohleherstellung vor Ort

Die Nutzung von Holzhackschnitzeln aus Grünpflegematerial (Ast- und Strauchschnitt) zur Karbonisierung könnte vor Ort Wärme zur Beheizung von Gewächshäusern, zur Einspeisung in Nahwärmenetze und für Prozesswärme (Heißwasser) liefern sowie Pflanzenkohle, die direkt für die Kompostierung eingesetzt oder verkauft werden kann.

An Inputmaterial stehen vor Ort 52 Mg TS pro Jahr an Holzhackschnitzel zur Verfügung. Daraus können ca. 13 Mg Pflanzenkohle mit einem C-Gehalt > 80% und eine Wärme von 100.000 kWh erzeugt werden (ca. 1/4 bis 1/3-Auslastung (vgl. Tabelle 53).

Tabelle 53: Aufstellgrenzen für kleinere Compact-Converter Heizkessel der Firma BIOMACON

Typ	Grund- /Stellfläche Anlage	Inputmenge Biomasse	Output PK und Output/Input - Verhältnis	Wärmemenge
C40-F	1,9m x 4,6m = 10,3 m ²	20 - 32 kg/h FS = bis 256 t/a FS bei 8.000 h/a	4,1 - 6,2 kg/h PK = bis 49,6 t/a bei 8.000 h/a	200.000 - 320.000 kWh/a (25 - 40 kW * 8000 h/a)

Die Anlage könnte damit 4.000 h pro Jahr bei minimaler Biomassezufuhr in Betrieb sein und würde z. B. über die Wintermonate Wärme für die Beheizung von Gebäuden liefern und damit fossile Energieträger wie Heizöl und Erdgas ersetzen können. Eine Anlage dieser Größe könnte in Hochsee-Containern wie in Abbildung 46 Platz finden.

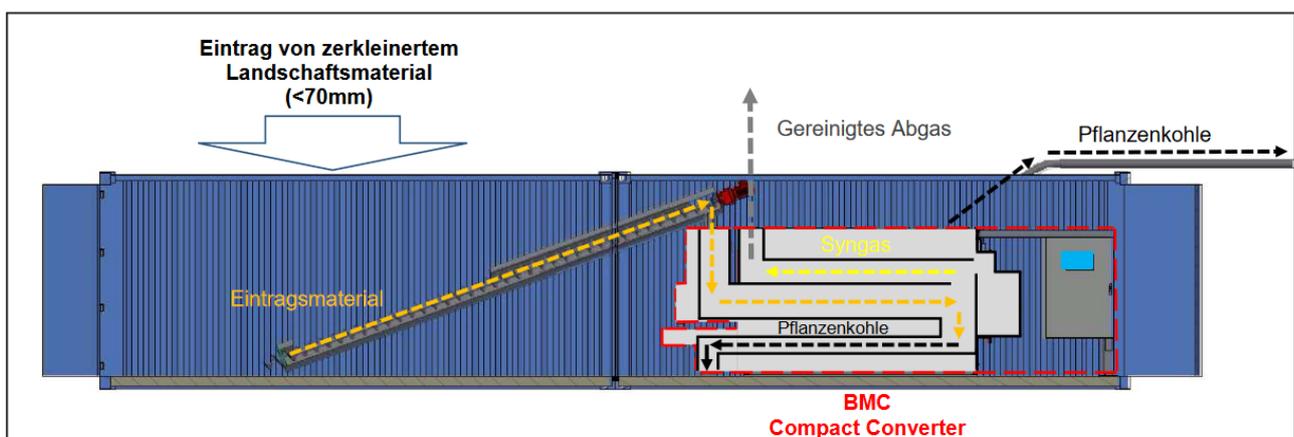


Abbildung 46: Compact Converter Prozess (Beispiel Container Lösung)

Die Bilanz der Karbonisierung ist in Abbildung 47 dargestellt. Aus 52 Mg TS Input mit einem C-Gehalt von 24,4 Mg und einem Energiegehalt von 265.650 kWh werden ca. 45 % des

Kohlenstoffes in der Pflanzenkohle gespeichert. Dies entspricht einen Energiegehalt von ca. 90.000 kWh und damit 34 % der Inputenergie.

Auf die Gasphase entfallen mit ca. 13 Mg C 55 % des Kohlenstoffs der zu Wärme (66 % von Inputenergie) umgesetzt wird. Dabei können 37,5 % als nutzbare Wärme ausgekoppelt werden. 28,5 % der Inputenergie gehen als Abgas verloren. Dieser Verlust könnte durch eine Rauchgasnutzung bei der Trocknung verringert werden.

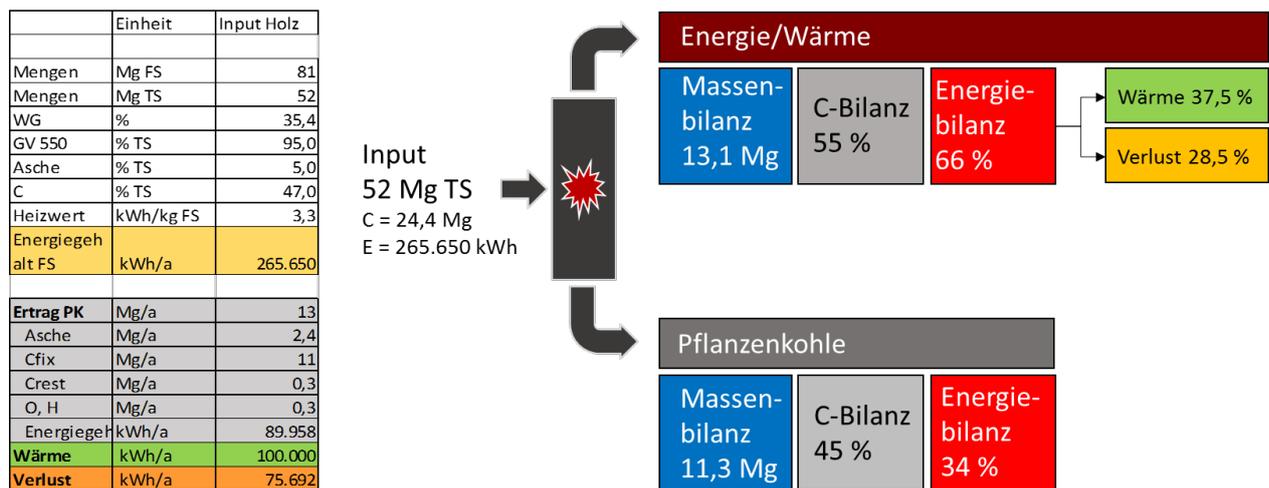


Abbildung 47: Bilanz des Karbonisierungsprozesses, ausgelegt auf die verfügbare Biomasse am Standort Gut Hellersdorf

Die aufgeführten Bilanzdaten werden in der weiteren CO₂-Bilanzierung aufgegriffen. Pflanzenkohle besitzt durch die stabile Speicherung eine hohes CO₂-Minderungspotential. Als stabiler Anteil, der für die CO₂-Bilanzierung berücksichtigt wird, wird der Parameter C_{fix} herangezogen. Am Standort Gut Hellersdorf könnten somit 41 Mg CO₂ vermieden werden. Zusätzlich könnten durch die Wärmenutzung durch Substitution von z. B. Erdgas weitere 22 Mg CO₂ vermieden werden (0,22 kg CO₂/kWh Erdgas¹⁰).

¹⁰ <https://www.klimaneutral-handeln.de/php/kompens-berechnen.php#rechner>

7.2.3 CO₂-Bilanz Kompostierung, PK-Herstellung, Energetische Nutzung und Vergleich

Als vergleichende Nutzung wird die Verwertung der Gemüse- und Obstreste (Biotonne) durch die BSR zu Biogas und der Weiterverarbeitung der Gärreste in der Kompostierung sowie die Verwertung von Grünschnittresten (Holz) zur Energiegewinnung mittels Verbrennung betrachtet.

Dies wird den durch die Kompostierung hervorgerufenen Effekten gegenübergestellt. Dabei gehen insbesondere die bei der Kompostierung und Pflanzenkohlerzeugung auftretenden THG-Emissionen und die Gutschriften in die Berechnung ein. Daraus abgeleitet wird der PCF errechnet.

7.2.3.1 Ausgangslage (Vergleichsszenario Biogas und Verbrennung)

Die vor Projektbeginn angetroffenen Stoffströme wurden im vorigen Kapitel 7.2.1 dargestellt und dienen als Grundlage der weiteren Betrachtungen und Vergleiche der neustrukturierten Stoffströme nach Einführung der Eigenkompostierung.

Für die Klimawirkung (CO₂-Bilanz) der Entsorgungsszenarien werden die Daten nach ifeu (2019) betrachtet (vgl. Tabelle 43, Kap. 7). Demnach entstehen für die **Entsorgung** auf den Weg der Biotonne bzw. Biogasverwertung, bezogen auf die Menge von 299 Mg Gemüse- und Obstabfälle, eine Belastung von 39 Mg CO_{2eq} und eine Entlastung von 79,5 Mg CO_{2eq}. Ebenso ist die Verwertung von Holzabfällen und deren energetische Nutzung klimafreundlich zu bewerten. Die für das Gut Hellersdorf bilanzierte Menge von 81 Mg holzige Reststoffe aus der Grünanlagenpflege werden 2,4 Mg CO_{2eq} an Belastungen und 34 Mg CO_{2eq} an Entlastungen berechnet. In der Summe sind beide Verwertungswege klimafreundlich mit einer Gesamtgutschrift von 72 Mg CO_{2eq} pro Jahr bilanziert (Tabelle 54).

Tabelle 54: CO_{2eq} einzelner Prozesse in Bezug auf die verarbeitbare Menge im Gut Hellersdorf, Szenario Entsorgung

Prozess	Bemerkung	Masse (Mg)	CO _{2eq} (kg)		
			Belastung	Entlastung	Saldo (Netto)
Holz (Baum- Strauchschnitt)	Energetische Nutzung	81	2,4	33,9	- 31,5
Biotonne (Ge- müse- und Ob- streste)	Energetische Nutzung (Bi- ogas BSR)	299	39,2	79,5	-40,4
Summe					- 71,9

7.2.3.2 Verwertung zu Pflanzenkohlekompost

Als Grundlage der weiteren Betrachtungen dienen die veränderten Stoffströme wie im vorigen Kapitel 7.2.1 und 7.2.2 dargestellt.

Bereitstellung Inputmaterialien

Die Abholung der Bioabfälle ist wöchentlich angestrebt. Während der Zeit der Lagerung setzen bereits Abbauprozesse ein, die mit 0,69 Mg CO_{2eq} berücksichtigt werden. Der Dieserverbrauch für den Transport der Bioabfälle von der Berliner Tafel bis zum Gut Hellersdorf wird berechnet aus der Entfernung incl. Leerfahrt (Rückfahrt), des Dieserverbrauchs pro Wegstrecke und der Anzahl der Fahrten. Dies wird mit dem CO_{2eq} pro Liter Diesel von 3,31 kg verrechnet. Insgesamt wird für den Transport einen Gesamtverbrauch von 540 Liter Diesel und eine Gesamtemission von 1,79 Mg CO_{2eq} berechnet (Tabelle 55).

Für die Lieferung der Pflanzenkohle wird ebenfalls ein Transport innerhalb Berlins (Herstellungsort Botanischer Garten Berlin) berechnet. Die Wegstrecke Hin- und zurück (Leerfahrt) wird mit 60 km und einem Verbrauch von 11,4 Liter angesetzt. Durch den Transport der PK entstehen Belastungen von 0,04 Mg CO_{2eq}. Eine Entlastung wird durch den Prozess der Karbonisierung von Holz erzielt. Durch die Speicherung von Kohlenstoff in der Pflanzenkohle und deren Stabilität hinsichtlich eines Abbaus können insgesamt 2,1 Mg CO₂ pro Tonne Pflanzenkohle als Entlastung angesetzt werden. Die Nutzung der Wärme, die eine weitere Entlastung darstellt wird nicht dem Produkt Pflanzenkohle angerechnet, da die Substitution von Fernwärme in die Bilanz am Standort Botanischer Garten eingeht. Bei der Karbonisierung entstehen durch die Verbrennung des Holzgases, welches bei diesem Prozess freigesetzt wird, Emissionen von 0,29 Mg CO_{2eq} die bei der Bilanz der PK-Herstellung berücksichtigt werden müssen (Tabelle 55).

Tabelle 55: CO_{2eq} der Herstellung von Pflanzenkohle. Bezogen auf 1 Tonne Pflanzenkohle mit 20 Prozent Wasser

Benötigtes Holz			Produkt PK						Entlastung		Belas-	Saldo
Mg	kWh/ kg	kWh	Mg	WG %	Mg TS	C %	St.- faktor	CO ₂ - Faktor	Mg CO ₂	Mg CO ₂	CO _{2eq}	Mg
3,2	5,2	16.640	1	20	0,8	93,8	0,76	3,67	2,1	0,29		-1,8

Holzhäckseln für die Kompostierung liegen bereits vor Ort vor (Firmensitz GaLaBau-Firma). Transportemissionen werden daher nicht berücksichtigt. Die Lagerungsverluste von Holzhäckseln sind minimal und werden daher nicht in der Bilanzberechnung berücksichtigt. Die Bereitstellung der Inputmaterialien geht, aufgrund C-Speicherung der PK, mit minus 4,68 Mg CO_{2eq} in die Gesamtbilanz ein (Tabelle 56).

Tabelle 56: CO_{2eq} der Bereitstellung der Inputmaterialien Bioabfälle Tafel, Holzhackschnitzel und Pflanzkohle (L: Lagerung, T: Transport, H: Herstellung)

Stoffstrom	Prozess	Bemerkung	Mengen (FM)		CO _{2eq} Lagerung/ Herstellung	CO _{2eq} Transport	Verbrauch	Summe CO _{2eq}	Quelle
			m ³	Mg	kg/Mg FM	g/L Diesel	Liter	Mg	
Bioabfälle	L	Verlust durch einsetzende Abbauprozesse	40	6	115,5	--	--	0,69	a
	T	LKW, 10 m ³ pro Woche im Absetzcontainer	460	299	--	3.310	540	1,79	b
Holzhackschnitzel	L	Verlust durch einsetzende Abbauprozesse	0	0	0	--	--	0	--
	T	Holz vor Ort	0	0	--	0	0	0	--
Pflanzkohle	H	aus Holzhackschnitzel	17,3	3,98	-1.800	--	--	-7,2	c
	T	LKW, Spedition	17,3	3,98	--	3.310	11,4	0,04	d
Summe der CO_{2eq} in Tonnen für die Bereitstellung der Inputmaterialien								-4,68	

a) Boldrin et al. (2009) und Cuhls et al. (2015), Mittelwerte aus Spannweite untersuchter Emissionen aus der offenen Kompostierung von Bio- und Grüngutabfällen (3.400 g/Mg CH₄, 242 g/Mg NH₃ und 100 g/Mg N₂O)

b) Energieverbrauch eines Lkw-Transports: Ein 24 t-LKW transportiert 7 t, 50 km durch Berlin (incl. Leerfahrt). Ermittlung der Parameter für die Berechnung: Lkw-Klasse: LKW 12 - 24 Tonner Gutart: Absetzcontainer Transportgewicht: 7 Tonnen, Transportentfernung: 20 km, Straßenkategorie: Innerorts - Energieverbrauch: F [Liter] = 21,6 l/100 Km = 4,32 l/20 km, Anzahl Fahrten: 50, Gesamtstrecke: 2.500 km Gesamtverbrauch: 540 l (DSL, 2013)

c) berechnet aus Tabelle 53

d) Energieverbrauch eines Lkw-Transports Ein 12 t LKW transportiert 4 t PK 60 km durch Berlin. Ermittlung der Parameter für die Berechnung: n Lkw-Klasse: Last-/Sattelzug 7 - 12 Tonner, Gutart: Volumengut, Transportgewicht: 4 t, Transportentfernung: 60 km, Straßenkategorie: Innerorts - Energieverbrauch: F [Liter] = 19 l/100 Km = 11,4 l/60 km (DSL, 2013)

Kompostierungsprozess

Die Herstellung der PK-Komposte verursachte unter Zugrundelegung einer nicht optimalen Kompostierung 58,5 Mg CO_{2eq} durch Emissionen an CH₄, N₂O und NH₃ sowie durch den Einsatz von Maschinen. Die CO_{2eq} resultieren zum einen aus der Verarbeitung von 385 Mg FM Kompost zu 126 Mg FM Fertigkompost (± 210 m³). Die Kompostierung wird mit mittleren Emissionswerten (Mittelwert offene Kompostierungsanlagen mit Grünabfallverwertung nach Boldrin et al. (2009) und Cuhls et al. (2015) von 3.400 g/Mg CH₄, 242 g/Mg NH₃ und 100 g/Mg N₂O pro Mg Frischmaterial bewertet. Zum anderen setzt die Nutzung eines Mischers und eines Radladers zum Mietenumsetzen 36,4 kg CO_{2eq}/Mg FM. Das entspricht bei 385 Mg FM Kompostmaterial einem CO_{2eq} von 14 Mg.

Tabelle 57: CO_{2eq} der Bereitstellung der Inputmaterialien Bioabfälle Tafel, Holzhackschnitzel und Pflanzenkohle (L: Lagerung, T: Transport, H: Herstellung)

Prozess	Bemerkung	Mengen (FM)		CO _{2eq} Lagerung/Herstellung	CO _{2eq} Transport	Verbrauch	Summe CO _{2eq}	Quelle
		m ³	Mg	kg/Mg FM	g/L Diesel	Liter	Mg	
Rotte	Abbauprozesse	710	385	115,5	--	--	44,5	a
Maschinen	Radlader, Mischer, Sieb	710	385	--	3.310	4235	14,0	b
Summe der CO_{2eq} in Tonnen für den Kompostierungsprozess							58,5	

a) Boldrin et al. (2009) und Cuhls et al. (2015), Mittelwerte aus Spannweite untersuchter Emissionen aus der offenen Kompostierung von Bio- und Grüngutabfällen (3.400 g/Mg CH₄, 242 g/Mg NH₃ und 100 g/Mg N₂O)

b) Verbrauch eigene Erhebung (vgl. Kap. 8.2), CO_{2eq} pro Liter Diesel: <https://innovationorigins.com/de/derstellung-von-benzin-und-diesel-verursacht-mehr-co2-emissionen-als-wir-dachten/>

Produktlagerung und -ausbringung

Nach Cuhls et al. (2015) ergeben sich aus den mittleren Emissionsfaktoren für die Produktlagerung und die Produktausbringung je Mg verwertete Abfälle (FM) 0,84 g für Methan, 111 g für Ammoniak und 28 g/Mg für Lachgas. Bei einer Abfallmenge von 385 Mg ergibt sich daraus eine Freisetzung von 3,3 Mg CO_{2eq}.

Gesamtbelastung Kompostierung

Die Gesamtbelastung durch die Herstellung der PK-Komposte errechnet sich aus den o. b. Einzelbereichen. In Tabelle 58 sind die Ergebnisse zusammengefasst aufgeführt. Bezogen auf eine Tonne Inputmaterial werden 148 kg CO_{2eq} freigesetzt. Dieser Wert liegt im Bereich der durch ifeu (2019) angegebenen Belastungswerte für die offene Mietenkompostierung in Berlin.

Tabelle 58: CO_{2eq} der gesamten Prozesskette

Prozess	Belastung in CO _{2eq} [Mg]
Bereitstellung Bioabfälle	2,48
PK-Herstellung	-7,16
Kompostierung	58,5
Lagerung und Ausbringung	3,3
Gesamt	57,12
Mg CO_{2eq}/Mg Bioabfall	0,148
Mg CO_{2eq}/Mg Fertigkompost	0,453

Zur Ermittlung des Produktspezifischen CO₂-Footprints wird für die Seite der Belastungen der ermittelte Wert pro Tonne Bioabfall auf die Produktmenge des PK-Kompostes umgerechnet. Bei 126 Mg Fertigkompost (vgl. Kap. 7.2.1, Korngröße 40 mm) ergibt sich eine Belastung von 453 kg CO_{2eq} pro Tonne Fertigkompost.

Entlastung durch Anwendung Kompostprodukt

Bei der Produktausbringung und Anwendung werden neben den Klimabelastungen auch Entlastungen wirksam, die durch folgende Potentiale gekennzeichnet sind:

- Substitution von Düngemitteln
- Humusreproduktion
- Torfsubstitution
- C-Sequestrierung im Boden

Nach ifeu (2019) ist die Kompostierung der Bioabfälle in Berlin mit einer Gutschrift von 149 kg CO_{2eq} /Mg Bioabfall versehen. Umgerechnet auf das Endprodukt sind das 455 kg CO_{2eq} /Mg Fertigkompost.

Die Gutschriften könnten durch die Zugabe von Pflanzenkohle zur Kompostierung steigen. Studien weisen darauf hin, dass z. B. die Humusreproduktion durch Pflanzenkohle erhöht wird und damit auch die C-Sequestrierung im Boden steigt (vgl. Kap. 2.3.2).

Angenommen die Humusreproduktion und damit die C-Sequestrierung steigt durch die PK-Komposte um 10 % pro Tonne Fertigkompost, bedeutet das für die hergestellten Komposte, das in einer Tonne Fertigkompost 5 % mehr Kohlenstoff (30 kg) enthalten ist¹¹. Umgerechnet

¹¹ Zur Vereinfachung entspricht 1 % Humus in unserer Berechnung 0,5 % Kohlenstoff. Bei 55-60 % oTS (vgl. Tabelle 25) entsprechen 10% Erhöhung 55 – 60 g oTS/kg TS Kompost. In Kohlenstoff umgerechnet sind das 27,5 - 30 g C/kg TS Kompost.

in CO₂, würde dies eine zusätzliche Entlastung von 110 kg CO₂ bedeuten. Die Gutschrift erhöht sich damit auf 565 kg CO_{2eq} /Mg Fertigkompost und 185 kg CO_{2eq} /Mg Miomasse.

Gesamtbilanz

Die Gesamtbilanz (Belastung und Entlastung) ergibt eine weitestgehend ausgeglichene Emissionssituation in der konservativen Betrachtung (a). Pro Tonne Inputmaterial (Biomasse) werden Netto 1 kg CO_{2eq} gutgeschrieben. Diese Bilanz ist bereits besser als die Vergleichsbilanz von ifeu (2019) für die Kompostierung in Berlin.

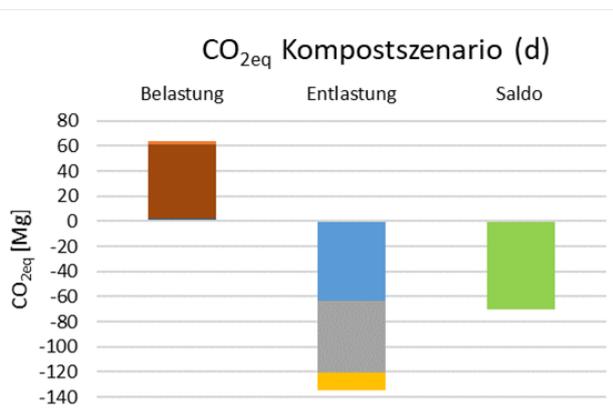
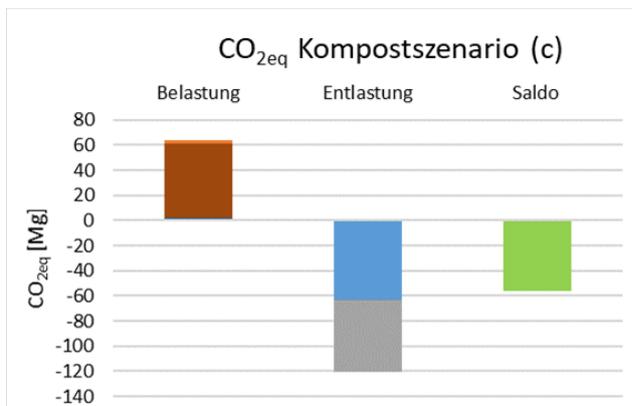
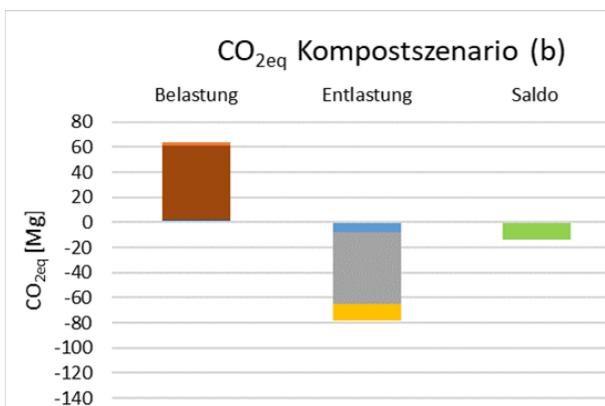
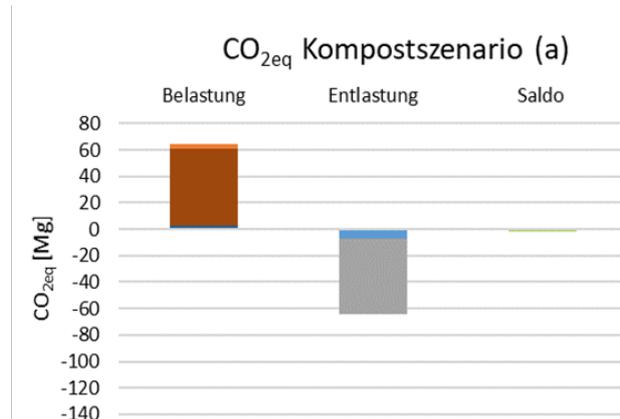
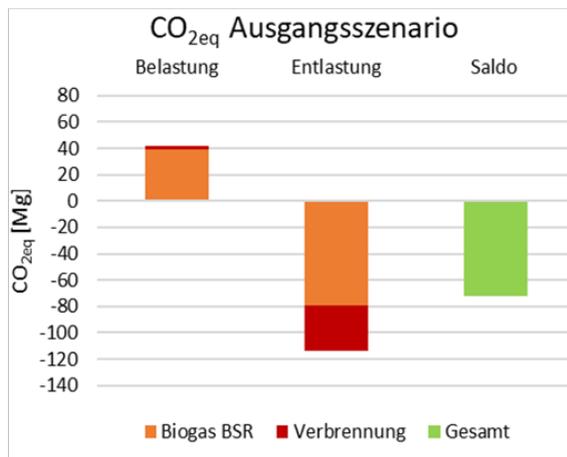
Durch hinzuziehen der höhere Humusreproduktion (Entlastung) steigt die Gutschrift auf 36 kg CO_{2eq} /Mg Biomasse bzw. auf 110 kg CO_{2eq} /Mg Fertigkompost (b).

Auch bei einer höheren Menge an Pflanzenkohle würde der Prozess weiter in Richtung Gutschrift tendieren. Besonders die Pflanzenkohleproduktion vor Ort mit einer gekoppelten Wärmenutzung zur Substitution von fossilen Energieträgern, ergibt ein gesamtes Einsparpotential von 63 Mg CO_{2eq} (vgl. Kap. 7.2.2). Umgerechnet auf 1 Tonne Biomasseinput ergibt das eine Belastung von nur noch 3 kg CO_{2eq} während der Herstellung, Lagerung und Ausbringung, ohne eine Betrachtung der Gutschrift. Zuzüglich der Gutschrift würde der Prozess zu einer Klimaentlastung von netto 146 kg CO_{2eq} /Mg Biomasse führen (c), ohne die gesteigerte Humusreproduktion mit anzurechnen. Wird die Humusreproduktion wie oben beschrieben mit betrachtet, ergibt sich eine Klimaentlastung von 182 kg CO_{2eq} /Mg Biomasse (d) (Abbildung 48).

Für den PCF ergibt sich daraus netto eine geringe Gutschrift von 2 kg CO_{2eq} /Mg Fertigkompost in der konservativen Betrachtung bis zu einer Gutschrift von 555 kg CO_{2eq} /Mg Fertigkompost im Szenario Pflanzenkohleherstellung vor Ort, Substitution Erdgas und gesteigerter Humusaufbau.

7.2.3.3 Vergärung und Verbrennung vs. Kompostierung und Karbonisierung

Der Vergleich der Verwertungswege zeigt, dass die Verwertung zu Biogas in der Anlage BSR West und die energetische Nutzung der Holzhackschnitzel im Vergleich zur Kompostierung im Gut Hellersdorf im Kompostszenario a (PK eingekauft, keine zusätzliche Humusanrechnung) hinsichtlich der Wirkungskategorie Treibhausgase wesentlich besser abschneidet (Abbildung 48). Erst bei der Herstellung vor Ort und der Nutzung der entstehenden Wärme zur Substitution von Erdgas sowie der Anrechnung einer zusätzlichen Humusanreicherung im Kompostszenario d gleichen sich die Bilanzen an. Die Verwertung zu Biogas in der Anlage BSR West und die energetische Nutzung der Holzhackschnitzel behält unter den betrachteten Rahmenbedingungen und Biomassemenge jedoch einen leichten Vorteil von 3 Tonnen CO_{2eq} und ist damit etwas klimafreundlicher.



Legende Kompostszenario

- Bereitstellung Bioabfälle
- PK-Herstellung
- Kompostierung
- Lagerung und Ausbringung
- Anwendung
- Humus +

Abbildung 48: Vergleich der CO_{2eq}-Bilanzen des Ausgangsszenarios und der Herstellung von Pflanzenkohlekompost im Gut Hellersdorf in vier Szenarien (a – d). a) konservativen Betrachtung, b) konservativen Betrachtung plus Humusaufbau, c) Szenario Pflanzenkohleherstellung vor Ort und Substitution Erdgas durch Nutzung der Wärme und d) Szenario Pflanzenkohleherstellung vor Ort und Substitution Erdgas durch Nutzung der Wärme plus gesteigerter Humusaufbau.

Bei der gesamtheitlichen Beurteilung (alle Wirkungskategorien) kommt es entscheidend darauf an, dass nicht nur Aspekte des Klimaschutzes, sondern auch des Ressourcenschutzes berücksichtigt werden. Während bei alleiniger Betrachtung von Emissionen die Umweltwirkung der Kompostierung von Bioabfall mit Pflanzenkohle (incl. Wärmenutzung bei der Herstellung der Pflanzenkohle) einerseits und die Vergärung und Verbrennung von Bioabfällen andererseits als gleichwertig eingestuft werden, ändert sich diese Bewertung bei Einbeziehung von Kriterien der Ressourcenschonung grundlegend, zugunsten der Kompostierung.

8 Etablierung von Wertschöpfungsketten

8.1 Analyse der Marktsituation

Bei der Analyse der Marktsituation wurden Hersteller von Karbonisierungsanlagen, Hersteller von Pflanzenkohle und Hersteller und Anbieter von Pflanzenkohlesubstraten, Futterkohle und Bodenverbesserern auf Basis von Pflanzenkohle recherchiert. In Abbildung 49 ist ein Überblick über die „Pflanzenkohle-Landschaft“ in Deutschland aufgeführt.

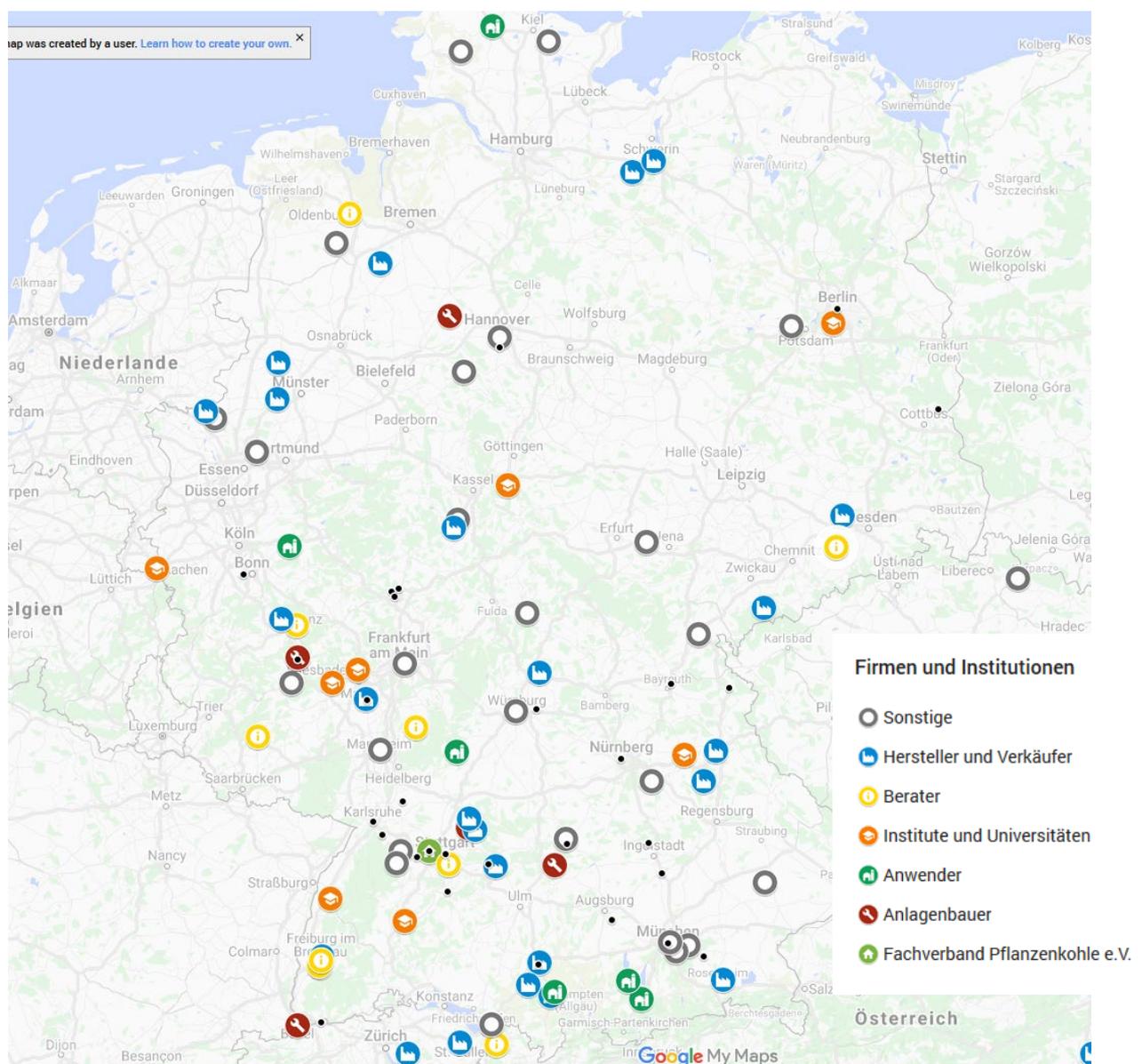


Abbildung 49: Überblick über Pflanzenkohlehersteller, -anwender und Forschungseinrichtungen
(Quelle: <https://fachverbandpflanzenkohle.org/pflanzenkohle/>)

8.1.1 Karbonisierungsanlagen

Um einen Überblick über die verschiedenen technischen Konzepte sowie Anbieter von Karbonisierungsanlagen zu bekommen, wurde eine Marktanalyse durchgeführt. Diese umfasste eine globale Internetrecherche, Recherchen in Fachartikeln und Fachbüchern, telefonischer und elektronischer Kontakt mit Anbietern von Karbonisierungsanlagen sowie die Verwertung von praktischen Erfahrungen mit Herstellern.

Die folgenden Parameter wurden dabei erhoben bzw. abgefragt:

- Ausgangsmaterialien
- Menge Input Biomasse
- Menge Output Pflanzenkohle
- Anlagendimension (hier: Grundfläche/Stellfläche)
- Automatisierung
- Zertifizierung
- Marktsituation
- Kosten

Weitere Parameter wie erzeugte Wärmemenge, Mobilität und weitere Spezifikationen wurden ebenfalls in die Auswertung mit einbezogen.

Die Marktrecherche ergab eine große Bandbreite von Herstellern von Pyrolyseanlagen, wobei 12 Anbieter herausgefiltert wurden. Davon sind 7 Hersteller aus Deutschland, 4 Firmen aus dem europäischen Ausland (Österreich, 2 x Frankreich, Lettland) sowie ein Anbieter aus den USA (Anhang 1). Alle Anbieter sind am Markt aktiv und installierten in der Regel bereits mehrere Anlagen in verschiedenen Ländern, vor allem in Europa und Nordamerika sowie Asien.

Die meisten Anbieter verfügen über eine Standardproduktion ihrer Anlagen, in der Regel sogar in verschiedenen technischen Dimensionen bezüglich des Durchsatzes an Biomasse bzw. der Produktion von Pflanzenkohle. Es sind sowohl Anlagen mit einem kontinuierlichen Durchsatz an Biomasse, als auch Anlagen mit konstant befüllbarem Volumen (Retortensysteme; Batchverfahren) verfügbar. Die meisten Anbieter weisen für ihre Anlagen eine Zertifizierung auf und/oder verweisen auf die Information, dass in ihren Anlagen Pflanzenkohle produziert werden kann, die qualitativ dem European Biochar Certificate (EBC) entspricht. Alle Anlagen verfügen über einen automatisierten Prozess. Als Inputmaterial wird in den meisten Fällen holzige Biomasse mit Anforderungen hinsichtlich maximalen Wassergehaltes (i.d.R. max. 10-50 %), Korngröße/Kantenlänge oder Schüttdichte angegeben. Lediglich bei den Batchverfahren (Retortensystem) spielt der Wassergehalt und die Schüttdichte eine untergeordnete Rolle, da das Material bei diesem Verfahren nicht rieselfähig sein muss. Hinsichtlich der Inputmengen bzw.

des Durchsatzes an Biomasse werden abhängig von den technischen Dimensionen der Anlagen unterschiedliche Angaben gemacht. Der Output an Pflanzenkohle ist abhängig von der zugeführten Menge an Biomasse und variiert von den jeweiligen Anbietern. Neben der Pflanzenkohle kann Wärme und bei ein paar Anbietern zudem Pyrolyseöl und Strom ausgekoppelt werden. Darüber hinaus verweisen einige Anbieter auf firmeneigene Spezifikationen, wie bspw. bauliche bzw. technische Details oder weitere Produkte zum Thema Aufbereitung und Verwertung von Biomassen.

Aufgrund der Auswertung oben genannter Parameter sowie praktischen Erfahrungen mit den Herstellern wurden die Firmen BIOMACON GmbH sowie PYREG GmbH für die weitere Betrachtung und Berechnungen ausgewählt.

Nachfolgend werden beide Anbieter detaillierter vorgestellt. Ergänzend zur oben aufgeführten Tabelle stellt die nachfolgende Tabelle 59 weitere technische Details zu den beiden Firmen bereit.

Die Anlagen der Hersteller BIOMACON GmbH mit Firmensitz in Rehburg/DEU sowie PYREG GmbH mit Firmensitz in Dörth/DEU werden in Deutschland produziert, sind zertifiziert und wurden bereits an mehreren Orten in Deutschland (u.a. Referenzanlage im Botanischen Garten Berlin-Dahlem) und anderen europäischen Ländern in Betrieb genommen, so dass hier umfangreiche Erfahrungen hinsichtlich technischer Betreuung, Qualitätssicherung der Pflanzenkohle und Kostenplanung vorliegen.

Die BIOMACON GmbH stellt ein sog. DECARBO Energy Systems mit verschiedenen Dimensionen (Home/Farm/Industry von 40-400 kW; Anlagenbeispiel siehe Abbildung 50) und kontinuierlichen Durchsatz von Biomasse her. Die Compact-Converter (ohne Peripherie) benötigen eine Grundfläche von 7,6 m² bis 25,5 m² und können somit in bestehende Gebäude integriert oder bis zu einer bestimmten Größe (100 kW) sogar in Seecontainern verbaut angeboten werden. Für die Karbonisierung sind Lignin haltige und rieselfähige Biomassen (z. B. Holzhäcksel,

Landschaftspflegematerial etc.) mit einem maximalen Wassergehalt von 35% und einer Korngröße bzw. Kantenlänge <70 mm geeignet.

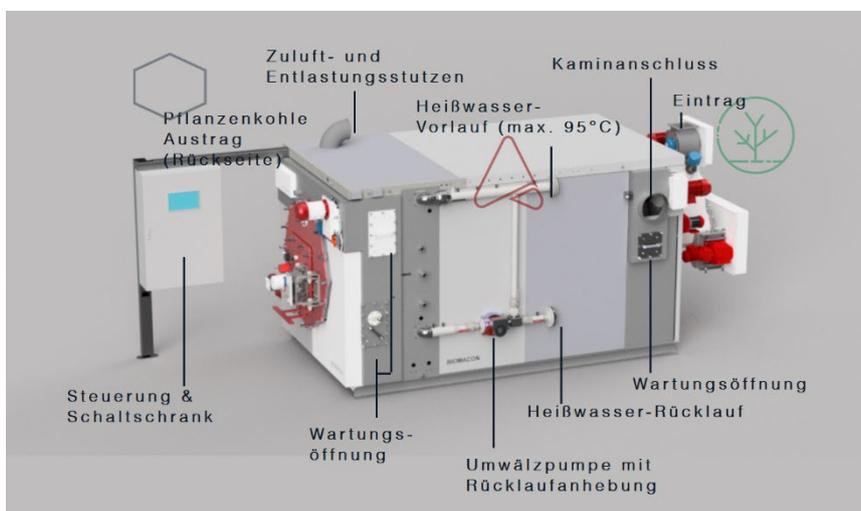


Abbildung 50:
Anlagenbeispiele, C-100F
der Firma BIOMACON

Die Biomasse gelangt mittels der Konverterschnecke durch die Pyrolysekammer (Brennkammer) und wird dabei getrocknet, vorgewärmt und pyrolysiert. Die Verweilzeit der Biomasse in der Brennkammer beträgt laut Herstellerangaben ca. 2 Stunden, dabei durchströmt ein heißes Gasgemisch die schwelende Biomasse, bevor sie als hochwertige durchkarbonisierte Pflanzenkohle ausgetragen wird. Die im Karbonisierungsprozess entstehende thermische Energie wird über einem Wärmetauscher aufgenommen und ausgekoppelt. Die Emission von NO_x wird mittels eines speziellen Verfahrens vermindert. Weitere technische Details sind der *Anlagenbeschreibung* auf der Firmenhomepage <https://www.biomacon.com/produkte> zu entnehmen.

In der Tabelle 59 sind für vier verschieden dimensionierte BIOMACON-Anlagen der Durchsatz, d. h. die Inputmenge an Biomasse und die Outputmenge an Pflanzenkohle angegeben sowie die Wärmemenge (thermisch) aufgeführt.

Tabelle 59: In- und Outputmenge, Wärmemenge und der benötigten Stellfläche für Anlagen der Firmen BIOMACON und PYREG

Firma	Typ	Grund- /Stellfläche Anlage	Inputmenge Biomasse	Output PK und Output/Input - Verhältnis	Wärmemenge
BIOMACON	C100-F	1,9m x 5,4m = 10,3 m ²	75 kg/h FS = bis 600 t/a FS bei 8.000 h/a	13,8 kg/h PK = bis 110 t/a bei 8.000 h/a, ca. 18 % Verhältnis O/I (FS)	400.000-800.000 kWh/a (50-100 kW * 8000 h/a)
	C160-F	2,5m x 6,1m = 15,3 m ²	120 kg/h FS = bis 960 t/a FS bei 8.000 h/a	24,1 kg/h PK = bis 192 t/a bei 8000 h/a, ca. 20 % Verhältnis O/I (FS)	640.000-1.280.000 kWh/a (80-160 kW * 8000 h/a)
	C250-I	2,5m x 8,7m = 21,75 m ²	188 kg/h FS = bis 1504 t/a FS bei 8.000 h/a	34,2 kg/h PK = bis 273 t/a bei 8000 h/a, ca. 20 % Verhältnis O/I (FS)	1.000.000- 2.000.000 kWh/a (125-250 kW * 8000 h/a)
	C400-I	2,5m x 10,2m = 25,5 m ²	300 kg/h FS = bis 2400 t/a FS bei 8.000 h/a	56,2 kg/h PK = bis 449 t/a bei 8000 h/a, ca. 20 % Verhältnis O/I (FS)	2.000.000- 3.200.000 kWh/a (250-400 kW * 8000 h/a)
PYREG	P500 Biomasse	PYREG-Modul: 9m x 3m x 2,8m Technikmodul: 3m x 3m x 2,8m 36 m ²	100 kg/h TS bis 750 t/a TS bei max. 7.500 h/a	25,3 kg/h PK bis 190 t/a TS ± 5% bei 7.500 h/a, ca. 25 % Verhältnis O/I (TS)	bis zu 1.125.000 kWh/a (150 kW * 7500 h/a)
	P1.500 Biomasse	PYREG-Modul: 13m x 3m x 5,8m Technik- modul: 6m x 3m x 5,8m = 57 m ²	284 kg/h TS bis 2.130 t/a TS bei 7.500 h/a	70,7 kg/h PK bis 530 t/a TS ± 5% bei 7.500 h/a, ca. 25 % Verhältnis O/I (TS)	bis zu 5.625.000 kWh/a (750 kW * 7500 h/a)

FS= Frischsubstanz, TS=Trockensubstanz, PK=Pflanzenkohle, I=Input, O=Output

Hinweis: BIOMACON bezieht sich beim Inputmaterial auf Frischsubstanz (FS), PYREG auf Trockensubstanz (TS)

Mit steigender Anlagegröße erhöhen sich die Inputmengen an Biomasse von 75 kg/h auf 300 kg/h FS (entspricht 600 t/a bzw. 2.400 t/a FS) und damit einhergehend die Outputmengen an Pflanzkohle von 13,8 kg/h auf 56,2 kg/h TS (entspricht 110 t/a bzw. 449 t/a TS) bei auskoppelbarer thermischer Wärme von 50/100 kW auf 400 kW (entspricht 400.000 kWh/a bzw. 3.200.000 kWh/a). Die automatisch arbeitenden Anlagen von BIOMACON sind über eine Dialogsteuerung zu bedienen und ein Fernzugriff über Smartphone oder PC ist Standard.

Die PYREG GmbH stellt ebenfalls kontinuierlich arbeitende sog. Carbon-Technologie-Systeme her. d.h. auch hier wird mittels Förderschnecken die Biomasse durch die Brennkammer (Reaktor) transportiert. Laut Herstellerangaben wird die Biomasse nicht verbrannt, sondern nach dem Prinzip der trockenen Karbonisierung. bei 500°C - 700°C zunächst schonend entgast und anschließend vollständig verkohlt. Dabei wird die Biomasse hygienisiert und die Bildung von PAK und Dioxinen vermieden. Der Karbonisierungsprozess lässt sich im PYREG-Verfahren durch die Steuerung der Parameter Temperatur, Verweilzeit der Biomasse im Reaktor sowie Luftzugabe optimieren, was in der Herstellung hochwertiger Pflanzkohle resultiert. Brennbares Gas wird nachgeschaltet bei ca. 1000°C verbrannt und es entstehen laut Informationen auf der Firmenhomepage im gesamten Prozess keine problematischen Stoffe wie Teere oder Öle. Die Energieüberschuss in Form von Wärme kann ausgekoppelt und anderweitig genutzt werden.

Die für die Karbonisierung von Biomasse angebotenen PYREG-Anlagen P500 BIOMASSE (Abbildung 51) und P1.500 BIOMASSE benötigen für das PYREG- und Technikmodul zusammen (ohne weitere Peripherie) eine Grundfläche von 36 m² bzw. 57 m².



Abbildung 51: P500
Biomasse der Firma PYREG

Für die Karbonisierung sind eine große Auswahl von schütt- und rieselfähigen Biomassen mit einem maximalen Wassergehalt von 35%, einer Korngröße bzw. Kantenlänge von max. 30 mm sowie einen Mindestheizwert von 10 MJ/kg geeignet. Weitere technische Details zu dem

PYREG-Verfahren sowie den oben vorgestellten 2 Anlagen zur Karbonisierung von Biomasse sind der Firmenwebsite <https://www.pyreg.de/systeme-verfahren/> zu entnehmen.

Analog zu den BIOMACON-Anlagen sind in Tabelle 59 auch für die 2 PYREG-Anlagen *P500 Biomasse* sowie *P1.500 Biomasse* der Durchsatz, d. h. die Inputmenge an Biomasse und die Outputmenge an Pflanzkohle angegeben sowie die Wärmemenge (thermisch) aufgeführt. Die Inputmengen an Biomasse sind für die 2 PYREG-Anlagen mit 100 kg/h TS bzw. 284 kg/h TS (entspricht 750 t/a bzw. 2.130 t/a TS) und die dazugehörigen Outputmengen an Pflanzkohle mit 25,3 kg/h bzw. 70,7 kg/h TS \pm 5% (entspricht 190 t/a bzw. 530 t/a TS \pm 5%) bei auskoppelbarer thermischer Wärme von 150 kW bzw. 750 kW (entspricht 1.125.000 kWh/a bzw. 5.625.000 kWh/a). Zum Anlagen-Support gehören laut Firmenwebsite die Fernüberwachung und Ferndiagnose sowie ein Vor-Ort-Service mit Servicepersonal.

Die Karbonisierungsanlagen beider Anbieter sind mit hydraulischen und elektrischen Installationen ausgestattet, zu denen Pumpen, Pufferspeicher, Sicherheitseinrichtungen und eine Fernwartung gehört. Die Anlage müssen an die Infrastruktur (Medien: Strom, Wasser, ggf. Heizung und Datenleitung) angeschlossen werden. Die Ein- und Austragssysteme für Biomasse und Pflanzkohle sind für die betrachteten Anlagen identisch und variieren je nach Hersteller dieser Komponenten.

8.1.2 Pflanzkohlehersteller

Der Anwendungsbereich von Pflanzkohle reicht u. a. von Bodenverbesserern, Kompostierzusätzen und Trägerstoffen für Düngemittel über Güllebehandlung und Stalleinstreu bis hin zu Futtermitteln.

Im Folgenden ist eine Auswahl an PK-Herstellern aufgelistet:

- Carbonis (Garrel): Pflanzkohle Pur, Futterkohle
- Novo Carbo GmbH (Dörth): Pflanzkohle
- FETZER Rohstoffe + Recycling GmbH (Eislingen): Moola/Pflanzkohle
- Swiss Biochar (Belmont-sur-Lausanne/Schweiz): Pflanzkohle
- SONNENERDE Gerald Dunst Kulturerden GmbH (Riedlingsdorf/Österreich): Pflanzkohle
- Verora GmbH (Edlibach/Schweiz): Pflanzkohle (Einstreu, Hofdünger...) / Pflanzkohle (Einstreu, Futter...) / Pflanzkohle gemahlen
- Biomassehof Allgäu eG (Kempten): Pflanzkohle aus Getreidespelzen / Hackschnitzeln / Heilkräutern
- HerbaCarbo (Andernach): Pflanzkohle aus Kräutern / Pflanzkohle aus Waldhackschnitzeln
- Horst Wagner Kompostbau, Terra Preta/ Terra Anima® (Meißen): Pflanzkohle für Kompost / Pflanzkohle für Bokashi

Die Anzahl an PK-Anbietern steigt Jahr für Jahr. Die Kosten für zertifizierte PK sind dabei von 2015 von durchschnittlich 1,59 € auf 0,79 € pro kg im Jahr 2018 gesunken.

Eine Liste aller EBC zertifizierten Händler ist unter <https://www.european-biochar.org/de/producer> (letzter Zugriff: 16.09.2020, 12:24 Uhr) abrufbar.

8.1.3 Anbieter von Pflanzenkohlesubstraten

Auch die Hersteller bzw. Anbieter von Pflanzenkohlesubstraten sind aktiver. Im Folgenden ist eine Auswahl an PK-Substrat-Herstellern aufgelistet:

- CarboVerte (Eibenstock): Schwarzerde – Terra Preta
- Terra Tirol (Schwendt/Österreich): Schwarzerde
- Wandlitzer Erden, Rainer Buchholz (Wandlitz bei Berlin): Wandlitzer Schwarzerde
- SONNENERDE Gerald Dunst Kulturerden GmbH (Riedlingsdorf/Österreich): Riedlingsdorfer Schwarzerde / Bodenaktivator / Hortisol-Hanferde
- Palaterra GmbH (Hengstbacherhof) Palaterra®: Anzucht&Kräuter / Haus&Balkon / Hochbeeterde / Beet&Garten / Boden&Kompost
- Terra-Magica (Grafenrheinfeld): Schwarze Erde
- Christoph Fischer GmbH – EM Chiemgau (Stephanskirchen/Högering): RoPro-Streu, Fermentationshilfe / Chiemgauer Schwarzerde / Schwarzes Gold
- Horst Wagner Kompostbau (Meißen), Terra Preta/ Terra Anima®: Humuserde
- Carbuna AG (Memmingen): Amino Terra Substrat, Bio Aktive Kohle
- Neudorff (Emmerthal): Terra Preta BodenAktivator

Der Absatz von PK-Substrat erfolgt mit ca. 0,18 € bis 3,50 € pro Liter in Abhängigkeit der Abpackungsgröße. Dabei sind die Produkte mittlerweile stärker auf bestimmte Pflanzenbedürfnisse abgestimmt. Nach Zundel und Witte (2018) ist ein Markt und besonders im Hobbygärtnerbereich auch genügend Käufer vorhanden.¹² Auch für Spezialanwendungen, z. B. im Weinbau, kommen die Substrate vermehrt zum Einsatz.

¹²Zundel und Witte (2018): Vortrag Workshop CarboTIP. https://www.geo.fu-berlin.de/geog/fachrichtungen/physgeog/geooekologie/medien/download/Vortraege_Workshop_CarboTIP_2018/8_Monetaere_Bewertung_BKS_WITTE_ZUNDEL.pdf

8.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der untersuchten Wertschöpfungskette im Gut Hellersdorf

Prinzessinnengartenbau koordinierte von 2017 bis 2019 die Herstellung von Pflanzkohle-Kompost aus recycelten Gemüseabfällen der Berliner Tafel und Holzhäckseln der Galabaufirma Bebra auf dem Gut Hellersdorf. Nach einer Testphase in 2017 wurden zwischen Februar 2018 und März 2019 wöchentliche Anlieferungen von Gemüseabfällen mit Holzhäckseln vermischt und kompostiert. Insgesamt 57 Lieferungen von Gemüseabfällen angereichert mit Pflanzkohle wurden auf dem Gut Hellersdorf abgeladen und verarbeitet. In der Regel wurden vier Lieferungen in eine Kompostmiete zusammengefasst. Mieten wurden regelmäßig umgesetzt und wegen der begrenzten Fläche auch gelegentlich vereint.

Die Anlieferungen von der Berliner Tafel variierten in Volumen zwischen 6 und 10 cbm Gemüseabfall. Anfänglich wurden die Gemüseabfälle 1:1 mit Holzhäckseln gemischt. Später wurde der Häckselanteil in jeder Miete auf die Hälfte reduziert, um die Qualität des Komposts zu verbessern (vgl. Kap. 4.2)

Die Investitionskosten für dieses Projekt beinhalteten:

- (1) den Kauf eines Traktors und Mixers für etwa 16.700 €,
- (2) die Bereitstellung eines Radladers durch die ansässige Galabaufirma, verrechnet mit der kostenlosen Abnahme von Holzhäckseln und
- (3) die Vorbereitung der Kompostierungsfläche auf dem Gut Hellersdorf.

Diese Kosten sind relativ variabel, an örtliche Bedingungen, wie die Verfügbarkeit von geeigneten Maschinen und den Ausgangszustand der Kompostierungsfläche, gebunden. Sie sind daher nicht repräsentativ.

Die Betriebskosten, hingegen, geben einen besseren Eindruck von der Wirtschaftlichkeit dieses Projekts und sind hier kurz zusammengefasst und den Einnahmen gegenübergestellt:

Betriebskosten in Euro von Februar 2018 bis Juni 2019, 57 Lieferungen

1. Sachkosten

Wartung und Reparaturen der Maschinen	446,90
Diesel Treibstoff für Traktor und Radlader	1 488,71

2. Personalkosten

Leitung und Koordination des Projekts	2 578,13
Überwachung, Koordination und Durchführung der Kompostierung vor Ort	19 406,25

3. Subunternehmer

Sieben	2 067,50
Reparatur, Kugellager am Mischer	348,50
Gesteinsmehl zur Beimischung zum Kompost	898,00

<u>Summe der Betriebskosten</u>	<u>27 233,99</u>
---------------------------------	------------------

Einnahmen in Euro aus der Produktion von etwa 30 m³ Kompost

<u>1. Verkäufe</u>	
Einzelverkauf an interessierten Anwohner	20,00
Verkauf der Restmenge (geplant)	525,00
<u>2. Verschenktes und abhanden gekommenes Material</u>	
Kids und Co	120,00
Andere kleine Schenkungen und abhanden gekommenes Material	60,00
<u>3. Eigennutzung</u>	
Für Gutsgarten Beete (bereits verbraucht)	60,00
Für Gutsgarten und PG zurückbehalten	120,00
<u>4. Eingesparte Entsorgungskosten</u>	
Holzhäcksel dem Abfallstrom entzogen: 325cbm (geschätzt)	
Entsorgungskosten per Erfahrungswert: €9,00/cbm	2 925,00
<u>Summe der Einnahmen</u>	<u>3 830,00</u>
Einnahmen – Ausgaben	-23 403,99

Aus den Angaben ist zu erkennen, dass die Betriebskostenbilanz im Gut Hellersdorf weit von Wirtschaftlichkeit entfernt ist. Hierzu ein paar Anmerkungen:

1. Die Inputmenge ist im Vergleich zum Volumen des Fertigkompostes relativ gering. Das Volumen hat sich im Zuge der Kompostierung um 70 - 85 % verringert (in Abhängigkeit der Fraktionierung, Abbildung 45). Das zu vermarktbar Endvolumen und die erzielten Einnahmen sind entsprechend gering.

2. Es war im Rahmen dieses Projekts nicht möglich, den Höchstpreis zu ermitteln, den der fertige Kompost auf dem Markt zu erzielen vermag. Wir basierten unseren Vermarktungspreis auf dem Mengenpreis anderer Anbieter mit vergleichbar hochwertigen Komposten – etwa 30,00 € /m³. Es ist jedoch denkbar, dass der Kompost, abgefüllt in kleine Gebinde und vermarktet durch Fachmärkte einen wesentlich höheren Preis erzielen kann. So würde zum Beispiel ein Preis von 10 € pro 20-Liter Packung und den Verkauf von Pflanzenkohle und Pflanzenkohlesubstrat an private Endverbraucher den Vermarktungswert des in diesem Projekt hergestellten Kompostvolumens auf 15.000 € anheben. Demgegenüber stehen jedoch Investitionen etc. für eine Verpackungsanlage.

3. Die Wirtschaftlichkeit dieses Kompostprojekts könnte auch durch eine Verringerung der benötigten Arbeitsstunden, dem größte Kostenanteil, verbessert werden. Eine etwa 20 %ige Verringerung (ca. 4.500 € Einsparung) wäre sicherlich erreichbar, wenn man Ineffizienzen wie zum Beispiel verspätete Anlieferungen, Verzögerungen in der Bereitstellung oder Reparatur von Maschinen, die wiederholte Beschaffung von Dieseltreibstoff in kleineren Mengen, u. ä.

durch besser abgestimmte Arbeitsprozesse oder entsprechend größere Lagerkapazitäten eliminiert. Auch die Anschaffung eines Kompostwenders würde viel Zeit einsparen. Hier wären jedoch ebenfalls wieder Investitionen notwendig.

Die Investition in eine eigene Karbonisierungsanlage im Rahmen eines Kompostierbetriebes wäre ebenfalls eine Option. Hier müsste, um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen, eine Wärmeabnahme in ein dezentrales Wärmenetz und eine Auslastung der Anlage gewährleistet werden.

8.3 Prüfung und Etablierung eines Qualitätssiegels

Im Bereich der Herstellung von Pflanzenkohle ist das Europäische Pflanzenkohle Zertifikat (EBC) ein bewährtes Qualitätssiegel welches nicht nur die Produktqualität widerspiegelt, sondern auch die Herstellungsbedingungen. Mit den vorliegenden Richtlinien für die Erlangung des Pflanzenkohle-Zertifikates wurde eine wissenschaftlich fundierte und praxisnahe Kontrollgrundlage geschaffen. Damit wird die nachhaltige Produktion von Pflanzenkohle sichergestellt und die Qualität der Pflanzenkohle nachweisbar garantiert. Die Zertifizierung erfolgt europaweit durch die unabhängige und staatlich akkreditierte Kontrollstelle q.inspecta (www.bio-inspecta.ch).

Das Pflanzenkohle-Zertifikat wird jedes Jahr nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen (Grenzwerte und Analysemethoden) und technischen Entwicklungen überarbeitet. „Das Ziel der Richtlinien besteht in der Gewährleistung einer wissenschaftlich stichhaltigen, gesetzlich abgesicherten, wirtschaftlich verantwortbaren und praktisch umsetzbaren Kontrolle der Produktion und Qualität von Pflanzenkohle“.¹³

Eigene Untersuchungen zur Qualitätssicherung haben gezeigt, dass eine PK-Probe von einem Hersteller ohne EBC-Zertifizierung auffällige PAK-Werte erzielte.

Bei der Herstellung und Vermarktung von Pflanzenkohlekomposten ist es denkbar ein ähnliches Qualitätssiegel zu etablieren, welches die Herstellungsbedingungen mit einbezieht. Ein Qualitätssiegel für Pflanzenkohlekomposte müsste die Herstellung in einem klimafreundlichen Ansatz (geringe Treibhausgasemissionen) mitberücksichtigen. Die Klimaschutz-Gütesicherung (Etablierung von RAL-Gütezeichen) für die Bioabfallwirtschaft als Maßnahme einer freiwilligen Selbstregulierung der Wirtschaft, wird derzeit von dem Forschungsvorhaben KlimaBioHum¹⁴ bearbeitet.

¹³ <http://www.european-biochar.org/de/>

¹⁴ <https://www.klimabiohum.de/>

9 Entwicklung, Erprobung und Publikation von Bildungsmodulen

Das Bildungsaktivitäten im Projekt verstanden sich als Teil der beruflichen Bildung für nachhaltige Entwicklung und ordneten sich in die Aktivitäten des im Dezember 2019 zu Ende gegangene fünfjährige UNESCO-Weltaktionsprogramm „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ ein. Im Strategiepapier der Arbeitsgruppe „Berufliche Aus- und Weiterbildung“¹⁵ wurde für die Verankerung von BBNE bestimmte Themenfelder, wie Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz empfohlen und verschiedene Aktionsfelder vorgeschlagen, wozu sowohl Modellversuche gehören, mit denen innovative didaktische und methodische Ansätze für die berufliche Bildung entwickelt, erprobt, erforscht und verbreitet werden als auch die Erstellung und systematische Verbreitung von Lehr- und Lernmaterialien.

Bodenberufsbildung hat diese Vorschläge in seiner Umsetzung aufgegriffen. Das Vorhaben zielte auf die Schließung regionaler Stoffkreisläufe mittels Pflanzenkohletechnologie. Um solche Stoffkreisläufe aufzubauen und zu schließen, bedarf es der Entwicklung neuer Fachqualifikationen und Kompetenzen bei Lehrenden und Lernenden sowie Multiplikatoren. Im Rahmen des Projektes entstanden so modellhafte Lernorte, an denen lokale Stoffkreisläufe durch die Kompostierung organischer Abfälle mit Pflanzenkohle geschlossen wurden. Bildungsmaterialien, Workshops und Weiterbildungen vermittelten das Thema Pflanzenkohle mit Bezug zu Klima-, Boden- und Ressourcenschutz. Im Zentrum der Bildungsaktivitäten rückten somit konkrete berufliches Handlungsfelder zu denen sowohl die Kompostierung, der Umgang mit Abfällen und Ressourcen und neue Klimaschutztechnologien gehörten. Die entwickelten Module sind handlungsorientiert und methodisch vielfältig und bahnen Gestaltungskompetenz an. Am Beispiel der Herstellung von Pflanzenkohle und Pflanzenkohlesubstrat werden wichtige Aspekte nachhaltiger Entwicklung, wie Klima-, Ressourcen- und Bodenschutz aufgegriffen und konkrete berufliche Handlungsalternativen aufgezeigt und erprobt.

Im Zentrum der Bildungsarbeit und des Bildungsmaterials steht das entdeckende, forschende und experimentelle Lernen. Beispielhaft seien dafür die Versuchsanleitungen angeführt, mit denen im Labor oder mit Hilfe einem kleinen selbst gebauten Ofen aus Konservendosen die Herstellung von Pflanzenkohle erforscht wird. Am kleinen Modell können die Berufsschüler*innen damit chemisch-physikalische Prozesse nachvollziehen und die Herstellung von Pflanzenkohle mit verschiedenen organischen Reststoffen erproben.

Die Lernenden werden zudem angeregt, eine eigene Kompostierung an ihrer Bildungsstätte umzusetzen und in eigenen Versuchen, beispielsweise zur Wirkung der Komposte mit Pflanzenkohle auf Pflanzen, ihr Wachstum, Gesundheit, Nährstoffbedarf und Ertrag zu

¹⁵ Vgl.: Deutsche UNESCO-Kommission e. V. (2014): Vom Projekt zur Struktur. Strategiepapier der Arbeitsgruppe „Berufliche Aus- und Weiterbildung“ in der UN-Dekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“.

untersuchen. Bisherige Ergebnisse aus der Forschung zur Pflanzenkohle wurden für die Bildungsmaterialien herangezogen, so dass die Auszubildenden das Potential von Pflanzkohlekomposten hinsichtlich der Einsparung von Dünger und Torf und des Ertrags interpretieren und diskutieren.

Boden Berufs Bildung

ANLEITUNG ZUM BAU EINES EINFACHEN PYROLYSEOFENS

Material

OFEN
1 leere Konservendose Ø 7 cm
1 leere Konservendose Ø 8,5 cm
2 Kuchenauskühler als Untersetzer und Aufläuffer zum Kochen
Topf/Espressokanne, Tee/Kaffee

PYROLYSE
Trockenes Pyrolysematerial: z. B. Holzreste, Äste, Pellets
Feuerzang, Kohlenanzünder
Gießkanne mit Wasser zum Löschen
Zange zum Herausheben der heißen Dose

WERKZEUG ZUM BAU
1 Hammer, Nagel 3-4 mm
1 Metallschere oder scharfes Messer
Handschuhe

Anleitung

- In die kleine Dose (Ø 7 cm) sowohl unten als auch oben herum ca. 9 Löcher mit dem Nagel schlagen. Die Löcher sollten einen Durchmesser von ca. 3-4 mm haben. Der Abstand der Löcher vom Rand sollte ca. 2 cm betragen.
- In den Boden der anderen Dose (Ø 8,5 cm) sternförmig 8 Schnitte machen.
- Nun drei Dreiecke nach unten biegen und die größte Dose über die schmale Dose schieben. Die nach unten gebogenen Dreiecke halten die andere Dose.
- Die Dosen auf den Kuchenauskühler oder nicht brennbaren Boden (Stein, Beton) stellen.
- Pyrolysematerial in die innere Dose füllen, bis kurz vor den oberen Löchern. Darauf achten, dass das Material nicht zu dicht geschichtet ist. Kohlenanzünder anzünden und dann damit das Pyrolysematerial entzünden.
- Kuchenauskühler über die Dosen legen und mit der Abkammer einen Tee oder Kaffee kochen.
- Nachdem das Pyrolysematerial vollständig verkohlt ist, Kohlen ausschütten und mit Wasser ablöschen.




Abbildung 52: Bauanleitung für einen einfachen Pyrolyseofen und Versuchsanleitung „Herstellung von Pflanzenkohle“

Ziel der entstandenen Bildungsmaterialien ist eine neue Nachhaltigkeitspraxis zu vermitteln und deren Potentiale hinsichtlich Klima-, Ressourcen- und Bodenschutz zu verdeutlichen und zu diskutieren und durch forschendes, experimentierendes, entdeckendes Lernen handlungsorientierte berufliche Kompetenzen zu vermitteln.

Zielgruppen

Die Bildungsaktivitäten im Projekt richteten sich an Auszubildende des Peter Lenné Schule (Gärtner/-in, Umweltschutztechnische Assistent/-in), StipendiatInnen der Landesstelle für gewerbliche Berufsförderung in Entwicklungsländern an der Peter Lenné Schule, UmschülerInnen des UBB (Koch/ Köchin, Hotelfachmann/-frau, Hauswirtschafter/-in) und

Grundschüler*innen (im Rahmen der Schüleruniversität der FUB). Für diese Zielgruppen wurden Bildungsmodule entwickelt, an den Lernorten und in Workshops praktisch erprobt und abschließend als Bildungsmaterial publiziert und verbreitet. Der Transfer erfolgte in Weiterbildungen für Multiplikator*innen. Dazu zählten sowohl die Lehrkräfte und Umweltbildner*innen aus der Berufsschule, den Berliner Gartenarbeitsschulen und Grundschulen und Allgemeinbildenden Schulen als auch Gärtner*innen aus Kleingärten und Urban Gardening Projekten.

9.1 Inhaltliche und zielgruppenspezifische Konzeption der Module und Workshop-Formate

Zu Beginn des Projekts wurden die inhaltlichen Schwerpunkte für die Bildungsmodule festgelegt. Diese liegen bei der Herstellung von Pflanzenkohle und ihre Qualitätssicherung, der Anwendung von Pflanzenkohle, besonders bei der Kompostierung sowie der Nutzung der Pflanzenkohlekomposte und -substrate im Garten. Das Thema Pflanzenkohle wurde in den Kontext der nachhaltigen Entwicklung eingebettet und Bezüge zum Klimaschutz hergestellt und den gestörten natürlichen Stoffkreisläufen, wie sie beispielsweise im Model der Planetaren Grenzen beschrieben sind. Für und mit den verschiedenen Projektpartnern wurden die Bildungsmodule und Workshop-Formate im Anschluss zielgruppenspezifisch fokussiert.

9.2 Erprobung der Module und Schulungen mit den verschiedenen Zielgruppen und Evaluierung der Ergebnisse

Erarbeitung der Module und Materialien

Im nächsten Arbeitsschritt wurden die einzelnen Module erarbeitet, d.h. die entsprechenden Inhalte recherchiert, didaktisch aufbereitet und in entsprechende Materialien, wie Vorträge, Arbeitsblätter etc. überführt. Um das Thema Terra Preta und Pflanzenkohle anschaulich und über den schulischen Kontext hinaus zu vermitteln, entstanden vier Legefilme zur „Die Geschichte der Terra Preta“, über „Die Herstellung und Verwendung von Pflanzenkohle“ und „Die Kompostierung mit Pflanzenkohle“ und über „Die Eigenschaften der Pflanzenkohle im Boden“. Darüber hinaus entstand ein Comic „Das wahre Gold des Amazonas“, der bildhaft und mit einfacher Sprache das Thema vermittelt. Die Videos und der Comic wurden in den Bildungsmaterialien und in die Vorschläge für die Unterrichtsgestaltung ebenfalls eingebunden (Abbildung 53).

Evaluierung

Die 25 Module wurden in insgesamt 11 vier- bis fünfstündigen Workshops mindesten zweifach mit insgesamt 200 Auszubildenden und UmschülerInnen evaluiert. Für die Erprobung wurde nach Absprache mit den zuständigen Lehrkräften und entsprechend der zur Verfügung stehenden Zeit passende Verlaufsplanungen erstellt und Handbücher an die Auszubildenden

ausgegeben. Nach jeder Erprobung wurden sowohl die Materialien als auch der Ablauf verbessert und erneut erprobt. In der Tabelle 60 sind die durchgeführten Evaluierungen mit Datum, zeitlichem Umfang, Zielgruppe und Thema aufgeführt.



Abbildung 53: Screenshot Video „Die Geschichte der Terra Preta“ und Seite aus Comic

Tabelle 60: Übersicht zu den durchgeführten Probeläufen

Termin	Zielgruppe	Thema des Workshops
23.4.2018 9.00 - 15.00 Uhr	Landesstelle für gewerbliche Berufsförderung in Entwicklungsländern, OSZ Peter Lenné	Pflanzenkohle
19.4.2018 9.00 - 15:15 Uhr	Auszubildende Zierpflanzengärtner*in OSZ Peter Lenné	Kompost mit Pflanzenkohle
4.5.2018 9.00 - 14:30 Uhr	UmschülerInnen Koch/ Köchin, HauswirtschafterIn, Hotelfachfrau/ -mann UBB	Kompost mit Pflanzenkohle
18.5.2018 9.00 – 14.00 Uhr	SchülerInnen der Berufsfachschule OSZ Peter Lenné	Pflanzenkohle
22.5.2018 9.00 – 14.00 Uhr	UmschülerInnen Koch/ Köchin UBB	Kompost mit Pflanzenkohle
12.6.2018 8.00 - 11:30 Uhr	Auszubildende Galabau I OSZ Peter Lenné	Pflanzenkohle
15.6.2018 13:30 – 15:15 Uhr	Auszubildende Galabau I OSZ Peter Lenné	Anwendung von Pflanzenkohle
19.6.2018 8.00 - 11:30 Uhr	Auszubildende Galabau II OSZ Peter Lenné	Pflanzenkohle
22.6.2018 13:30 – 15:15 Uhr	Auszubildende Galabau II OSZ Peter Lenné	Anwendung von Pflanzenkohle
3.7.2018 9.00 – 13.00 Uhr	Auszubildende Umweltschutztechnische AssistentInnen OSZ Peter Lenné	Pflanzenkohle
12.7.2018 9.00 - 14:30 Uhr	UmschülerInnen Koch/ Köchin, HauswirtschafterIn, Hotelfachfrau/ -mann UBB	Kompost mit Pflanzenkohle



Abbildung 54: Workshops im Botanischen Garten, am UBB und im BELARE an der Peter Lenné Schule

Jeder Workshop wurde zweifach evaluiert, zum einen mittels mündlichen Feedbacks durch KollegInnen der AG Geoökologie und durch die begleitenden Lehrkräfte, zum anderen mittels eines eigens entwickelten Fragebogens, der an alle Teilnehmenden verteilt wurde. Der Fragebogen enthielt sowohl offene als auch geschlossene Fragen und wurde anonym beantwortet. Es konnten 86 Fragebögen ausgewertet werden. Sowohl der gesamte Workshop als auch die Qualität der Fachinhalte und verwendeten Methoden wurden durch Teilnehmenden mit gut und sehr gut bewertet. Die Antworten der offenen Fragen lassen den

Rückschluss zu, dass sowohl die didaktische Aufbereitung als auch die entstandenen Materialien das Thema Pflanzenkohle inhaltlich und methodisch gut vermitteln konnten (Abbildung 55).

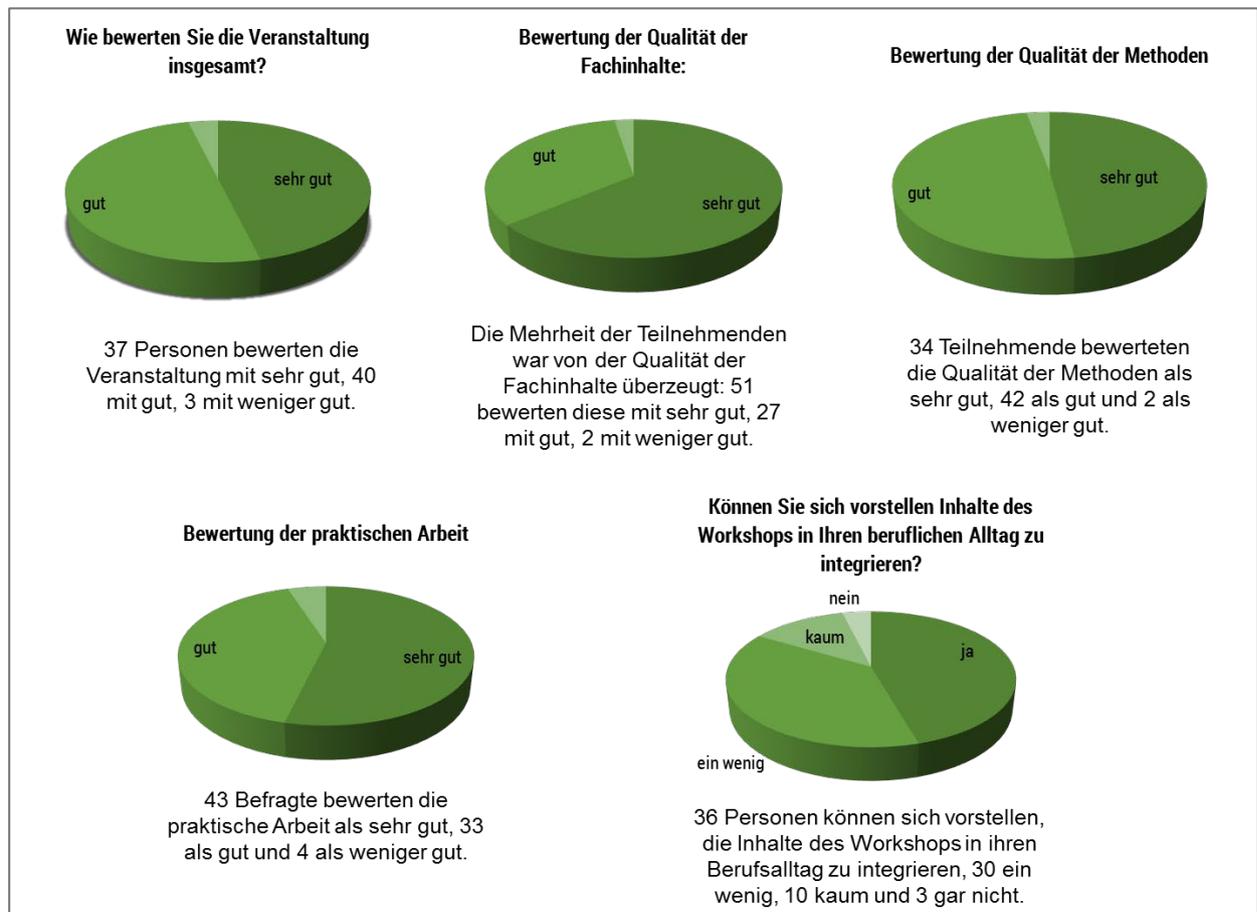


Abbildung 55: Evaluationsergebnisse

Die Frage, welche Inhalte, Beispiele, Methoden und Materialien haben Ihnen am besten gefallen, beantworteten die Teilnehmenden folgendermaßen:

- Praktisches Tüfteln, Verknüpfung von Theorie und Praxis
- Der Versuch Pflanzenkohle selbst herzustellen
- Videos sehr gut in Verständnis und Visualisierung. Präsentation gut, knapp, verständlich. Handbuch ist ein perfektes Nachschlagewerk
- Ich fand es sehr gut, dass wir selbst aktiv werden konnten
- Praktisches Arbeiten, Kompost aufsetzen und Fachwissen, „Gut dass die Kohle so greifbar war.“
- Generell ein guter Misch aus Vorlesung, Praxis, Selbsterarbeitung, Auswertung
- Der praktische Teil hat den theoretischen sehr gut ergänzt
- Anschauliche Beispiele zur Ertragssteigerung durch den Einsatz von Pflanzenkohle
- Pro und Contra Liste, damit der tatsächliche Nutzen zum Vorschein kommt

Folgende Kritik und Anregungen lieferten die Teilnehmenden:

- Mehr Werkzeuge und Pyrolysematerial
- Mehr zu Herausforderungen, die bei Herstellung und Anwendung der Pflanzenkohle entstehen können
- Der konkrete Aufbau des Komposts noch näher erläutern

9.3 Abschließende Erarbeitung und Publikation der Bildungsmodule

Die Ergebnisse der Evaluierung sind in die abschließende Überarbeitung der Bildungsmodule eingeflossen. Entstanden ist ein Bildungsmaterial „**Pflanzenkohle**“ für die berufliche - aber auch schulische - Bildung, in dem das Thema Pflanzenkohle und ihre Anwendung im



Abbildung 56: Titelblatt des Bildungsmaterials Pflanzenkohle

gärtnerischen und landwirtschaftlichen Bereich aufbereitet wurde. In den Blick gelangt dabei die Geschichte und Wiederentdeckung der Terra Preta im Zuge archäologischer und anthropologischer Forschungen sowie die gegenwärtige Herstellung von Pflanzenkohle und Pflanzenkohle-substraten durch die Kompostierung und ihre Anwendung. Zudem wird die Pflanzenkohle als Negative Emissionstechnologie eingeführt und so im Kontext des Klima- und Bodenschutzes und der nachhaltigen Ressourcennutzung verortet.

Mit den entstandenen Lehrmaterialien möchten wir Lehrkräfte ermutigen, gemeinsam mit den Schüler*innen und Auszubildenden Pflanzenkohle zu erproben und anzuwenden und die Schule oder den Betrieb als Lernort für nachhaltige Entwicklung zu nutzen, in

dem durch die Kompostierung und Pyrolyse Stoffkreisläufe geschlossen werden. Ziel ist die vertiefte kognitive Auseinandersetzung mit dem Thema Pflanzenkohle, aber auch die Aneignung praktischer Kompetenzen zur Pyrolyse und Kompostierung sowie der Transfer des Erlernen in eigene Kompostkonzepte oder Pflanzversuche. Die Auszubildenden sollen zudem Pflanzenkohle vor dem Horizont nachhaltiger Entwicklung kritisch diskutieren und bewerten. Die Tabelle 61 stellt die einzelnen Module, mit Methoden und Aktivitäten, der benötigten Zeit und den Lernzielen dar.

Tabelle 61: Modulübersicht aus dem Bildungsmaterial „Pflanzenkohle“

Modul	Methoden & Aktivitäten	Zeit in min	Lernziele Die Schüler*innen oder Auszubildenden:
Einstieg			
Was fällt dir zum Kompost ein?	Brainstorming	variabel	<ul style="list-style-type: none">  erschließen ihr Vorwissen  diskutieren Umgang mit Abfällen  üben spielerisch Kooperation
Kompostierst du und kennst du Pflanzenkohle?	Positionierungsspiel	10-15	
Bamboleo	Ein Spiel zu den Planetaren Grenzen	10-15	
Wissenschaftlicher Hintergrund			
Stoffkreisläufe	Textlektüre und Plakate	20-30	<ul style="list-style-type: none">  erläutern die Funktionsweise von Stoffkreisläufen  beschreiben Terra-Preta-Technik und Rolle von Pflanzenkohle  diskutieren den Bezug der Technik zu den planetaren Grenzen und Stoffkreisläufen
„Die Natur kennt keine Abfälle“ – Der Stoffkreislauf in Ökosystemen	Textlektüre und Plakate	20-30	
Pflanzenkohle: Klimaschutz, Bodenverbesserung und nachhaltige Ressourcennutzung mit der Terra-Preta-Technik	Vortrag mit Videos und Folien	30	
Pflanzenkohle – Herstellung und Qualitätskontrolle			
Pflanzenkohle selbst herstellen	Bau eines einfachen Mikrovergasers oder Laborversuche zur Herstellung von Pflanzenkohle	20 + 30	<ul style="list-style-type: none">  erläutern am Model die Herstellung von Pflanzenkohle  vergleichen technische Anlagen zur Pyrolyse  wenden Testverfahren bzw. Laborverfahren zur Qualitätssicherung der Pflanzenkohle an
Die Herstellung von Pflanzenkohle	Vertiefender Vortrag mit Video und Folien	20	
Die Qualität von Pflanzenkohle	Einfache Tests	15	
Laboruntersuchungen	verschiedene chemische und physikalische Untersuchungen	variabel	
Die Herstellung von Pflanzenkohle	selbstständige Recherchen	45	

Fortsetzung Tabelle 61 Modulübersicht aus dem Bildungsmaterial „Pflanzenkohle“

Kompostieren mit Pflanzenkohle			
Einführung			
Was ist ein Kompost?	Textlektüre und Mindmap	20-30	<ul style="list-style-type: none">  führen Kenntnisse zur Kompostierung aus (Inputstoffe, Verfahren, Systeme, Mischungsverhältnisse, Zuschlagstoffe)  untersuchen Stoffströme, geeignete Systeme und erstellen Kompostkonzept für Schule  beobachten und beschreiben Kompostiervorgang am Mini-komposter
Was kommt alles in den Kompost?	Bilderrätsel	15	
Kompost	Vortrag mit Videos und Folien	20	
Welcher Kompost ist für uns geeignet?	Recherche und Konzept	variabel	
Kompostversuch	Bau eines kleinen Komposters und Versuche	20	
Komposte selber bauen			
Bau eines Kammerkomposts	Recherche und Bau	variabel	 bauen selbständig Kompost auf
Komposte ansetzen & pflegen			
Aufsetzen eines Komposts	Aufbau eines Komposts	variabel	<ul style="list-style-type: none">  setzen Kompost auf und um  wenden verschiedene Untersuchungsverfahren zum Kompostverlauf und zur Qualität an  werten Daten aus und leiten Verbesserungsmaßnahmen ab und setzen diese um
Die drei Phasen der Kompostierung	Erstellen Diagramm	20	
Kompost-Check	Messungen, Tests, Protokollierung	20-30 variabel	
Kompost umsetzen	Umsetzen und Neuaufsetzen des Kompostes	30	
Anwendung der Pflanzenkohlekomposte			
Aufbereitung des fertigen Komposts	Sieben, Substratmischungen	30	<ul style="list-style-type: none">  wenden Testverfahren an und bewerten Qualität  werten Forschungsergebnisse aus  stellen Projekte zu Pflanzenkohle dar  diskutieren Potential hinsichtlich Einhaltung der planetaren Grenzen/ Nachhaltigkeit  entwickeln eigene Versuche  erstellen Substratmischungen
Die Qualität der Pflanzenkohlekomposte	Tests	30	
Die Potentiale der Pflanzenkohlekomposte: Forschungsergebnisse	Auswertung und Diskussion	20	
Gärten und Landwirtschaft mit der Terra-Preta-Technik	Porträts von Projekten und Initiativen	45	
Die Verwendung von Pflanzenkohlekomposten: Eigene Versuche	Entwickeln Versuchsdesign, Daten erheben, Ergebnisse interpretieren	variabel	

Fortsetzung Tabelle 61 Modulübersicht aus dem Bildungsmaterial „Pflanzenkohle“

Exkursionen			
Pflanzenkohle und Terra-Preta-Technik entdecken	Exkursion	variabel	 dokumentieren und diskutieren Anwendungen hinsichtlich Nachhaltigkeit
Reflektion			
Pflanzenkohle: Pro und Contra	Mündliche oder schriftliche Diskussion	20	 erläutern und begründen, was für und gegen den Einsatz von Pflanzenkohle spricht
Pflanzenkohle	Flyer oder andere kreative Beiträge	45	 reflektieren Inhalte, Ergebnisse
Bewertung und Test			
Ergebnisse Test		variabel	 überprüfen erworbenes Wissen

Neben dem Bildungsmaterial für die Berufsschule wurde ein weiteres Unterrichtsmaterial für eine jüngere Zielgruppe entwickelt und in Workshops im Rahmen der Schüleruniversität der FUB erprobt. Das Unterrichtsmaterial „**Boden entdecken**“ bettet das Thema Pflanzenkohle und Kompostierung in eine Entdeckungsreise des Bodens ein (Titelblatt Abbildung 57). In 12 Lernstationen, beschreiben Schüler*innen den Boden, entdecken seine Lebewesen, erforschen seine Entstehung, starten einen Kompostversuch und sammeln Ideen für den Schutz des Bodens. In der Broschüre sind ebenfalls der Bezug zum Rahmenlehrplan dargestellt, ein Vorschlag für den Ablauf eines Projekttages und die einzelnen Lernstationen/Module mit dem wissenschaftlichen Hintergrund erläutert und die entsprechenden Arbeitsblätter angefügt.



Abbildung 57: Titelblatt des Unterrichtsmaterials

Publikation der Bildungsmaterialien

Alle Materialien wurden auf verschiedenen Plattformen veröffentlicht und so sichergestellt, dass die Materialien auch nach dem Projektende interessierten Lehrkräften und der Öffentlichkeit kostenlos als Download zur Verfügung stehen.

Die Materialien sind im Repositorium der Freien Universität Berlin unter diesen Links veröffentlicht:

Bildungsmaterial „Pflanzenkohle“ (ISBN: 978-3-96110-245-7):

<https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/25771>

Unterrichtsmaterial „Boden entdecken“:

<https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/25773>

Beide Bildungsmaterialien, der Comic und die Videos sind zudem auf der Projektwebseite und der Webseite der Arbeitsgruppe Geoökologie abrufbar:

<https://bodenberufsbildung.com/bildungsmaterialien/>

<https://www.geo.fu-berlin.de/geog/fachrichtungen/>

[physgeog/geooekologie/medien/DBU-Bildungsmaterialien.html](https://www.geo.fu-berlin.de/geog/fachrichtungen/physgeog/geooekologie/medien/DBU-Bildungsmaterialien.html)

Auf der Plattform Youtube wurden alle Videos unter dem Link veröffentlicht:

<https://youtu.be/-8nIVYAhne8>.

Auf dem BNE-Portal stehen die Materialien ebenfalls zur Verfügung.

Auf die Bildungsmaterialien wurde im BMU-Newsletter Bildungsservice 09/2019 und im Newsletter von Harry Funk, dem BNE-Beauftragten der Berliner Senatsverwaltung für Bildung hingewiesen.

9.4 Durchführung von Workshops zu den Bildungsmaterialien mit Multiplikator*innen

Die Bildungsaktivitäten im Projekt waren zweistufig konzipiert. Nach der Entwicklung und Evaluierung der Bildungsmodule galt es im zweiten Schritt die entstandenen Bildungsmodule und Bildungsmaterialien an Multiplikator*innen in Weiterbildungen zu vermitteln. Zu den Multiplikator*innen zählten die Fachlehrkräfte in der Berufsschule Peter Lenné, das gärtnerische Personal der Berufsschule, die Umweltbildner*innen des Prinzessinnengartens, urbane Gärtner*innen, Grundschullehrkräfte und das gärtnerische und pädagogische Personal der Berliner Gartenarbeitsschulen (In Berlin gibt es 15 Gartenarbeitsschule, ein Netz grüner Lernorte, in dem Kinder und Jugendliche mit allen Sinnen lernen und Naturerfahrungen mit Pflanzen und Tieren sammeln können. Insgesamt wurden mit den 8 Weiterbildungen ca. 200 Multiplikator*innen erreicht und geschult. Im Anschluss sind alle Fortbildungstermine aufgeführt.

05.11.2019 „Boden begreifen“: Fortbildung für Lehrkräfte der Kreativgrundschule Treptow

25.02.2019 „Boden begreifen“: Fortbildung für Lehrkräfte (Grund- und Sekundarschule) bei der Schüleruniversität der FUB

26.03.2019 „Pflanzenkohle“: Fortbildung für Lehrkräfte und Gärtner*innen an der Peter Lenné Schule

03.05.2019 „Pflanzenkohle“: Fortbildung für Umweltbildner*innen Nomadisch Grün gGmbH/ Prinzessinnengarten

12.08.2019 „Pflanzenkohle“: Fortbildung für Lehrkräfte, Dozent*innen und Gärtner*innen der Berliner Gartenarbeitsschulen

01.10.2019 „Pflanzenkohle im Labor“: Fortbildung für Lehrkräfte an der Peter Lenné Schule

18.10.2019 „Pflanzenkohle und Kompost“: Fortbildung für Dozentin am UBB

27.10.2019 „Pflanzenkohle“: Bodenworkshop für urbane Gärtner*innen.

10 Öffentlichkeitsarbeit und Vernetzung

10.1 Öffentlichkeitsarbeit

Gemeinsam mit der Grafikerin Heide Kolling wurde für das Projekt einer CI, zu der ein griffigerer Name und ein Logo (Abbildung 58) gehörte, eine Webseite, ein Flyer und ein Rollup (Abbildung 59) entwickelt und umgesetzt. Der Kurztitel des Projekts lautet nun BodenBerufsBildung und wird durch folgendes Logo verbildlicht.



Abbildung 58: Kurzname und Logo des Projekts



Abbildung 59: Projektinformation für Präsentationen auf Veranstaltungen und Tagungen (Rollup)

Die Webseite BodenBerufsBildung (Abbildung 60) informiert über das Projekt und seine Ziele, stellt aktuelle Aktivitäten dar und dient der Publikation der Bildungsmaterialien und Forschungsergebnisse. Die Webseite ist aufrufbar über den Link: <https://bodenberufsbildung.com/>.



Abbildung 60: Screenshot der Projektwebseite

Neben der Projektwebseite wird ebenfalls auf der Webseite der Arbeitsgruppe Geoökologie über das Projekt informiert:

<https://www.geo.fu-berlin.de/geog/fachrichtungen/physgeog/geooekologie/forschung>

Seitens des Prinzessinnengartens wurde ebenfalls eine Website für die Aktivitäten auf dem Gut Hellersdorf aufgesetzt (www.guthellersdorf.net), auf der auch das Kompostprojekt vorgestellt und dokumentiert wird.

Tagungen, Workshops, Veranstaltungen zur Öffentlichkeitsarbeit

Das Projekt wurde einem interessierten Fachpublikum auf folgenden Veranstaltungen vorgestellt:

25.7.2017	Agrokarbo , SRH Berlin	Dr. Robert Wagner, Dr. Bianca Schemel
28./29.9.2017	Fachverband Pflanzenkohle , Geisenheim	Dr. Robert Wagner
14.9.2017	BilRess-Tagung , IGA Berlin	Dr. Bianca Schemel
17.10.2017	Teaching Incubator , FU Berlin	Dr. Bianca Schemel
23.2.2018	Grüne Woche Berlin , Präsentation	Dr. Ursula Weiß, Dr. Bianca Schemel
7./ 8.4.2018	Staudenmarkt Botanischer Garten Berlin , Stand und Führungen	Dr. Robert Wagner, Dr. Ursula Weiß
3.5.2018	Botanischer Garten Berlin , Führung für Mitglieder des Unabhängigen Instituts für Umweltfragen e.V.	Dr. Robert Wagner, Dr. Bianca Schemel
06.05.2018	Internationale Konferenz zur nachhaltigen Entwicklung , Zhejiang International Studies University, Hangzhou, VR China	Vortrag, Dr. Bianca Schemel
20.-22.5.2018	Berliner Energietage , Posterpräsentation	Dr. Robert Wagner
09.6.2018	Lange Nacht der Wissenschaften FU Berlin , Stand	Dr. Bianca Schemel, Dr. Robert Wagner
11./12.10.2018	DBG-Tagung Leipzig , 2. Symposium, Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft	Vortrag Dr. Ursula Weiß
29.11.2019	CarboTip , Projektvorstellung durch Dr. Bianca Schemel, Nico Dürkop (Gutsgarten Hellersdorf) und Babette Berndt (OSZ Peter Lenné)	
19.03.2019	BilRess-Tagung Berlin , interaktive Lernstation mit Vorstellung des Projekts und der Bildungsmaterialien	Dr. Bianca Schemel



Abbildung 61: Präsentation auf der Grünen Woche (li. Bild), Führung Botanischer Garten (re. Bild)



Abbildung 62: Stand zur Langen Nacht der Wissenschaften FU Berlin, 09.06.2018

Für eine Reportage wurden die beiden Projekte „Bodenberufsbildung“ und „CarboTip“ unserer Arbeitsgruppe in Dreharbeiten porträtiert. Der Film „Ackern für die Zukunft“ wurde am Freitag, den 20.7.2018 um 19:40 auf ARTE und ebenfalls im ZDF ausgestrahlt (<https://www.berlin-producers.de/project/plan-b-ackern-fuer-die-zukunft/>).

Besondere Aufmerksamkeit fand das Projekt ebenfalls durch die Bewerbung und Preisverleihung der Peter Lenné Schule zur „Umweltschule Europa – Agenda 21 Schule“ am 27.6.2016 im Roten Rathaus Berlin. Darüber hinaus trugen die Projektaktivitäten auch zu einer weiteren Auszeichnung der Peter Lenné Schule als einer von 55 herausragenden Lernorten für nachhaltige Bildung durch BMBF und Unesco Kommission bei (<https://www.bne-portal.de/auszeichnungen>).



Abbildung 63: Auszeichnung Umweltschule Europa – Agenda 21 Schule, Rotes Rathaus



Jury 2018

- Frau Blumenthal (PIK)
- Frau Bock (UJF)
- Frau Brandstätter (SenBildUJFam)
- Frau Bruch (DIZ)
- Frau Büchner (SIA LIFE & Aquadom)
- Herr Dietzen (Grün macht Schule)
- Frau Fleischer (Jugend- und Familienstützstelle des Landes Berlin)
- Herr Funk (SenBildUJFam)
- Frau Gersdorff (SenArbeitsSchule Pankow)
- Frau Jammes (GASAG)
- Frau Käsbohrer (CO₂ Online)
- Frau Krohn (ISS)
- Frau Krümmel (Iraus der kleinen Forscher)
- Frau Sonnenschein (BSR)
- Frau Wagensell (SUZ Spandau)

Jurybeurteilung

Peter-Lenné-Schule

In diesem Jahr überzeugte die Peter-Lenné-Schule die Jury zum einen mit ihrem Peer-to-Peer-Ansatz bei der Organisation und Durchführung eines Umwelttages. Zum anderen beeindruckte, dass Schüler und Schülerinnen aus nahezu allen Bildungsgängen zum Thema „Nachhaltige Ressourcennutzung mit Pflanzenkohle“ gemeinsam mit der FU Berlin modular und experimentell geschult wurden.

Weitere besondere Erfolge wurden in den Bereichen Wasseranalyse im Bio-Energielabor, Mülltrennung, Bauen mit Europaletten, Zubereitung von Marmelade und Wildkräutersalaten, Upcycling und nachhaltige Sanitärversorgung erzielt. Alle Projektansätze sind sowohl im Schulprogramm als auch in den Fachcurricula verankert.

Öffentlichkeitsarbeit der Projektpartner

Die PGB hat im Rahmen verschiedener Veranstaltungen, wie z.B. der Wandelwoche Brandenburg, eines Sommerfestes und der offenen Gemeinschaftsgartentage das Projekt diversen Einzelpersonen und Gruppen vorgestellt, z.B. Studierenden der TU im Rahmen einer Führung oder während der Langen Nacht der Wissenschaft an der TU.

10.2 Vernetzung

Eine Vernetzung mit den BIBB-Modellprojekten „Berufsbildung für nachhaltige Entwicklung“ und BBNE-Projekten aus dem BilRes-Netzwerk wurde auf den Tagungen in Berlin angebahnt. Es fanden Vernetzungen mit FU internen Akteuren, wie der Stabstelle für Nachhaltigkeit statt, externen Bildungsakteuren, wie dem Bildungscent e.V. und Bildungseinrichtungen, z.B. OSZ Gastgewerbe, Schule an der Jungfernheide, Berliner Gartenarbeitsschulen und der Deutschen Schreberjugend.

Tagung BodenBilden am 5.12.2019



Zum Abschluss der Bildungsaktivitäten im Projekt wurde eine Tagung organisiert, die sich an lokale Berliner Akteur*innen aus der BNE-Bereich, den urbanen Gärten und der Wissenschaft richtete. Die Tagung diente dem gemeinsamen Austausch über didaktische und methodische Ansätze der Bildung von und zu Boden, und gab die Gelegenheit zur Vernetzung. An der Tagung nahmen ca. 80 Personen teil. Das Programm der Veranstaltung ist im Folgenden dargestellt.

Programm BodenBilden 5.12.2019

09:30 – 10:00	Begrüßung durch Prof. Dr. mult. Dr. h. c. Konstantin Terytze (AG Geoökologie, FUB) & Verena Exner (Deutsche Bundesumweltstiftung DBU)
10:00 – 10:30	„Wenn das alle machen würden: Potenziale von Bildung, Boden, Beruf“. Julia Seim (Referentin, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU, Schwerpunkt Berufliche Bildung)
11:00 – 11:30	Kennlerngespräche mit anschließender Kaffeepause
11:30 – 12:30	parallele Session Weltacker. Wie viel Acker kommt auf den Teller. Aktionsideen zur nachhaltigen Landwirtschaft. Virginia Boye, 2000m ² -Projekt, Zukunft Stiftung Landwirtschaft Berlin Heißer Draht. Planspiel zum Kupferabbau Mauricio Pereyra, Koordinator Projekt Globales Lernen für die berufliche Bildung beim EPIZ Berlin
12:30 – 13:00	'Boden' in der elementaren Bildung: Das Fenster öffnen! Experimentalvorlesung. Axel Schröder (Dipl.-Geogr., GEOGNOSTICS Boden- und Gewässerschutz)
13:00 – 14:00	Mittagspause
14:00 – 14:45	Die Potentiale von Pflanzenkohle im Boden und in der beruflichen Bildung. Dr. Ursula Weiß, Dr. Robert Wagner, Dr. Bianca Schemel, Freie Universität Berlin, AG Geoökologie, Daniel Dermitzel, Gutsgarten Hellersdorf, Klaus Pellmann, Peter Lenné Schule
15:00 – 15:30	Marktplatz der Bodenmöglichkeiten: Vernetzung bei Kaffee & Tee
15:45 – 16:30	Wie gelingt Bodenbildung? Diskussion und Statements
16:30 – 17:00	Fazit und Verabschiedung

11 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der Beruflichen Bildung für nachhaltige Entwicklung (BBNE) fanden während der UN-Dekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ von 2004-2014 umfangreiche Aktivitäten statt, doch die strukturelle Integration von BBNE ist in Deutschland bisher nur in Ansätzen gelungen. Konkrete BNE-Themen, eine Verankerung von BNE- Methoden und Kompetenzen sind nur vereinzelt in der beruflichen Bildung zu finden. Entscheidend ist nun die strukturelle Verankerung von nachhaltigkeitsorientierten Kompetenzentwicklungszielen in der beruflichen Aus- und Weiterbildung. Dabei gilt, dass BBNE konkret, sichtbar und erlebbar werden muss und dass nachhaltigkeitsorientierte Kompetenzen an konkrete berufliche Handlungs- und Tätigkeitsfelder geknüpft sind.

Das Forschungsvorhaben „Verwertung von Gemüse- und Grünschnittabfällen zur Herstellung von Pflanzenkohlesubstraten für ein klimafreundliches Gärtnern - Modellprojekt in der Berufsbildung für nachhaltige Entwicklung“ untersuchte die Schließung regionaler Stoffkreisläufe mittels Pflanzenkohletechnologie und schuf Modellprojekte, um berufliche und schulische Aus- und Weiterbildung zu fördern und anschaulich erlebbar zu machen.

Die Pflanzenkohletechnologie wird auf internationaler Ebene vermehrt als eine Option zur Rückführung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre (carbon dioxide removal; kurz CDR Technologie) diskutiert. Pflanzenkohle bezeichnet das Endprodukt der Karbonisierung von Biomasse durch Pyrolyse bei einer Temperatur zwischen 350 und 900 °C. Bei der Karbonisierung wird im Gegensatz zur Verbrennung oder natürlichen Verrottung nur etwa 50 - 60 % des in der Biomasse gespeicherten Kohlenstoffs wieder an die Atmosphäre abgegeben. Die Prozesstemperaturen bestimmen dabei maßgeblich die Eigenschaften, wie z. B. Kohlenstoffgehalt und Stabilität. Die hohe Stabilität und damit die langfristige Festlegung von Kohlenstoff in der Pflanzenkohle und deren stoffliche Anwendung könnte eine signifikante Rolle bei der Verlangsamung des Anstiegs der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen spielen.

Durch den Aufbau bzw. die Nutzung von Kompostieranlagen mit Pflanzenkohle, entstanden modellhafte Lernorte am Umweltbildungszentrum Berlin, im Gutsgarten Hellersdorf und im Botanischen Garten Berlin-Dahlem, an denen zugleich lokale Stoffkreisläufe geschlossen wurden. Die Kompostierung mit Pflanzenkohle wurde an den einzelnen Modellstandorten wissenschaftlich begleitet und die Umweltwirkung mittels Klimabilanz ermittelt und mit der energetischen Nutzung durch Vergärung/Biogas bzw. Verbrennung verglichen.

Der Kompostiersversuche am UBB und im Gut Hellersdorf konnten zeigen, dass Pflanzenkohle die Bedingungen für die Kompostierung hinsichtlich der Minderung von Treibhausgasen optimiert. In der Studie am UBB z. B., führte Pflanzenkohle zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 32 % CO_{2eq} im Vergleich zum Kontrollansatz ohne Pflanzenkohle. Die geringeren Emissionen liegen wahrscheinlich an einer besseren Auflockerung des Inputmaterials (Rasenschnitt und Gemüse-/Obstafälle) und damit an einer

verbesserten Belüftung des Kompostmaterials. Beobachtungen an verklebten Rasenmatten im Kontrollansatz legen dies nahe.

Für die Kompostqualität ließen sich ebenfalls positive Effekte beobachten. So zum Beispiel ein höherer Anteil organischer Substanz, der im Kompost erhalten bleibt.

Bezieht man dies auf die Emissionssituation der Berliner Eigenkompostierung, könnten dadurch die Belastung um 37 kg CO_{2eq} pro Tonne Bio- und Grünabfall gesenkt werden. Für die gesamten im Berliner Raum eigenkompostierten Biomassen könnte das eine Einsparung von ca. 3.700 Tonnen CO_{2eq} pro Jahr bedeuten.

Die Veränderung hin zu einer Eigenverwertung verbessert die CO₂-Bilanz hinsichtlich der untersuchten Entsorgungs-/Verwertungswege des UBB beträchtlich. Das Szenario Entsorgung ergab eine geringe Entlastung von 2 kg CO_{2eq} pro Jahr. Die Umstellung hin zur Eigenverwertung führt durch die Kompostierung mit Pflanzenkohle zu einer jährlichen Entlastung von 170 kg CO_{2eq}.

Der Vergleich der Verwertungswege am Modellstandort Gut Hellersdorf zeigt aber auch, dass bei der Kompostierung mit Pflanzenkohle alle Umweltentlastungspotentiale genutzt werden müssen, um eine ebenso gute Bilanz zu erzielen, wie die Verwertung von Bioabfällen zu Biogas in der Anlage BSR West und die energetische Nutzung von Holzhackschnitzeln. Erst bei der Herstellung von Pflanzenkohle vor Ort, am Betriebsstandort, und der Nutzung der entstehenden Wärme zur Substitution von fossilen Energieträgern sowie der Anrechnung einer zusätzlichen Humusanreicherung gleicht sich die Bilanz an.

In Abhängigkeit der Inputstoffe für die Kompostierung, der Pflanzenkohleeigenschaften und des Kompostierprozesses entstanden unterschiedliche Pflanzenkohlekomposte deren pflanzenbauliche Wirkung in Hochbeeten in Hellersdorf und in Gartenbeeten am Umweltbildungszentrum in einer Vegetationsperiode getestet wurden. Mit den Komposten wurden in unterschiedlichem Maße Kohlenstoff, pflanzen verfügbarer Stickstoff, Phosphor und Kalium eingebracht. Dies wirkte sich auf die höhere Frischmassebildung der Stark- und Mittelzehrer aus. Kalium- und Phosphordünger kann eingespart werden da eine Überversorgung dieser Pflanzennährstoffe nachgewiesen werden konnte.

Für die berufliche Aus- und Weiterbildung zum Thema „Stoffkreisschließung mit Pflanzenkohle“ wurden 25 Bildungsmodule entwickelt. Die Module wurden an den Lernorten in insgesamt 11 vier- bis fünfstündigen Workshops mindesten zweifach mit insgesamt 200 Auszubildenden und UmschülerInnen positiv evaluiert.

Entstanden ist ein Bildungsmaterial „**Pflanzenkohle**“ für die berufliche - aber auch schulische - Bildung, in dem das Thema Pflanzenkohle und ihre Anwendung im gärtnerischen und landwirtschaftlichen Bereich aufbereitet wurde. In den Blick gelangt die gegenwärtige Herstellung von Pflanzenkohle und Pflanzenkohlesubstraten durch die Kompostierung und ihre gärtnerischen Anwendungen. Die Pflanzenkohle-Technologie wird im Kontext des Klima- und Bodenschutzes und der nachhaltigen Ressourcennutzung verortet und als Negative Emissionstechnologie eingeführt. Das 154-seitige Bildungsmaterial gliedert sich in sechs

Kapitel: der gegenwärtige **Forschungsstand** wird dargelegt, dem eine **Übersicht** folgt, in der alle Module mit Lernzielen, Methoden und Aktivitäten sowie die benötigte Zeit dargestellt sind, zudem werden die **Bezüge zu den Rahmenlehrplänen** erläutert und welche Anknüpfungsmöglichkeiten in den Lerngebieten, bei den Lernthemen und Inhalten in den jeweiligen Ausbildungen bestehen. Im Anschluss sind alle **Module** ausführlich mit Methoden, Vorgehensweise und benötigten Materialien und Vorbereitungen beschrieben. Exemplarisch wird ein **Ablauf** für ein Projekttag und ein sechsmonatiges Unterrichtsprojekt vorgestellt. Daran schließen sich die **Materialien für den Unterricht** an, die Arbeitsblätter, Präsentationen, Handouts u.ä. enthalten. Das Lehrmaterial „Pflanzenkohle ermutigt und leitet dazu an, in Schule, Betrieb und Garten Pflanzenkohle zu erproben und anzuwenden und durch die Kompostierung und Pyrolyse Stoffkreisläufe zu schließen. Es werden damit handlungsorientierte Kompetenzen für eine nachhaltige Entwicklung im beruflichen und privaten Kontext angebahnt.

Darüber hinaus entstand ein weiteres Bildungsmaterial „Boden entdecken“ für die 5. und 6. Klasse, das das Thema Pflanzenkohle und Kompostierung in einen Projekttag zum Boden einbettet. In 12 Lernstationen, beschreiben Schüler*innen den Boden, entdecken seine Lebewesen, erforschen seine Entstehung, starten einen Kompostversuch und sammeln Ideen für den Schutz des Bodens. In der Broschüre sind ebenfalls der Bezug zum Rahmenlehrplan dargestellt, ein Vorschlag für den Ablauf eines Projekttages und die einzelnen Lernstationen/Module mit dem wissenschaftlichen Hintergrund erläutert und die entsprechenden Arbeitsblätter angefügt. Im Rahmen der Schüleruniversität der FUB wurden der Projekttag zweimal erprobt und positiv evaluiert.

Der Transfer der Bildungsmaterialien erfolgte in Weiterbildungen für Multiplikator*innen. In insgesamt 8 Weiterbildungen wurden 200 Lehrkräfte und Umweltbildner*innen aus Berufsschule, Berliner Gartenarbeitsschulen und Grundschulen und Gärtner*innen aus den Schulen, Kleingärten und Urban Gardening Projekten fortgebildet.

Beide Lehrmaterialien wurden online publiziert und sind auf verschiedenen Plattformen kostenlos abrufbar.

Die Bildungsaktivitäten des Projekts fanden ihren Abschluss mit der Tagung „BodenBilden“ am 5.12.2019, zu der insgesamt 80 lokale Berliner Akteure aus BNE- und Umweltbildung, Kleingärten und urbanen Gärten sowie Wissenschaft und Kunst. Die Tagung diente der Information zu verschiedenen didaktischen und methodischen Ansätzen der Bodenbildung und dem Austausch und der Vernetzung.

Die Brisanz des fortschreitenden Klimawandels ist auch bei uns immer mehr zu spüren. Emissionen müssen daher auf allen Ebenen drastisch reduziert werden. Das wird nach derzeitigem Wissenstand aber nicht ausreichen, die Erderwärmung zu verhindern. Deshalb braucht es Negativ-Emissionen und zusätzliche Kohlenstoff-Senken. Die Pflanzenkohletechnologie kann hierzu auf regionaler und lokaler Ebene einen Beitrag zur Senkung von THG, der Speicherung von Kohlenstoff und der Substitution fossiler Energieträger liefern.

12 LITERATUR

- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., Wessolek, G. (2013): Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202, 183-191
- AD HOC-AG Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5. Verb. u erw. Aufl. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Amlinger, F., Peyr, S. and Cuhls, C. (2008): Greenhouse gas emissions from composting and mechanical biological treatment. *Waste Management and Research*, 26, S.47-60
- Andersen JK, Boldrin A, Samuelsson J, Christensen TH, Scheutz C (2010a): Quantification of greenhouse gas emissions from windrow composting of garden waste. *J Environ Qual* 39, S.713–724
- Andersen, J. K., Boldrin, A., Christensen, T. H. and Scheutz, C. (2010b). Greenhouse gas emissions from home composting of organic household waste. *Waste Management*, 30, S.2475-2482
- Angst, T. A., Sohi, S. P. (2013): Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar. *Bioenergy* 5, 221–226, doi: 10.1111/gcbb.12023
- Awasthi, M.K., Wang, Q., Huang, H., Li, R., Shen, F., Lahori, A.H., Wang, P., Di Guo, Guo, Z., Jiang, S., Zhang, Z. (2016): Effect of biochar amendment on greenhouse gas emission and bio-availability of heavy metals during sewage sludge co-composting, in: *Journal of Cleaner Production* 135, S.829-835
- Barthod, J., Rumpel, C. & Dignac, M.-F. (2018): Composting with additives to improve organic amendments. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 38 (2): 17 p.
- BBodSchV (2012): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt geändert durch Artikel 5 Absatz 31 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)
- Beck-Friis, B., Pell, M., Sonesson, U., Jönsson, H., Kirchmann, H. (2000): Formation and emission of N₂O and CH₄ from compost heaps of organic household waste. *Environmental Monitoring and Assessment* 62 (3), S.317–331
- Beste, A. (2016): Der Boden, von dem wir leben. *Der kritische Agrarbericht* 2016. S. 74 – 79.
- Bezirksamt Spandau Berlin (2014): *Mein Garten in der Großstadt*. Umweltbewusst Gärtnern. Abgerufen am 14.10.2020
- BGK (Bundesgütegemeinschaft Kompost) (2009): In BGK (2006) Kapitel VIII E; 1. Erg.Lfg. 9/2009

- BGK (Bundesgütegemeinschaft Kompost) (2018): Gütesicherung. Schwellenwerte und Grenzwerte Kompost. Dok.51-006-4. www.kompost.de/guetesicherung/guetesicherung-kompost/download
- Biederman, L. A., Harpole, W. S. (2013): Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5 (2): 202-214. doi: 10.1111/gcbb.12037
- Bioabfallverordnung (BioAbfV) (2017): Bioabfallverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. April 2013 (BGBl. I S. 658), geändert zuletzt durch Artikel 3 Absatz 2 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465).
- Bioabfallverordnung (BioAbfV) (2017): Bioabfallverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. April 2013 (BGBl. I S. 658), geändert zuletzt durch Artikel 3 Absatz 2 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465).
- Blackwell, P., Riethmuller, G., Collins, M. (2009): Biochar Application to Soil, in: Lehmann, J., Joseph, S. (Hrsg.): *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, New York, S.207-226
- Boldrin A, Andersen KJ, Moller J, Christensen HT, Favoino E (2009): Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Manage Res* 27, S.800–812
- Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J., Fuertes-Mendizábal, T., Sigua, G., Spokas, K., Ippolito, J., Novak, J.: (2019) Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. *Science of the Total Environment* 651 (2019) 2354–2364. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060
- Bridle, T.R., Hammerton, I., Hertle, C.K. (1990): Control of heavy metals and organochlorines using the oil from sludge process. *Water Science and Technology* 22, 249-258
- Bundesgütegemeinschaft Kompost (2018): Gütesicherung. Schwellenwerte und Grenzwerte Kompost. Dok.51-006-4. www.kompost.de/guetesicherung/guetesicherung-kompost/download
- Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK) (2006): *Methodenhandbuch zur Analyse organische Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate*, 5.Auflage, erschienen im Selbstverlag
- Butnan, S., Deenik, J. L., Toomsan, B., Antal, M.J., Vityakona, P. (2015): Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. *Geoderma* 237-238:105-116. doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.010

- Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Hrsg.) (2008): Soil sampling and methods of analysis, 2. Auflage, Boca Raton, 1224 Seiten
- Case, S. D. C., McNamara, N. P., Reay, D. S., Whitaker, J. (2012): The effect of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from a sandy loam soil - The role of soil aeration. *Soil Biology and Biochemistry*, 51, 125-134.
- Chen, D., Liua, X., Biana, R., Chenga, K., Zhanga, X., Zhenga, J., Joseph, S., Crowley, D., Pana, G., Lia, L. (2018): Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals – A meta-analysis. *J. Environ. Manage.* 222 (2018) 76–85. doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.004
- Chen, K-S-, Pai, C.-Y., Lai, H.-L. (2020): Amendment of Husk Biochar on Accumulation and Chemical Form of Cadmium in Lettuce and Pak-Choi Grown in Contaminated Soil. *Water*, 12, 868; doi:10.3390/w12030868
- Chowdhury, M.A., de Neergaard, A., Jensen, L.S., (2014): Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during manure composting. *Chemosphere* 97, S.16–25
- Clemens, J. and Cuhls, C. (2003): Greenhouse gas emissions from mechanical and biological waste treatment of municipal waste. *Environmental Technology*, 24, S.745-754
- Clough, T., Condon, T. Kammann, C., Müller, C. (2013): A Review of Biochar and Soil Nitrogen Dynamics. *Agronomy* 3, 275-293; doi:10.3390/agronomy3020275
- Colón, J, Cadena, E., Pognani, M., Barrena, R., Sánchez, A., Font, X., Artola, A. (2012): Determination of the energy and environmental burdens associated to the biological treatment of source-separated Municipal Solid Wastes. *Energy Environ Sci* 5, S.5731–5741
- Conte, P., Schmidt, H.-P. und Cimò, G. (2015). Research and Application of Biochar in Europe. Doi.org/10.2136/sssaspecpub63.2014.0050.
- Cuhls, C.; Mahl, B.; Berkau, S.; Clemens, J. (2015): Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen. Abschlussbericht zum FKZ 206 33 326. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau.
- Czekala, W., Malińska, K., Cáceres, R., Janczak, D., Dach, J., Lewicki, A., (2016): Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar – The effect of biochar on temperature and C-CO₂ emission. *Bioresour, Technol.* 200, S.921–927
- Deutsche UNESCO-Kommission e. V. (DUK) (2014): Vom Projekt zur Struktur. Strategiepapier der Arbeitsgruppe „Berufliche Aus- und Weiterbildung“ in der UN-Dekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“. https://www.bne-portal.de/files/20141127_Strategiepapier_BBNE.pdf

- Dias, B.O., Silva, C.A., Higashikawa, F.S., Roig, A., Sanchez-Monedero, M.A. (2010). Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: Effect on organic matter degradation and humification. *Bioresource Technology*, 101, 1239-1246
- DIN 19684-3 (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Chemische Laboruntersuchungen - Teil 3: Bestimmung des Glühverlusts und des Glührückstands.
- DIN EN 16086-2 (2012): Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate – Bestimmung der Pflanzenverträglichkeit – Teil 2: Petrischalentest mit Kresse; Deutsche Fassung EN 16086-2:2011
- DIN EN ISO 11885 (2009): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES)
- DIN ISO 10390 (2005): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes.
- DIN ISO 11260 (1997): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität und der Basensättigung unter Verwendung von Bariumchloridlösung.
- DIN ISO 11464 (1996): Bodenbeschaffenheit - Probenvorbereitung für physikalisch-chemische Untersuchungen.
- DIN ISO 11465 (1996): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf Grundlage der Masse - Gravimetrisches Verfahren.
- DIN ISO 13878 (1998): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Gesamt-Stickstoffs durch trockene Verbrennung.
- Downie, A., Crosky, A., Munroe, P. (2009): Physical Properties of Biochar. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Hrsg.): *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*, Earthscan, London, S. 13-29
- DSLVL (2013): Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik. Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V., S. 67.
- EBC (2012): 'European Biochar Certificate – Richtlinien für die nachhaltige Produktion von Pflanzenkohle', European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland, <http://www.european-biochar.org/en/download>. Version 8.3G vom 1. September 2019
- Ebert, K. (Hrsg.) (2009): Nutzung von Biomasse in Berlin, Endbericht – Kurzfassung, im Auftrag der: Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Berlin, 62 Seiten
- Elad, Y., David, D.R., Harel, Y.M., Borenshtein, M., Kalifa, H.B., Silber, A., Graber, E.R. (2010): Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. *J Phytopathol* 100(9): 913-921

- El-Naggara, A., El-Naggar, A. H., Shaheend, S. M., Sarkarg, B., Changi, S. X., Tsangji, D. C.W., Rinklebe, J., Oka, Y. S. (2019): Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: A review. *J. Environ. Manage* 241: 458–467. doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.044
- Ermolaev, E. (2015): Greenhouse gas emissions from food and garden waste composting. Effects of management and process conditions. Uppsala: Department of Energy and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences (*Acta Universitatis agriculturae Sueciae*, 2015:44), 78 Seiten
- Ermolaev, E., Sundberg, C., Pell, M., Jönsson, H. (2014): Greenhouse gas emissions from home composting in practice. In: *Bioresource technology* 151, S.174–182
- Falco, C., Caballero, F.P., Babonneau, F., Gervais, C., Laurent, G., Titirici, M.M., Baccile, N. (2011): Hydrothermal Carbon from Biomass: Structural Differences between Hydrothermal and Pyrolyzed Carbons via ¹³C Solid State NMR. *Langmuir* 27, 14460-14471
- FAOSTAT, (2011): Highlights on wood charcoal: 2004-2009. http://faostat.fao.org/Portals/_faostat/documents/pdf/wood%20charcoal.pdf (abgerufen 2015-06-06).
- Febrisiantosa, A., Ravindran, B. & Choi, H.L. (2018): The Effect of Co-Additives (Biochar and FGD Gypsum) on Ammonia Volatilization during the Composting of Livestock Waste. *Sustainability* 10 (3): 795-883.
- Feller, C.; Fink M.; Laber, H.; Maync, A.; Paschold, P.; Scharpf, H.C.; Schlaghecken, J.; Strohmeyer, K.; Weier, U.; Ziegler, J. (2011) Düngung im Freilandgemüsebau. In: Fink, M. (Hrsg.): *Schriftenreihe des Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ)*, 3. Auflage, Heft 4, Großbeeren.
- Fidel, R., Laird, D., Spokas, K. (2018): Sorption of ammonium and nitrate to biochars is electrostatic and pH-dependent. *Scientific Reports* 8:17627. DOI:10.1038/s41598-018-35534-w
- Fischer, D., Glaser, B. (2012): Synergisms between Compost and Biochar for Sustainable Soil Amelioration, in: Kumar, S., Bharti, A. (Hrsg): *Management of Organic Waste*, S.167-198
- Frenkel, O., Jaiswal, A.K., Elad, Y., Lew, B., Kammann, C., Graber, E.R. (2017): The effect of biochar on plant diseases: What should we learn while designing biochar substrates? *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.* 25(2): 105-113. doi.org/10.3846/16486897.2017.1307202

- Godlewska, P., Schmidt, H.-P., Ok, Y.S., Oleszczuk, P. (2017): Biochar for composting improvement and contaminants reduction. A review, in: *Bioresource technology*, S.193-202
- Haakonsen, G., Kvingedal, E. (2001): Utslipp til luft for vedfyring i Norge. Technical report, Statistics Norway. In: Christian Solli & Marte Reenaas & Anders Hammer Strømman & Edgar G. Hertwich (2009): *Life cycle assessment of wood-based heating in Norway*. Springer-Verlag, *Int J Life Cycle Assess* 14. S. 517–528
- Hagemann, N., Kammann, Cl., Schmidt, H-P., Kappler, A., Behrens, S. (2017): Nitrate capture and slow release in biochar amended compost and soil. *PLoS ONE* 12(2): e0171214, S.1-16. doi.org/10.1371/journal.pone.0171214
- Hagemann, N., Joseph, S., Schmidt, H.P., Kammann, C., Harter, J., Borch, T., Young, R. B., Varga, K., Taherymoosavi, S., Elliott, W., McKenna, A., Albu, M., Mayrhofer, C., Obst, M., Conte, P., Dieguez-Alonso, A., Orsetti, S., Subdiaga, E., Behrens, S., Kappler, A. (2017): Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. *Nature communications* 8: 1089. DOI: 10.1038/s41467-017-01123-0
- Hagemann, N., Subdiaga, E., Orsetti, S., la Rosa, J.M., Knicker, H., Schmidt, H-P., Kappler, A., und Behrens, S. (2018): Effect of biochar amendment on compost organic matter composition following aerobic composting of manure. *Science of The Total Environment*, Volumes 613–614, S. 20-29
- Haider, G; Koyro, H.-W.; Azam, F.; Steffens, D., Müller, Ch., Kammann, C. (2014): Biochar but not humic acid product amendment affected maize yields via improving plant-soil moisture relations. *Plant Soil*. DOI 10.1007/s11104-014-2294-3
- Harel, Y. M., Elad, Y., Rav-David, D., Borenstein, M., Shulchani, R. Lew, B., Graber, E. R. (2012): Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. *Plant and Soil* 357:245–257. DOI 10.1007/s11104-012-1129-3
- Haubold-Rosar, M. (2019): Biokohle und Biokohlesubstrate – Eigenschaften, Potentiale und Grenzen der Anwendung. In: Terytze, K. & Vogel, I. (Hrsg.): *Biokohle und Biokohlesubstrate zur nachhaltigen und klimafreundlichen Sanierung und Inwertsetzung militärischer Konversionsflächen und ertragsschwacher Standorte*. Shaker Verlag, S. 30 – 59, Aachen.
- Haubold-Rosar, M.; Lukas, S.; Weiß, U.; Rademacher, A. (2016): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „LaTerra“- Regionalprojekt 2: „Anwendung von Terra Preta im Pflanzenbau auf ertragsschwachen Standorten der Lausitz als integraler Bestandteil eines innovativen, nachhaltigen Land- und Stoffstrommanagements.“ TIBKAT:1037072650

- He, X., Chen, L., Han, L., Liu, N., Cui, R., Yin, H. und Huang, G. (2017): Evaluation of biochar powder on oxygen supply efficiency and global warming potential during mainstream large-scale aerobic composting. *Bioresour. Technol.* 245, 309–317.
- Hellebrand, H. J. (1998): Emission of Nitrous Oxide and other Trace Gases during Composting of Grass and Green Waste. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69, S.365-375
- Herwig, N., Wagner, R., Ensslen, N., Felgentreu, D., Schatten, R. und Terytze, K. (2020): Einfluss von Pflanzenkohle auf die Cadmiumverfügbarkeit in Kleingartenböden – Gefäßversuche mit *Lollo rossa* und *Helianthus annuus L.* altlasten spektrum. Erich Schmidt Verlag, S. 184 - 193
- Hua, L., Chen, Y., Wu, W. (2012): Impacts upon soil quality and plant growth of bamboo charcoal addition to composted sludge. *Environmental Technology*, 33, 61-68
- Hua, L., Wu, W., Liu, Y., McBride, M. B., Chen, Y. (2009): Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. *Energy Fuels*, 16 (1), S. 1–9
- Ifeu (Hrsg.) (2008): Basisdaten zu THG-Bilanzen für Biogas-Prozessketten und Erstellung neuer THG-Bilanzen. Institut für Energie- und Umweltforschung, Autoren: Vogt, R., S. 61, Heidelberg.
- ifeu (Hrsg.) (2019): Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz für das Jahr 2018 für das Land Berlin. SKU-Bilanz für die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (SenUVK), Referat Kreislaufwirtschaft, Autoren: Vogt, R. und Ludmann, S., Heidelberg. S. 124.
- IPCC (2007) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report: Climate Change 2007, www.ipcc.ch
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Hrsg.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom
- IPCC (2019): 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, Appendix 4: Method for Estimating the Change in Mineral Soil Organic Carbon Stocks from Biochar Amendments: Basis for Future Methodological Development.
- ISO 10694 (1995): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung.

- ISO 11466 (1995): Bodenbeschaffenheit- Extraktion von in Königswasser löslichen Spurenelementen.
- Jahan, M.S., Inam-ul-Haq, M., Mukhtar, T., Khalid, A. (2017): Biochar effect to enhance nodulation and suppress root pathogenic fungi in chickpea. *Mycopath* 15(2): 71-78
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde M., Bastos, A. C. (2011): A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144: 175–187. doi:10.1016/j.agee.2011.08.015
- Jindo, K., Sanchez-Monedero, M.A, Mastrolonardo, G, Audette, Y., Higashikawa, F. S., Silva, C. A., Akashi, K., Mondini, C. (2020): Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 2: A review of the biochar roles in growing media, composting and as soil amendment. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 7:16. doi.org/10.1186/s40538-020-00179-3
- Jindo, K.; Suto, K.; Matsumoto, K.; Garcia, C.; Sonoki, T.; Sanchez-Monedero, M.A. (2012): Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure. *Bioresource Technology*, 110, 396-404
- Joseph, S., Kammann, C.I., Shepherd, J.G., Conte, P., Schmidt, H.-P., Hagemann, N., Rich, A.M., Marjo, C.E., Allen, J., Munroe, P., Mitchell, D.R.G., Donne, S., Spokas, K., Graber, E.R. (2017): Microstructural and associated chemical changes during the composting of a high temperature biochar: mechanisms for nitrate, phosphate and other nutrient retention and release. *Sci. Total Environ.* 618, 1210–1223. /doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.200
- Kammann, C. (2012): Treibhausgasemissionen und Stickstoffumsetzungsprozesse in Pflanzenkohle-Boden. In: K. Fricke, C. Bergs, C. Kammann, (Hrsg.), Symposium "Biokohle im Blick - Herstellung, Einsatz und Bewertung". Weimar: Orbit e. V., 97-110.
- Kammann, C., Schmidt, H.-P., Messerschmidt, N., Linsel, S., Steffens, D., Müller, C., Koyro, H.-W., Conte, P., Joseph, S. (2015): Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar, in: *Scientific reports* (5), S.11080. doi: 10.1038/srep11080 (2015).
- Kammann, C., Glaser, B., Schmidt, H.P. (2016): Combining biochar and organic amendments, in: Shackley, S., Ruysschaert, G., Zwar, K. and Glaser, B. (ed.): *Biochar in European Soils*, Routledge, London, 2016, S.136-164
- Karer, J., Zehetner, F., Dunst, G., Fessler, J., Wagner, M., Puschenreiter, M., Stapkēviča, M., Friesl-Hanl, W., Soja, G. (2018): Immobilisation of metals in a contaminated soil with biochar-compost mixtures and inorganic additives: 2-year greenhouse and field

- experiments. *Environ Sci Pollut Res* (2018) 25:2506–2516. doi.org/10.1007/s11356-017-0670-2
- Kaudal, B. B., Chen, D., Madhavan, D.B., Downie, A., Weatherley, A. (2016): An examination of physical and chemical properties of urban biochar for use as growing media substrate. *Biomass and Bioenergy* 84: 49-58. DOI.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.012
- Kern, J, Tammeorg, P., Shanskiy, M., Sakrabani, R., Knicker, H., Kammann, C., Tuhkanen, E.-M., Smidt, G., Prasad, M., Tiilikkala, K., Sohi, S., Gascó, G., Steiner, C., Glaser, B. (2017) Synergistic use of peat and charred material in growing media – an option to reduce the pressure on peatlands? *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.* 25(2): 160–174. DOI:10.3846/16486897.2017.1284665
- Kosmos (2006): *Garten! Der grüne Ratgeber*. Franckh-Kosmos Verlag 416 S.
- Krause, M.S.; De Ceuster, T.J.J.; Tiquia, S.M.; Michel, F.C.; Madden, L.V.; Hoitink, H.A.J. (2003): Isolation and characterization of rhizobacteria from composts that suppress the severity of bacterial leaf spot of radish. *J Phytopathol* 93:1292-1300 doi:10.1094/PHYTO.2003.93.10.1292
- Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H., Bogomolova, I., Xu, X. (2009): Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. *Soil Biology & Biochemistry*, 41 (2), 210-219.
- Kuzyakov, Y.; Bogomolova, I.; Glaser, B. (2014): Biochar stability in soil: decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis. *Soil Biology & Biochemistry* 70, 229-236.
- Landesumweltamt Brandenburg (LUA) (2010): *Materialien zur Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg, Band 4.1 Leitfaden Detailuntersuchung für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze*.
- Lehmann, J, Kuzyakov, Y., Pan, G., Ok, Y. S. (2015): Biochars and the plant-soil interface. *Plant Soil* 395:1–5. DOI 10.1007/s11104-015-2658-3
- LFULG (2020): *Umsetzung der Düngeverordnung und Sächsische Düngerechtsverordnung. Datensammlung Düngerecht. Tabellenverzeichnis Stand Juni 2020*.
- Lomax, G., Lenton, T.M., Adeosun, A. und Workman, M. (2015): Investing in negative emissions. *Nature Climate Change* 5, 498-500.
- Ma, J., Wilson, K., Zhao, Q., Yorgey, G., Frear, C., (2013). *Odor in Commercial Scale Compost: Literature Review and Critical Analysis*. Washington State Department of Ecology. S. 74
- Marschner, H. (1986): *Mineral nutrition of higher plant*. Harcourt Brace Jovanovich 674 S.

- Masék, O., Brownsort, P., Cross, A. and Sohi, S. (2013): Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar. *Fuel* 103, S. 151 - 155.
- Matsubara, Y., Hasegawa, N., Fukui, H. (2002): Incidence of Fusarium root rot in asparagus seedlings infected with arbuscular mycorrhizal fungus as affected by several soil amendments. *J. Japan. Soc. Horti. Sci.*71(3): 370-374.
- Munsell (2017): Munsell Soil Color Chart für Bodenfarben. Neue und erweiterte Auflage.
- Nadeem, S. M., Imran, M., Naveed, M., Khan, M. Y., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Crowley, D. E. (2017): Synergistic use of biochar, compost and plant growth-promoting rhizobacteria for enhancing cucumber growth under water deficit conditions. *J Sci Food Agric* 97: 5139–5145. DOI 10.1002/jsfa.8393
- Nelissen, V.; Saha, B.; Ruyschaert, G.; Boeckx, P. (2014): Effect of different biochar and fertilizer types on N₂O and NO emissions; *Soil Biology and Biochemistry*, Band 70, S. 244-255;
- Nguyen Thanh, Phong (2012): Greenhouse Gas Emissions from Composting and Anaerobic Digestion Plants, *Hochschulschrift, Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diss.*, 109 Seiten
- Nieto, A., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., Fernández, J.M., Plaza, C., Méndez, A. (2016): The effect of pruning waste and biochar addition on brown peat based growing media properties. *Scientia Horticulturae* 199: 142–148. doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.012
- Northup, J. (2013): Biochar as a replacement for perlite in greenhouse soilless substrates. *Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University. lib.dr.iastate.edu/etd.13399.*
- Oehmich, J. (1983): Pflanzenproduktion. Band 1. Grundlagen Verlag Paul Parey 531 S.
- Ortas, I. (2016): The Role of Mycorrhizae and Biochar in -Plant Growth and Soil Quality. In: Bruckman, V.J.; Varol, E.A.; Uzun, B. B.; Liu, J.: *Biochar. A Regional Supply Chain Approach in View of Climate Change Mitigation*. S. 336-350. Cambridge Univ. Press.
- Park, J.H., Choppala, G. H., Bolan, N. S., Chung, J.W., Chuasavathi, T. (2011): Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant Soil* 348:439–451. DOI 10.1007/s11104-011-0948-y
- Prendergast-Millera, M. T., Duvalla, M., Sohi, S. P. (2014): Biochar–root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability. *European J. Soil Sci.* 65, 173–185. doi: 10.1111/ejss.12079
- Rademacher, A. (2018): Auswirkungen des Einsatzes von Biokohlesubstraten auf die Bodenfruchtbarkeit ertragsschwacher sandiger Ackerböden am Beispiel der Niederlausitz. *Diss., Freie Universität 2018. doi.org/10.17169/refubium-35*

- Reinhold, J. (2013): Humusversorgung und Stickstoff im Boden. H&K aktuell, 11/13.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, III, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, Snyder, P., K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.. (2009): Planetary boundaries:exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14(2): 32. www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/
- Sánchez, A., Artola, A., Font, X., Gea, T., Barrena, R., Gabriel, D., Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Cayuela, M.L., Mondini, C. (2015): Greenhouse Gas from Organic Waste Composting: Emissions and Measurement, in: Lichtfouse, E., Schwarzbauer, J., Robert, D. (Hrsg.): CO₂ Sequestration, Biofuels and Depollution, Springer Cham, Teil der Buchserie: Environmental Chemistry for a Sustainable World Volume 5, S.33-70
- Sanchez-Monedero, M.A., Cayuela, M.L., Roig, A., Jindo, K., Mondini, C., Bolan, N. (2018): Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresour. Technol.* 247, 1155–1164.
- Sánchez-Monedero, M.A., Cayuela, M.L., Sánchez-García M, Vandecasteele, B., D’Hose, T., López, G., Martínez-Gaitán, C., Kuikman, P.J., Sinicco, T., Mondini, C. (2019): Agronomic evaluation of biochar, compost and biochar-blended compost across different cropping systems: Perspective from the European project FERTIPLUS. *Agronomy* 9:225. doi.org/10.3390/agronomy9050225.
- Schatten, R.; Wagner, R.; Rößler, K.; Suer, U. und Terytze, K. (2015): Verwertung pflanzlicher Reststoffe zu Biokohle und Biokohlesubstraten und deren Einsatz im Zierpflanzenbau – Ergebnisse des TerraBoGa-Projektes im Botanischen Garten Berlin-Dahlem. In: Müll und Abfall, 03.15, S. 137-143.
- Schmidt HP, Kammann C, Gerlach A, Gerlach H (2016): Der Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierfütterung, *Ithaka-Journal* 2016, Arbaz, Switzerland, ISSN 1663-0521, pp. 364-394, www.ithaka-journal.net/95
- Schmidt, H.P. (2012): 55 Uses of Biochar, in: *Ithaka Journal* 1/ 2012, S.286–289
- Schouten, S., van Groenigen, J. W., Oenema, O., Cayuela, M. L. (2012): Bioenergy from cattle manure? Implications of anaerobic digestion and subsequent pyrolysis for carbon and nitrogen dynamics in soil. *GCB Bioenergy*, 4 (6), 751-760.
- Schulz, H., Dunst, G., Glaser, B. (2013): Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. *Agron. Sustain. Dev.* 33:817–827. DOI 10.1007/s13593-013-0150-0
- SenStadtUm (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin) (1992): Blei im Boden/Cadmium im Boden. Umweltatlas. Begleittexte. Zugriff 28.10.2020

https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d1031_04.htm#RTFToC13

- Singh, B. P., Hatton, B. J., Balwant, S., Cowie, A. L., Kathuria, A. (2010): Influence of Biochars on Nitrous Oxide Emission and Nitrogen Leaching from Two Contrasting Soils. *Journal of Environmental Quality*, 39 (4), 1224-1235.
- Smet, E., Van Langenhove, H. and De Bo, I. (1999): The emission of volatile compounds during the aerobic and the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste. *Atmospheric Environment*, 33, S.1295-1303
- Sohi, P.S. (2012): Carbon Storage with Benefits. *Science* 338, 1034; DOI 10.1126/science.1225987
- Sonoki, T., Furukawa, T., Jindo, K., Suto, K., Aoyama, M., Sánchez-Monedero, M.Á. (2013): Influence of biochar addition on methane metabolism during thermophilic phase of composting. *J. Basic Microbiol.* 53, S.617–621
- Spokas, K. A. (2013): Impact of biochar field aging on laboratory greenhouse gas production potentials. *GCB Bioenergy*, 5 (2), 165-176.
- Steiner, C., Melear, N., Harris, K., Das, K.C. (2011). Biochar as bulking agent for poultry litter composting. *Carbon Management*, 2, 227-230
- Strumpf, T., Reichmuth, C. (2009): Risikoabschätzung von Schadelementen (Schwermetallen) im System Boden/Pflanze. *Gesunde Pflanzen* 61 (1), S. 39–50. DOI: 10.1007/s10343-009-0202-1.
- Szanto, G.L., Hamelers, H.V.M., Rulkens, W.H. & Veeken, A.H.M. (2007): NH₃, N₂O and CH₄ emissions during passively aerated composting of strawrich pig manure. *Bioresource Technology*, 98(14), S.2659-2670
- Terytze, K., Wagner, R. (Hrsg.) (2016): Handlungsanleitung - Verwertung von organischen Reststoffen zur Erzeugung fruchtbarer Pflanzenkohlesubstrate und deren Nutzung im Gartenbau, Aachen, 108 Seiten
- Terytze, K., Wagner, R., Schatten, R., Rößler, K. und König, N. (2015): 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). http://edocs.fu-berlin.de/docs/receive/FUDOCs_document_000000024218
- Tian, Y., Sun X., Li, S., Wang, H., Wang, L., Cao, J., Zhang, L. (2012): Biochar made from green waste as peat substitute in growth media for *Calathea rotundifolia* cv. *Fasciata*. *Scientia Horticulturae* 143: 15 - 18. doi.org/10.1016/j.scienta.2012.05.018

- UAL-AG (2016): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Neuauflage 2016, Entwurf Stand 30.Mai 2016
- UBA (Hrsg.) (2016): Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. Texte 04/2016, UBA-FB 002191, S. 254, Dessau-Roßlau.
- Ullum, K. (2017): Untersuchungen zur Wirkung von Biokohlekomposten in Topf- und Feldversuchen mit ausgewählten Pflanzen aus unterschiedlichen Klimazonen. Diss., Freie Universität Berlin 2017. DOI.org/10.17169/refubium-6701
- United Nations (2015): Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1.
- van Zwieten, L., Singh, B., Joseph, S., Kimber, S., Cowie, A., Chan, K.Y. (2009): Biochar and Emissions of Non-CO₂ Greenhouse Gases from Soil, in: Lehmann, J., Joseph, S. (Hrsg.): Biochar for Environmental Management: Science and Technology, New York, S.227-249
- Vaughn, S.V., Kenar, J.A., Thompson A.R., Peterson S. C. (2013): Comparison of biochars derived from wood pellets and pelletized wheat straw as replacements for peat in potting substrates. Industrial Crops and Products 51: 437– 443. doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.010
- VDLUFA (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchung- und Forschungsanstalten) (1991): Methodenbuch. Band I: Die Untersuchung von Böden. 4. Aufl., VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- Verordnung (EG) Nr. 1881 (2006): Kommission vom 19.12.2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln. ABI. L 364 vom 19.12.2006, S. 5
- Vogel, I.; Schatten, R.; Wagner, R. und Terytze, K. (2015): Rechtliche Situation der Anwendung von Biokohle in der Bundesrepublik Deutschland. Müll und Abfall 47, 07 S. 362-367
- Wagner, R., Schatten, R. (2016): Von pflanzlichen Reststoffen zu hochwertigen Pflanzenkohlen/Pflanzenkohlesubstraten, in: Terytze, K., Wagner, R. (Hrsg.): Handlungsanleitung - Verwertung von organischen Reststoffen zur Erzeugung fruchtbarer Pflanzenkohlesubstrate und deren Nutzung im Gartenbau, Aachen, S.37-62
- Wagner, R; Kocikowski, M. und Terytze, K. (2020): Pflanzenkohle zur klimafreundlichen Kompostierung von Festmist und Grünschnitt – Ergebnisse aus dem CarboTIP Projekt. Müll und Abfall, 03/20, S. 138 – 146.

- Wang, C. Lu, H., Dong, D., Deng, H., Strong, P.J., Wang, H., Wu, W. (2013): Insight into the effects of biochar on manure composting: Evidence supporting the relationship between N₂O emissions and denitrifying community. *Environmental Science & Technology*, 47, 7341-7349.
- Wang, Q., Awasthi, M.K., Ren, X., Zhao, J., Li, R., Wang, Z., Wang, M., Chen, H., Zhang, Z. (2018): Combining biochar, zeolite and wood vinegar for composting of pig manure: The effect on greenhouse gas emission and nitrogen conservation. *Waste Manage.* 74, 221–230.
- Weng, Z., Zwieter, L.v., Singh, B.P., Kimber, S., Morris, S, Cowie, A., Macdonald, L.M. (2015): Plant-biochar interactions drive the negative priming of soil organic carbon in an annual ryegrass field system. *Soil Biology and Biochemistry*, Volume 90, Pages 111-121.
- Woolf, D. & Lehmann, J. (2012): modelling the long-term response to positive and negative priming of soil organic carbon by black carbon. *Biogeochemistry* 111, S. 83-95.
- Yoo, G. & Kang, H. (2012): Effects of Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions and Microbial Responses in a Short-Term Laboratory Experiment. *Journal of Environmental Quality*, 41 (4), 1193-1202.
- Younis, U., Malik, S. A., Rizwan, M., Qayyum, M. F., Ok Y. S., Shah, M. H. R. Rehman, R. A. Ahmad, N. (2016): Biochar enhances the cadmium tolerance in spinach (*Spinacia oleracea*) through modification of Cd uptake and physiological and biochemical attributes. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23:21385–21394. DOI 10.1007/s11356-016-7344-3
- Zhang, J., Chen, G., Sun, H., Zhou, S., Zou, G. (2016): Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost. *Bioresour. Technol.* 200, S.876–883
- Zhang, J., Lü, F., Shao, L., He, P. (2014): The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge. *Bioresour. Technol.*, Special Issue on Advance Biological Treatment Technologies for Sustainable Waste Management (ICSWHK2013) 168, S.252–258
- Zhou, H., Meng, H., Zhao, L., Shen, Y., Hou, Y., Cheng, H., Song, L. (2018): Effect of biochar and humic acid on the copper, lead, and cadmium passivation during composting. *Bioresour. Technol.* 258, 279–286.
- Zimmerman, A. R., Gaob, B., Ahn, M. (2011): Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 43 (6), 1169-1179.
- Zimmerman, A. R. (2010): Abiotic and Microbial Oxidation of Laboratory-Produced Black Carbon (Biochar). *Environmental Science & Technology*, 44 (4), 1295-1301.

Anhang

Überblick Karbonisierungsanlagen

Ergebnisse der Marktrecherche zu Herstellern von Karbonisierungsanlagen (Stand 2020)

Hersteller/ Anbieter	Firmensitz	Produkte	Marktsituation	Zertifizierung	Grundfläche	Automatisierung	Inputmaterial	Output	Kosten [EUR]	Spezifikationen	Quellen/Angaben zur Informationsbeschaffung
BIOMACON GmbH	Rehburg/DEU	DECARBO Energy Systems mit versch. Dimensionen (Home/Farm/Industry von 40-400 kW)	Standardproduktion, Inbetriebnahmen in BEL, CH, DEU, FRA, IRL, NOR, SWE, 16 Anlagen europaweit, Referenzanlage Botanischer Garten Berlin	European Biochar Certificate (EBC), CE, TÜV	C100-F: 1,9m x 5,4m 10,3 m ² C160-F: 2,5m x 6,1m 15,3 m ² C400-I: 2,5m x 10,2m 25,5 m ²	Ja Fernkontrolle via Computer oder Smart Phone möglich	Holzhacksel (max. Wassergehalt: 35%; <70 mm, rieselfähig); Inputmenge abhängig von Anlagendimension (32-300 kg/h FS)	Ca. 20% PK; 6 kg/h - 56 kg/h Thermische Leistung: 25 - 400 kW	85.000 bis 390.000	Nennleistung: 40-400 kW _{th} (abhängig von Anlagendimension); kleinere Anlagen können im Seecontainer installiert werden (Container Lösung)	Internet- und Datenblattrecherche Firmenwebsite (https://www.biomaccon.com/), Information via Mail und Telefon für Kosten und Zertifizierung
PYREG GmbH	Dörth/DEU	PYREG*500 Biomasse PYREG* P1.500 Biomasse	Standardproduktion, Inbetriebnahmen in CH, CHN, DEU, AUT, SWE, 25 P.500-Anlagen europaweit	European Biochar Certificate (EBC) & UK Biochar Mandate (BQM)	Pyreg500: Pyregmodul: 9m x 3m x 2,8m Technikmodul: 3m x 3m x 2,8m = 36 m ² Pyreg1.500: Pyregmodul: 13m x 3m x 5,8m Technikmodul: 6m x 3m x 5,8m = 57 m ²	Ja Fernüberwachung möglich	Große Auswahl von Biomassen und Abfällen, (schütt- und rieselfähig, max. Wassergehalt: 35%, max. Größe: 30 mm); 100-284 kg/h Biomasse-Input	25-71 kg/h PK und nahezu 0 Asche Thermische Leistung: 150 - 750 kW	455.000 bis 620.000	Fernüberwachung und Ferndiagnose sowie ein Vor-Ort-Service mit Servicepersonal Erfahrungen im Bereich thermische Behandlung von Klärschlamm mit Phosphor-Recycling	Internet- und Datenblattrecherche Firmenwebsite (https://www.pyreg.de/), Information via Mail und Telefon
Carbon Terra GmbH	Wallerstein/DEU	Schotttdorf-Meiler	global, für größeren Bedarf und internationale Projekte	nach DUVV und GMP+ B3/B2	k. A.	Ja	Input von ca. 3 t Biomasse ergibt 1 t PK, Biomasse mit Feuchtigkeitsgehalt von bis zu 40 % kann Anlage direkt zugeführt werden, höhere Feuchtigkeitsgehalte werden durch Prozesswärme reduziert, Biomasse muss stückig, klumpig sein	etwa 70 % der Gesamtenergie der Input-Masse ist in PK vorhanden, aus 6 t Biomasse pro Tag bis zu 2 t Kohlenstoff, entspricht thermischer Dauerleistung von 700 kW, Gesamtleistung 1 MW, 700 t pro Jahr	k. A.	Verbrennungsluft verfließt in der Glutzone ihren Sauerstoff und erhitzt sich dabei auf ca. 700 °C	Telefonische Anfrage und E-Mail-Anfrage; Internetrecherche Firmenwebsite (https://www.carbon-terra.eu/de)
REW Regenerative Energiewirtschaftssysteme GmbH	Quakenbrück/DEU	Regenis MAX Pyrolysereaktor	diverse Projekte in Niedersachsen	k. A.	k. A.	Ja	Auch für Bioabfälle mit hohem Feuchtgrad. Die darin möglichen enthaltenen Kunststoffe werden vergast/verbrannt. Integrierte Abwärmenutzung, Gas/Stromproduktion möglich bei Bedarf. Ziel: Anlage in regionale Stoffstrom- und Energiekreisläufe einzubetten.	k. A. zur Output-Menge; neben PK auch Öl, Wärme etc. auskoppelbar	k. A. Prospekt zu Regenis MAX Pyrolysereaktor	Hersteller von Karbonisierungsanlagen für verschiedene Anwendungen, auch für kleinere Mengen Produktion von Conti Reaktoren zur Separation, Filtration, Trocknung, Entgasung, Hygienisierung und Pyrolyse	Internetrecherche Firmenwebsite (https://regenis.de/)

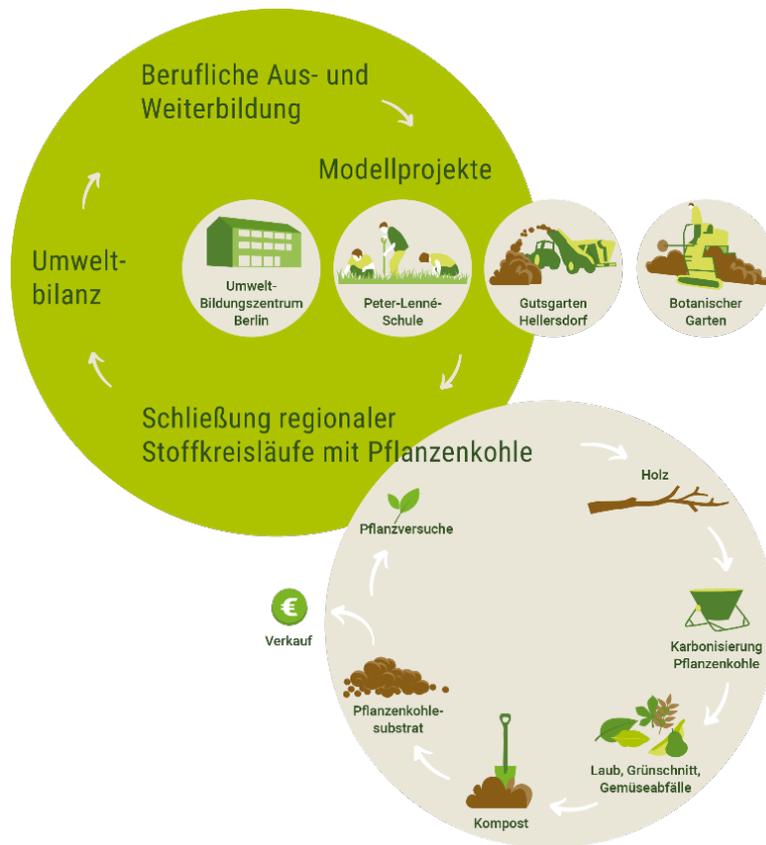
Ergebnisse der Marktrecherche zu Herstellern von Karbonisierungsanlagen (Stand 2020)

Hersteller/ Anbieter	Firmensitz	Produkte	Marktsituation	Zertifizierung	Grundfläche	Automatisierung	Inputmaterial	Output	Kosten [EUR]	Spezifikationen	Quellen/Angaben zur Informationsbeschaffung
gara energy systems GmbH	Ravensburg/DEU	Pyrolyseanlagen im Batch-Verfahren, Offen-Retorten-System mit parallelbetriebenen Retorten	diverse Referenzen Planung und Projektierung von Slow-Pyrolysetechnik im Batchverfahren	Grenzwerte nach EBC Premium je nach Biomasse möglich	Abhängig von Anzahl der Retorten	Ja	Technisch jegliche Art von Biomasse möglich (Wurzelstöcke – Klärschlamm), versch. Biomassen; Hölzer Der kontrollierte Pyrolyseprozess erfolgt im etwa 5 m³ großen Pyrolyseraum. Industrieller Maßstab: ab 28.000t – 110.000t/a Biomasse (keine Hackschnitzel)	PK, Abwärmenutzung, Stromerzeugung, Pyrolyseabgewinnung	k. A.	gara vertreibt auch Pflanzenkohle für Anlagenbetreiber ihrer Anlage	Internetrecherche Firmenwebseite (http://www.gara-energy.de/)
3R-Systems UG + 3R Systems Trading GmbH	Langerhagen/DEU	Biocarbon-Pyrolyseanlagen	Projekte in Schleswig-Holstein und Münsterland; Realisierung bis Ende 2018 für Marktreife der Biocarbon-Pyrolyseanlagen; Kooperation mit Sonnenenergie	nach EBC zertifizierte Pflanzenkohle oder Futterkohle	k. A.	Ja	k. A.	350° bis auf über 600°C erhitzt	Kosten richten sich ganz nach den einzelnen Projekten	Hersteller von dezentralen Thermo-Pyrolyseanlagen (Batch Verfahren) für Gärreste u.a. organische Ausgangsmaterialien (In Planung)	Internetrecherche auf Firmenwebseite (https://www.3r-systems.de/) + http://region-hannover.bund.net/fileadmin/bundgruppen/bcsmshannover/Terra_Preta/2017_Liste_aller_Hersteller_Pflanzkohle_Substrate_und_Anlagen_25-4-2017_1.pdf
Spanner Re² GmbH	Neufahrn/DEU	HKA 10 HKA 35 HKA 45 HKA 49 HKA 70	Standardproduktion; Anlagen in Europa, Nord Amerika, Asien in Landwirtschaft und Gastronomie; Referenzanlage: Biohof Braun, Dürneck	ISO Qualitätsstandards	k. A.	Ja	Naturbelassenes Holz Wassergehalt < 13 % Max. Feinanteil (<4 mm Körnung) 30%	3% PK/ Asche Leistung elektr.: 19-45 KW Leistung therm.: 45-109 KW	100.000	Betriebsstunden: 7000/a Hauptsächlich für Energiegewinnung, PK als Beiprodukt schneller Pyrolyse	Internet- und Datenblattrecherche Firmenwebseite (https://www.holz-kraft.com/de/), Information via Mail und Telefon
syncraft® Engineering GmbH	Schwarz/AUT	Holzkräftwerk CW700-200 CW700-300 CW700-400 CW700-500	Lieferung europaweit	EBC Zertifizierung	k. A.	Ja	Trockenes Holzhackgut mit Feinanteil und Rinde	Pro Anlage ca. 80-450 t/a Holzkohle (1,95 m³/d 2,9 m³/d 3,7 m³/d 4,7 m³/d)	k. A.	C-Gehalte von > 80 % und PAK Werte unter 4 mg/kg	Internetrecherche + Firmenwebseite (https://www.syncraft.at/) + http://region-hannover.bund.net/fileadmin/bundgruppen/bcsmshannover/Terra_Preta/2017_Liste_aller_Hersteller_Pflanzkohle_Substrate_und_Anlagen_25-4-2017_1.pdf
Pro-Natura	Paris/FRA	CarboChar 1 CarboChar 2 CarboChar 3 Pyro 6F	USA, UK, Deutschland, Swasiland, Japan, Australien and Neuseeland	Zertifiziert für die Verwendung im Boden	k. A.	Ja	Biomasse mit einer maximalen Luftfeuchtigkeit von 15 % Korngröße: 2 bis 20 mm Dichte: vorzugsweise bis zu 200 kg/m³	max. 40 kg/h (1) max. 120 kg/h (2) max. 200 kg/h (3) 1-5 Tonnen pro Tag	ab 70.000	Temperatur Betriebsablauf: 400-550° C und 900° C - 1100° C	Internetrecherche + Firmenwebseite (http://www.pronatura.org/en) und Produktdatenblätter (http://www.pronatura.org/wp-content/uploads/2016/03/Description-CarboChar-Fr-1.pdf)

Ergebnisse der Marktrecherche zu Herstellern von Karbonisierungsanlagen (Stand 2020)

Hersteller/ Anbieter	Firmensitz	Produkte	Marktsituation	Zertifizierung	Grundfläche	Automatisierung	Inputmaterial	Output	Kosten [EUR]	Spezifikationen	Quellen/Angaben zur Informationsbeschaffung
Biogreen* (part of ETIA Group)	Complègne/F RA	Verschiedene Anlagen- Dimensionen	Versch. Anlagen in Frankreich; Biogreen bearbeitet viele Thematiken im Bereich Biomasse- und Abfallverarbeitungs- anlagen, nicht nur Pflanzenkohle	k. A.	15m x 5m x 3m	Ja	Umwandlung aller Arten von Schüttgütern (Biomasse, Biofeststoffe, Abfälle) in hochwertige Produkte (Synthesegas, Pflanzenkohle, Brennstoffe und andere); Überbindungen, Feste Brennstoffe und 30 kg/h bis 1500 kg/h	Das Biogreen*- Modul ist für die Verarbeitung von bis zu 2,5 m ³ /h ausgelegt. Die tatsächliche Massenkapazität hängt von der angewandten Behandlungszeit des ("Verweilzeit") des Rohprodukts und seiner scheinbaren Dichte (kg/m ³) ab. Die Verweilzeit des Materials wird in der Biogreen*- Steuertafel eingestellt und über die Schneckenrotation geschwindigkeit regelt. Um höhere Kapazitäten zu erzielen, werden die Biogreen*- Pyrolyseeinheiten parallel geschaltet	k. A.	Herstellung fester Brennstoffe aus Biomasse (Torrefaktionsverfahren); Herstellung von PK (Bodenverbesserer); Kommunal-, Industrieabfälle (RDF / SRF), Umwandlung von Kunststoffen in Elektrizität; Umwandlung von Trockenschlamm in Wärme und Elektrizität Öl aus Biomasse-Extraktion für eine Vielzahl von Anwendungen Niedrigere Prozesstemperaturen (250 - 400°C) begünstigen die höchste Produktion von Feststoffprodukten (60-85%), wodurch der Prozess für die Umwandlung von Biomasse in Holzkohle und PK geeignet ist. Moderate Temperaturen (450 - 600°C) erhöhen die Produktion von Öl (bis zu 40%). Hochtemperaturbehandlungen (650 - 800°C) lenken den Prozess, um maximale Synthesegasmengen (bis zu 95%) für das höchste Potenzial zur Energieverwertung (Wärme- und Stromerzeugung) zu erhalten.	Internetrecherche auf sehr ausführlicher Firmenwebsite (http://www.biogreen- energy.com/)
Baltcarbon	Rīga, LVA	Baltcarbon SIFIC/CISR retorts CISR 2000 retort	I Anlage in Lettland	Die Qualität der Holzkohle entspricht den strengen Normen von DIN+ (Deutschland (, EN 18606 - 2 (Frankreich) und GOST 7657-84 (Russland) Europa CE zertifiziert	k. A.	Ja, kontinuierlich er und vollständig automatisiert er Prozess	Holz: 8.000 - 24.000 t/a (max. Wassergehalt von 25 %, Kantenlänge max. 33 cm nicht, Querschnitt der Holzstücke max. 10 cm)	2.000 bis 6.000 Tonnen Holzkohle pro Jahr 245 kg PK pro Tonne Holz	k. A.	C-Gehalt: 82-90 % Asche: unter 2 % Belgian charcoal production technology – LAMBIOTTE	Internetrecherche auf Firmenwebsite (<a href="http://www.baltcarbon.lv/2m-
ode-about&lang=en">http://www.baltcarbon.lv/2m- ode-about&lang=en)
All Power Labs	Berkeley/USA	Power Cube 20 (PC20) PC20 CHP	Standardproduktion; 2 bis 3 Monate Lieferzeit	zertifiziert	k. A.	Ja; Temperatur/ Druck/ Brennstoff- Kontrolle	Jede Art von Biomasse, Max. Brennstoff Eingang: 22 kg/h; max. Wassergehalt: 30%	Asche und Pflanzenkohle im Gartenbau nutzbar	15.600- 49.995	Primär für Stromerzeugung genutzt (1,15 kg Biomasse = 1 kWh elektrisch) Pyrolysetemperatur: 650°C; schnelle Pyrolyse	Internetrecherche auf Firmenwebsite (http://www.allpowerlabs.com/)

Wagner, R., Weiß, U., Schemel, B., Terytze K. (2021): Verwertung von Gemüse- und Grünschnittabfällen zur Herstellung von Pflanzenkohlesubstraten für ein klimafreundliches Gärtnern. Modellprojekt in der Berufsbildung für nachhaltige Entwicklung. Abschlussbericht zu DBU-Projekt 32783/01.



ISBN 978-3-96110-456-7

Freie Universität Berlin * Universitätsbibliothek *
 Redaktion Dokumentenserver * Garystraße 39 * 14195 Berlin