



DBFZ Report Nr. 13

Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung

Vanessa Zeller, Daniela Thrän, Martin Zeymer, Bernhard Bürzle, Philipp Adler, Jens Ponitka, Jan Postel, Franziska Müller-Langer, Stefan Rönsch, Arne Gröngroft, Claudia Kirsten, Nadja Weller, Marian Schenker, Harald Wedwitschka (DBFZ), Bernhard Wagner, Peter Deumelandt, Frank Reinicke (INL), Armin Vetter, Christian Weiser (TLL), Klaus Henneberg, Kirsten Wiegmann (Öko-Institut)

In Kooperation mit:

Gefördert vom:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit



Anfahrt

... mit dem Zug

Ankunft Leipzig Hauptbahnhof; Straßenbahn Linie 3/3E (Richtung Taucha/Sommerfeld) bis Haltestelle „Bautzner Straße“; Straße überqueren, Parkplatz rechts liegen lassen und geradeaus durch das Eingangstor Nr. 116, nach ca. 100 m links. Der Haupteingang des DBFZ befindet sich nach weiteren 60 m auf der linken Seite.

... mit dem Auto

Über die Autobahn A 14; Abfahrt Leipzig Nord-Ost, Taucha; Richtung Leipzig; Richtung Zentrum, Innenstadt; nach Jet Tankstelle links einfahren (siehe „... mit dem Zug“).

... mit der Straßenbahn

Linie 3/3E Richtung Taucha/Sommerfeld bis zur Haltestelle „Bautzner Straße“ (siehe „... mit dem Zug“).

Autoren des Berichts

DBFZ

Vanessa Zeller, Daniela Thrän, Martin Zeymer, Bernhard Bürzle, Philipp Adler, Jens Ponitka, Jan Postel, Franziska Müller-Langer, Stefan Rönsch, Arne Gröngroft, Claudia Kirsten, Nadja Weller, Marian Schenker, Harald Wedwitschka

TLL

Armin Vetter, Christian Weiser

INL

Bernhard Wagner, Peter Deumelandt, Frank Reinicke

Öko-Institut

Klaus Henneberg, Kirsten Wiegmann

Impressum

Herausgeber

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH, Leipzig, mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Kontakt

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
D-04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434 - 112
Fax: +49 (0)341-2434 - 133
info@dbfz.de
www.dbfz.de

Geschäftsführung

Prof. Dr. mont. Michael Nelles
(wissenschaftlicher Geschäftsführer)
Daniel Mayer
(administrativer Geschäftsführer)

DBFZ Report Nr. 13

ISSN: 2190-7943

Bilder: Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ),
Steffen Hellwig / pixelio.de (Titel links), Annamartha / pixelio.de (Titel rechts)

Druck: Fischer druck&medien

DBFZ, Leipzig 2012

© Copyright: Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Broschüre darf ohne die schriftliche Genehmigung des Herausgebers vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM.

Zuwendungsgeber

**Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)**
Stresemannstraße 128 - 130
10117 Berlin

Projekträger Jülich - Forschungszentrum Jülich GmbH
Zimmerstraße 26-27
10969 Berlin

Ansprechpartner:**DBFZ**

Prof. Dr.-Ing. Daniela Thrän
Tel.: +49 (0)341 2434-435
E-Mail: daniela.thraen@dbfz.de

TLL

Dr. Armin Vetter (TLL)
Tel.: +49-34627-868-122
E-Mail: armin.vetter@tll.thueringen.de

INL

Frank Reinicke
Tel.: +49-0345-2798794
E-Mail: frank.reinicke@repro-agrar.de

Öko-Institut e.V.

Dr. Klaus Hennenberg
Tel.: +49-6151-8191-77
E-Mail: k.hennenberg@oeko.de

Gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund des Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhalt

Inhalt	II
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Zielstellung	2
1.2 Definitionen.....	4
1.2.1 Reststoffe.....	4
1.2.2 Potenzialdefinitionen.....	5
1.3 Aufkommen landwirtschaftlicher Reststoffe.....	7
1.4 Substrateigenschaften	8
1.5 Literaturlauswertung Strohpotenziale.....	9
1.6 Politisch-rechtliche Rahmenbedingungen	11
1.6.1 Agrarpolitische und -rechtliche Rahmenbedingungen	11
1.6.2 Energie- und klimapolitische Rahmenbedingungen.....	13
2 Potenzialanalyse.....	17
2.1 Potenzialanalyse mittels Humusbilanzierung.....	17
2.1.1 Einleitung	17
2.1.2 Methodische Grundlagen	19
2.1.3 Datengrundlagen	23
2.1.4 Bestimmung des Strohpotenzials auf Grundlage der Humusbilanz	25
2.2 Ergebnisse	29
2.2.1 Strohpotenziale in den Landkreisen	29
2.2.2 Szenarienrechnungen.....	40
2.2.3 Variantenrechnungen in ausgewählten Landkreisen	41
2.3 Diskussion	45
2.4 Regionalanalyse.....	49
2.4.1 Einleitung	49
2.4.2 Methodik	50
2.4.3 Ergebnisse	52
2.4.4 Diskussion	55
2.5 Fernerkundung.....	56
2.5.1 Einleitung	56
2.5.2 Methodik und Datenbasis	56
2.5.3 Ergebnisse	60
2.5.4 Diskussion	63
3 Bereitstellungskonzepte	66
3.1 Einleitung	66
3.2 Methodik und Datenbasis	67
3.2.1 Strohbergung	67
3.2.2 Lagerung.....	68
3.2.3 Maschinen für die Vorkonzentration und den Umschlag.....	69
3.2.4 Maschinen für den Transport	70

3.2.5	Berechnung des Stroheinzugsgebietes und der Transportentfernung.....	71
3.2.6	Varianten der Bereitstellungsketten	73
3.3	Ergebnisse	75
3.3.1	Bereitstellungsketten	75
3.3.2	Einzugsgebiet und mittlere Transportentfernung	76
3.4	Diskussion	77
4	Anlagenkonzepte	78
4.1	Einleitung	78
4.2	Methodik und Datenbasis	78
4.2.1	Anlagenkonzepte zur Wärmebereitstellung	78
4.2.2	Anlagenkonzepte zur Strombereitstellung	79
4.2.3	Anlagenkonzepte zur Kraftstoffbereitstellung	79
4.3	Ergebnisse	80
4.3.1	Anlagenkonzepte zur Wärmebereitstellung	80
4.3.2	Anlagenkonzepte zur Strom- bzw. KWK-Bereitstellung	83
4.3.3	Anlagenkonzepte zur Kraftstoffbereitstellung	85
5	Technisch-ökonomische Analyse der Strohbergung	90
5.1	Einleitung	90
5.2	Methodik und Datenbasis	90
5.3	Ergebnisse	93
5.4	Diskussion	95
6	Technisch-ökonomische Analyse der Gesamtkonzepte.....	100
6.1	Einleitung	100
6.2	Methodik und Datenbasis	100
6.2.1	Annuitätenmethode zur Anlagenwirtschaftlichkeitsberechnung.....	100
6.2.2	Treibhausgasvermeidungskosten.....	101
6.2.3	Referenzsysteme.....	102
6.3	Ergebnisse	104
6.3.1	Strohbergungskosten und -bereitstellungskosten	104
6.3.2	Wärmebereitstellung	105
6.3.3	Strombereitstellung in Kraft-Wärme-Kopplung.....	112
6.3.4	Kraftstoffe	119
6.4	Diskussion	127
7	THG-Bilanzierung der Strohbereitstellung	129
7.1	Einleitung	129
7.2	Methodik und Datenbasis	130
7.2.1	Zielsetzung und Fragestellungen.....	130
7.2.2	Der Einfluss der Strohentnahme auf die organische Bodensubstanz	130
7.2.3	Bedeutung des Bodenkohlenstoff auf- und -abbau für die THG-Bilanzierung.....	132
7.2.4	Integration der Humusbilanz in die THG-Bilanz	134
7.2.5	Betrachtete Aufwendungen und Emissionen für den Anbau und die Strohentnahme.....	137
7.2.6	Vergleich der Datenbasis der verwendeten Bilanzierungstools	137
7.3	Ergebnisse	139
7.3.1	Treibhausgasbilanz der Strohbereitstellung – Weizenanbau (Einzelkultur)	139

7.3.2	Mögliche Strohentnahme bei ausgeglichener Humusbilanz	139
7.3.3	THG-Bilanz mit und ohne Integration von Bodenkohlenstoffveränderungen	140
7.3.4	Unterschiede durch die unterschiedlichen Humusbilanzmethoden	143
7.3.5	THG-Bilanz der Strohbereitstellung – Betrachtung der gesamten Fruchtfolge	143
7.3.6	Charakterisierung des Beispielbetriebs und Beschreibung der Optimierungsvarianten.....	144
7.3.7	Strohentnahme bei einer Optimierung der Fruchtfolge des Beispielbetriebs.....	148
7.3.8	Treibhausgasbilanz bei einer Optimierung der Fruchtfolge des Beispielbetriebs.....	149
7.3.9	Einfluss der Stroh-Bergungsvariante auf das Ergebnis	151
7.4	Diskussion	151
8	THG-Bilanzierung der Gesamtkette.....	154
8.1	Methodik und Datenbasis	154
8.1.1	Ziel- und Untersuchungsrahmen	155
8.1.2	Sachbilanz	156
8.1.3	Wirkungsabschätzung	157
8.1.4	Auswertung	157
8.1.5	Allokationsmethodik	158
8.1.6	Referenzsysteme und Treibhausgasminderungspotenzial	159
8.2	Ergebnisse	160
8.2.1	Wärmebereitstellung	162
8.2.2	Strom/KWK-Bereitstellung.....	164
8.2.3	Kraftstoffe	166
8.2.4	Vergleich der Ergebnisse mit fossilen Referenzen.....	169
8.3	Diskussion	172
9	Fazit	174
9.1	Empfehlungen zur Verwertung von Stroh aus acker- und pflanzenbaulichen Gesichtspunkten.....	176
9.1.1	Handlungsbedarf für Wissenschaft und Forschung.....	176
9.1.2	Handlungsempfehlungen für die Politik.....	177
9.2	Empfehlungen zur Verwertung von Stroh aus ökonomischer Perspektive und Sicht der THG-Bilanzierung	178
9.2.1	Handlungsbedarf für Wissenschaft und Forschung.....	178
9.2.2	Handlungsempfehlungen für die Politik.....	179
	Abbildungsverzeichnis	180
	Tabellenverzeichnis	184
	Literaturverzeichnis.....	186
A.1	Steckbriefe landwirtschaftliche Reststoffe	194
A.2	Experteninterview Fernerkundung	198
A.3	Bereitstellungsketten	202
A.4	Anhang THG.....	208

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
a	annum (Jahr)
AF	Ackerfläche
Äq.	Äquivalente
BF	Bilanzfläche
BHKW	Blockheizkraftwerk
BtL	Biomass to liquid
CC	Cross Compliance
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
dt	Dezitonne
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EJ	Exajoule
el	elektrisch
FM	Frischmasse
FT	Fischer Tropsch
FWL	Feuerungswärmeleistung
ggf.	gegebenenfalls
GIS	Geographisches Informationssystem
GJ	Gigajoule
GuD	Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk
GVE	Großvieheinheiten
h	hour (Stunde)
ha	Hektar
Häq.	Humusäquivalent
HE	Humuseinheit
HKW	Heizkraftwerk
i.d.R.	in der Regel
Kap.	Kapitel
KVA	Konversionsanlage
kW	Kilowatt

KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LAI	leaf area index (Blattflächenindex)
LK	Landkreis
IN	Normliter
Mio.	Millionen
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
N	Stickstoff
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index; (mittlerer, jährlich genormter Vegetationsindex)
NPP	Nettoprimärproduktion
OBS	Organische Bodensubstanz
oTS	Organische Trockensubstanz
PJ	Petajoule
RED	Renewable Energy Directive (Erneuerbare-Energien-Richtlinie)
RL	Richtlinie
SNG	Synthetic Natural Gas
t	Tonnen
th	thermisch
THG	Treibhausgas
TM	Trockenmasse
u.v.a	und viele(s) andere
usw.	und so weiter
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
vgl.	vergleiche
WTO	World Trade Organisation (Welthandelsorganisation)
z. T.	zum Teil

1 Kurzzusammenfassung

Zielstellung des Projektes Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung war die Analyse der Verfügbarkeit von Getreidestroh für die energetische Nutzung in Deutschland. Zur Ermittlung dieses Potenzials auf Landkreisebene wurden sowohl verschiedene Ansätze zur Berücksichtigung der, zum Ausgleich der Humusbilanz erforderlichen Strohmenge, als auch bereits vorhandene stoffliche Nutzungskonzepte berücksichtigt. Im Anschluss wurden mögliche Konversionstechnologien zur Nutzung des identifizierten Strohpotenzials für die Bioenergieproduktion hinsichtlich ihrer Kosten und Treibhausgasbilanz bewertet.

Das **nachhaltige Strohpotenzial** Deutschlands beträgt in Abhängigkeit von der verwendeten Methode zur Humusbilanzierung zwischen 8 bis 13 Mio. t_{FM}/a . Diese Zahlen entsprechen zwischen 27 bis 43 % der aufgewachsenen Getreidestrohmenge oder des so genannten theoretischen Strohpotenzials. In dieser Studie konnten sowohl Regionen mit hohen Strohüberschüssen als auch Landkreise, in denen sich aufgrund der Fruchtfolge die energetische Strohnutzung nicht eignet, eindeutig identifiziert werden. Für einige Regionen liefern die Bilanzierungen stabile und für andere Regionen variierende Ergebnisse. Alle Methoden zeigen, dass die größten Strohpotenziale bei allen drei verwendeten Methoden im Osten Schleswig-Holsteins und im Nordwesten Mecklenburg-Vorpommerns vorzufinden sind. Ebenfalls hohe Strohpotenziale sind im nördlichen Teil Nordrhein-Westfalens bis hinein ins angrenzende Niedersachsen vorhanden. Drastische Unterschiede zwischen den Methoden zeigen sich für weite Gebiete Sachsens und Sachsen-Anhalts. Nach beiden VDLUFA-Methoden werden dort hohe bis sehr hohe Potenziale ausgewiesen, wohingegen nach der dynamischen HE-Methode kaum bzw. kein Strohpotenzial vorhanden ist, da dieses zur Humusreproduktion notwendig ist.

Aus **technisch-ökonomischer Perspektive** ist die Strohnutzung nur punktuell erprobt. Die ökonomische Analyse hat gezeigt, dass alle untersuchten Konzepte höhere Gestehungskosten als die konventionelle Bioenergiebereitstellung und die fossile Energiebereitstellung aufweisen. Unter anderem tragen die ermittelten Rohstoffbereitstellungskosten frei Anlage, die zwischen 63 und 92,5 €/t FM Stroh liegen, dazu bei, dass die Gesamtkosten höher ausfallen. Weiterhin spielen die Investitionskosten eine sehr große Rolle bei allen Konzepten. Die Gestehungskosten liegen zwischen ca. 9 und 15 ct/kWh für die betrachteten Wärmekonzepte, um 25 ct/kWh für die Strom/KWK-Konzepte und zwischen ca. 15 und 27 ct/kWh für die Kraftstoffe.

Aus Sicht der **Treibhausgasbilanzierung** ergaben alle untersuchten Anwendungen vergleichsweise niedrige THG-Emissionen, die in einer Bandbreite zwischen ca. 8 und 40 $gCO_2\text{-Äq.}/MJ$ liegen. Im Vergleich zu durchschnittlichen fossilen Referenzen können THG-Einsparungen in einem Bereich zwischen 52 und 126 $gCO_2\text{-Äq.}/MJ$ erreicht werden, wobei die KWK-Konzepte das größte Potenzial zur Treibhausgaseinsparung aufweisen. Durch die Nutzung des nachhaltigen Strohpotenzials könnte in Deutschland eine jährliche Einsparung von bis zu 13,5 Mio. Tonnen CO_2 erreicht werden.

2 Einleitung

2.1 Hintergrund und Zielstellung

Die Nutzung von Reststoffen und Abfällen zur Bioenergiebereitstellung wird in Wissenschaft und Politik häufig als prioritäre Option vor der Nutzung von Anbaubiomasse angesehen, denn sie gilt als die umweltverträglichste Variante [1]. Bei der Nutzung von Reststoffen treten keine negativen Umweltwirkungen durch Landnutzungsänderungen auf, da keine zusätzliche Flächennutzung für ihre Produktion notwendig ist. Auch bezüglich der Düngemittel-, Pestizid- und Dieselgaben fällt die Bilanz für Rest- und Abfallstoffe häufig positiv aus, da diese Aufwendungen der Produktion des Hauptproduktes zugewiesen und nicht auf die Bilanz des Nebenproduktes angerechnet werden. Ein weiterer Vorteil der Nutzung von Reststoffen ist der Vermeidung von Konkurrenzsituationen zwischen Nahrungs-, Futtermitteln und Energiepflanzen. Diese Vorteile haben dazu geführt, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Nutzung von Stroh, Gülle oder Bioabfällen kontinuierlich verbessert worden sind z. B. durch den Mechanismus der Doppelgewichtung von reststoffbasierten Kraftstoffen in der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie oder durch die höher vergütete Einsatzstoffklasse II im EEG 2012 [2,3].

In Deutschland ist das Aufkommen von landwirtschaftlichen Reststoffen durch die Rolle Deutschlands als zweitgrößter Agrarproduzent in der Europäischen Union sehr hoch. Ca. 215 Mio. Tonnen (Frischmasse) landwirtschaftliche Reststoffe fallen jährlich in Deutschland an (Mittelwert 1999-2007). Davon sind durchschnittlich 30 Millionen Tonnen Getreidestroh. Einige landwirtschaftliche Reststoffe werden bereits für die Bioenergiebereitstellung eingesetzt. Vor allem tierische Exkrememente werden in erheblichem Umfang für die Biogasproduktion genutzt. Im Vergleich dazu ist die Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen als Festbrennstoff gegenwärtig marginal: Aktuell werden schätzungsweise 25 bis 50 (Klein-)Feuerungsanlagen in Deutschland auf der Basis von Stroh betrieben. Doch die Nutzung von Stroh, vor allem von Getreidestroh als Substrat für die Bioethanol- aber auch Biogasproduktion wird stark diskutiert und bereits erprobt. Darüber hinaus befindet sich das erste Strohheizkraftwerk Deutschlands gegenwärtig in der Bauphase.

Trotz dieser Entwicklungen ist die Frage bis zu welchem Umfang landwirtschaftliche Reststoffe in Deutschland genutzt werden sollten, eine bisher ungeklärte. Studien zum Reststoffpotenzial weisen für das Nebenernteprodukt Stroh eine erhebliche Bandbreite aus. In den Potenzialanalysen und der weiterführenden Literatur wird bezüglich einer Nutzung von Ernterückständen darauf hingewiesen, dass ihre Mobilisierung mit ökologischen Risiken verbunden sein kann. Die Entnahme von landwirtschaftlichen Reststoffen kann negative Auswirkungen auf Bodenfunktionen hervorrufen, z. B. eine Minderung der Boden-Kohlenstoff-Sequestrierung und eine reduzierte Humusbildung bewirken [4–6]. Diese Limitierung des Potenzials aufgrund von Bodenkohlenstoffeffekten ist in den bisherigen Studien im überregionalen Maßstab noch nicht eingehend untersucht worden.

Um diese Forschungslücken zu schließen, wurde das Verbundvorhaben zum Thema energetische Strohnutzung initiiert. Neben der Analyse von nachhaltig verfügbaren Potenzialen war das Ziel, durch die Berechnung von Gestehungskosten und die Bilanzierung von Treibhausgasen für verschiedene Konversionsformen eine umfassende Bewertung über eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung zu ermöglichen.

Die einzelnen Ziele des Verbundvorhabens sind:

- Die Bestimmung des nachhaltigen und regional aufgelösten Strohpotenzials in Deutschland zur energetischen Nutzung und dessen Entwicklung in verschiedenen Szenarien der landwirtschaftlichen Entwicklung bis 2020 sowie die Bestimmung verschiedener Varianten der Bioenergienutzung,
- Die Identifizierung ökologisch und ökonomisch vorteilhafter Konzepte der Reststoffnutzung, unter Berücksichtigung verschiedener Wärme-, Kraft-Wärme-Kopplungs- und Kraftstoffpfade mittels Treibhausgasbilanzierung und Berechnung von Gestehungskosten,
- Die Formulierung von Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Erschließung landwirtschaftlicher Reststoffe.

Die Struktur des Projektes sowie die wesentlichen Bestandteile für die Potenzialermittlung sowie die ökonomische und ökologische Analyse sind in der folgenden Abbildung zusammengefasst.

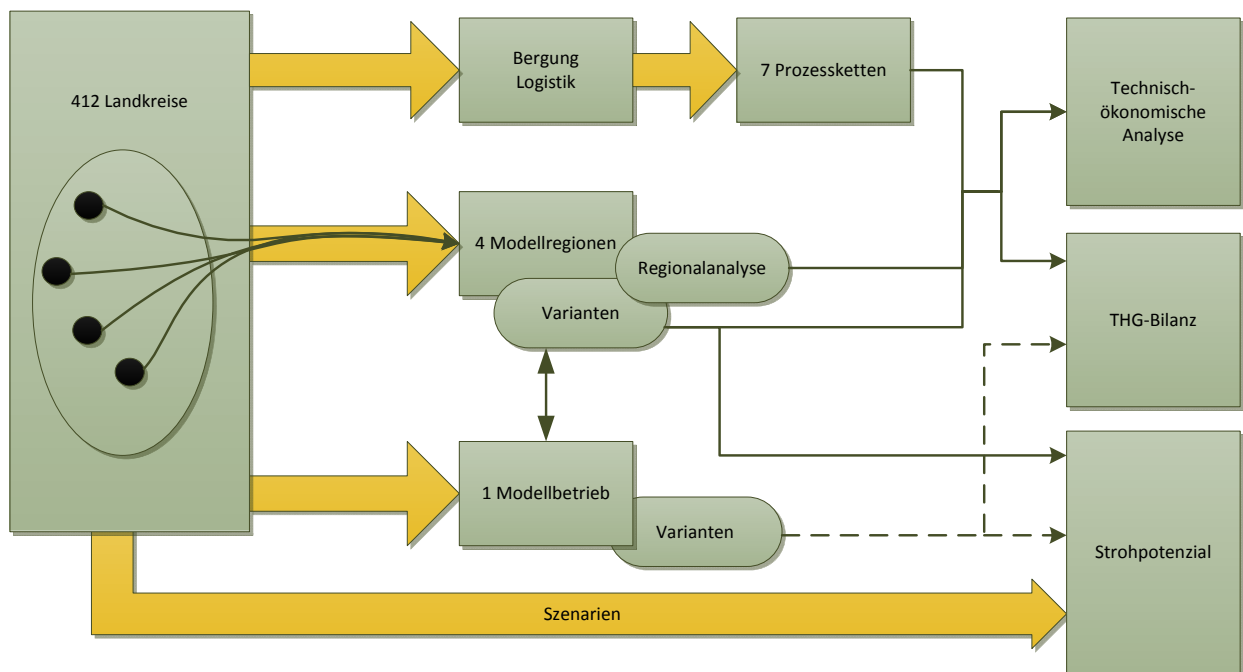


Abbildung 1: Struktur des Projektes

2.2 Definitionen

2.2.1 Reststoffe

Für den Begriff Reststoff existieren verschiedene Definitionen und Kategorisierungen, die sich auf rechtliche sowie technisch-wissenschaftliche Grundlagen beziehen. Häufig wird der Begriff als Sammelbegriff verstanden, unter dem sich verschiedene Rückstände, Zwischen-, Folge- oder Nebenprodukte subsumieren.

In der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG und COM (2007) 59 wird ein Reststoff als ein Stoff aufgefasst, der nicht absichtlich hergestellt wurde und sowohl Abfall als auch ein Nebenprodukt darstellen kann [7][8]. In der Richtlinie (RL) 2009/28/EG (Renewable Energy Directive, RED) [2] sind Reststoffe eine eigenständige Kategorie, die sich zusammen mit der Kategorie Abfall von den Nebenprodukten abgrenzen. Reststoffe und Abfälle haben in der RL einen anderen rechtlichen Status als Nebenprodukte (Doppelgewichtung, Methodik zur Bilanzierung von Treibhausgas-Emissionen vgl. Kap. 2.6). Einige Reststoffe wie Stroh, Bagasse, Hülsen, Maiskolben, Nussschalen u.a. werden zwar explizit genannt, eine systematische Abgrenzung zwischen Reststoffen und Nebenprodukten fehlt allerdings.

Der Begriff „**landwirtschaftlicher Reststoff** bzw. Rückstand“ ist aus technisch-wissenschaftlicher Sicht in der Norm über feste Biobrennstoffe (EN 14588) definiert worden [9]. Unter landwirtschaftlichen Reststoffen werden Stoffe verstanden, die aus der Produktion, Ernte oder Verarbeitung in landwirtschaftlichen Bereichen stammen („Agricultural residues are biomass residues originating from production, harvesting, and processing in farm areas.“). Sie grenzen sich von den Reststoffen aus der Nahrungsmittelindustrie („food processing industry residues“) ab, zu denen beispielsweise Presskuchen aus der Saftproduktion gezählt wird. Separat aufgeführt werden Reststoffe bzw. Rückstände aus der Tierhaltung („animal husbandry residues“). Erfolgt eine Weiterverarbeitung von Rohstoffen in der Nahrungsmittelindustrie werden die Reststoffe üblicherweise als industrielle Reststoffe bezeichnet [10]. Die Übergänge zwischen landwirtschaftlicher und industrieller Verarbeitung können jedoch fließend sein.

Eine weitere Klassifikation ist die Einteilung von Reststoffen nach dem Anfall in einem Produktionsablauf. Nach diesem Ansatz kann zwischen primären, sekundären und tertiären Reststoffen differenziert werden (vgl. Abbildung 2). Danach stammen primäre Reststoffe aus dem ersten Schritt einer Prozesskette, der Ernte der Rohstoffe. Als sekundäre Reststoffe werden die in weiteren Verarbeitungsschritten anfallenden Reststoffe bezeichnet. Tertiäre Reststoffe sind die nach einem (teilweisen) Endkonsum anfallenden Reststoffe (z. B. Nahrungsmittelreste) [11].

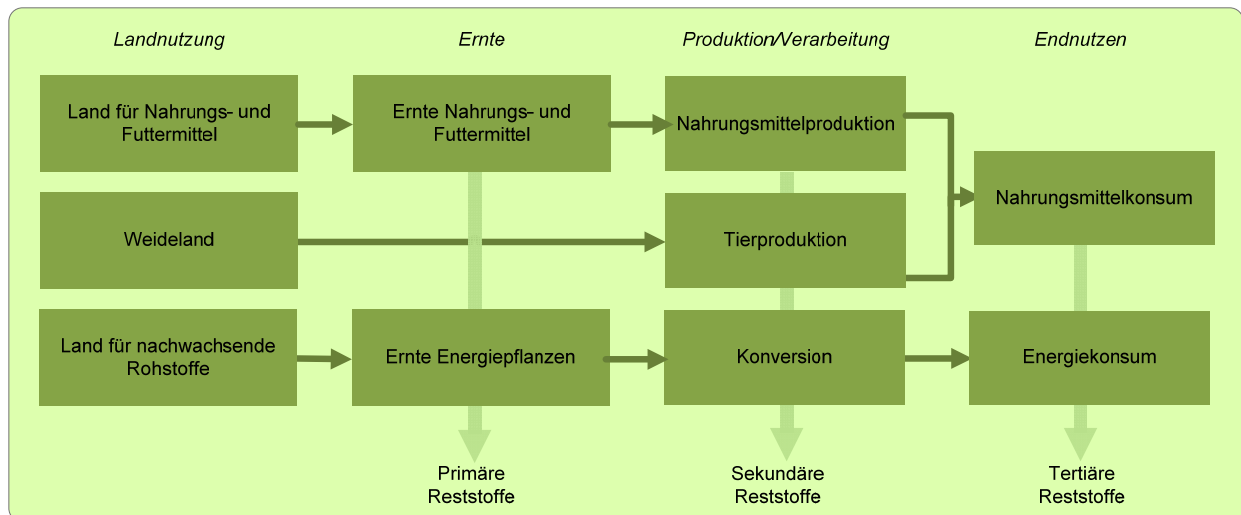


Abbildung 2: Anfall von primären und sekundären landwirtschaftlichen Reststoffen in Anlehnung an [11]

In dieser Studie werden unter dem Begriff „**landwirtschaftliche Reststoffe**“ Nebenernteprodukte wie Stroh oder Rübenblätter, Reststoffe aus der Tierhaltung (Gülle, Festmist u. a.) sowie Reststoffe aus der landwirtschaftlichen Verarbeitung verstanden. Der landwirtschaftliche Betrieb bildet dabei die Systemgrenze. Daher werden Reststoffe, die in Nahrungsmittelindustrie anfallen, in dieser Studie nicht betrachtet.

Stroh wird im landwirtschaftlichen Kontext als Nebenernteprodukt bezeichnet und ist definiert als trockener Halm, Stängel und Blatt der ausgedroschenen Getreidearten, Hülsenfrüchte, Öl- und Faserpflanzen [12]. **Gülle oder Flüssigmist** ist ein Gemisch aus Kot und Harn von Rindern, Schweinen oder anderen landwirtschaftlichen Nutztieren, das außerdem Wasser (Reinigungswasser, Niederschlagswasser), Futterreste und Einstreu enthalten kann. **Festmist** ist ein stapelbares Gemisch aus Kot, Harn und Einstreu. Ein Teil des Harnes wird durch Einstreu gebunden. Als Festmist gilt auch Geflügelmist mit hohem Einstreuanfall [12].

2.2.2 Potenzialdefinitionen

Die im Folgenden verwendeten Potenzialbegriffe basieren auf den Definitionen von [13] und [13]. Diese werden um reststoffspezifische Aspekte ergänzt.

Das **theoretische Potenzial** ist das in einer gegebenen Region innerhalb eines bestimmten Zeitraumes theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot (z. B. die in der gesamten Pflanzenmasse gespeicherte Energie). Es ist allein durch die gegebenen physikalischen Nutzungsgrenzen bestimmt und markiert damit die Obergrenze des theoretisch realisierbaren Beitrags zur Energiebereitstellung. Da das theoretische Potenzial aufgrund bestimmter Restriktionen meist nur in sehr geringen Teilen erschlossen werden kann, kommt ihm zur Beurteilung der tatsächlichen Nutzbarkeit der Biomasse keine praktische Relevanz zu. Das theoretische Potenzial von Abfällen und Reststoffen beschreibt das gesamte Aufkommen dieser Stoffe, also die gesamte Menge, die innerhalb eines bestimmten Zeitraumes produziert wird.

Das **technische Potenzial** beschreibt den Teil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung der gegebenen primär technischen Restriktionen (z. B. Bergungsrate, Konversionsverluste) nutzbar ist. Zusätzlich dazu werden die gegebenen strukturellen und gesetzlich verankerten ökologischen oder

andere Begrenzungen berücksichtigt, da sie letztlich auch – ähnlich den technisch bedingten Einschränkungen – „unüberwindbar“ sind (z. B.: gesetzlich verankerte (Natur-)Schutzgebiete, rechtlich/administrativ: Cross-Compliance-Regelungen, gesellschaftlich: Berücksichtigung der Nahrungsmittelproduktion und der stofflichen Nutzung). Es beschreibt folglich den zeit- und ortsabhängigen, primär aus technischer Sicht möglichen Beitrag der Biomasse zur Deckung der Energienachfrage. Da das technische Potenzial wesentlich durch die technischen Randbedingungen bestimmt wird, ist es im Unterschied beispielsweise zum wirtschaftlichen Potenzial deutlich geringeren zeitlichen Schwankungen unterworfen.

Das **wirtschaftliche Potenzial** beschreibt den zeit- und ortsabhängigen Anteil des technischen Potenzials, der unter den jeweils betrachteten ökonomischen Rahmenbedingungen wirtschaftlich erschlossen werden kann (dazu zählen auch Subventionen oder das Umlagesysteme wie das Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG). Da sich die wirtschaftlichen Randbedingungen kurzfristig verändern können (z. B. Ölpreisänderung, Veränderung der steuerlichen Abschreibungsmöglichkeiten, Energie-, Öko-, oder CO₂-Steuer) ist das wirtschaftliche Potenzial starken zeitlichen Schwankungen unterworfen.

Bei einer stärkeren Berücksichtigung von in der Regel ökologischen Faktoren wird von einem (ökologisch) **nachhaltigen Biomassepotenzial** gesprochen. Das nachhaltige Potenzial berücksichtigt zusätzlich naturschutzfachliche, landschaftsästhetische oder ressourcenschutz-spezifische Aspekte. In dieser Studie wird als nachhaltiges Strohpotenzial der Anteil des Strohs verstanden, der unter Berücksichtigung von Humusbilanzen genutzt werden kann.

Das **erschließbare Potenzial** beschreibt den tatsächlichen Beitrag zur Energieversorgung. Dieses Potenzial hängt von einer Vielzahl weiterer gesellschaftspolitischer und praktischer Randbedingungen ab. Ein wirtschaftliches Potenzial wird erst dann erschließbar, wenn sich Akteure zusammenfinden und alle Betroffenen dem Projekt zugestimmt haben. Dieses Potenzial muss nicht zwangsläufig dem wirtschaftlichen Potenzial entsprechen.

Vom theoretischen über das technische bis zum erschließbaren Potenzial kommen immer stärkere Restriktionen zum Tragen, so dass das nachhaltige Potenzial nur noch ein Teil des theoretischen Potenzials ausmacht. In dieser Studie werden die theoretischen Potenziale von landwirtschaftlichen Reststoffen, sowie das technische und nachhaltige Potenzial von Stroh ermittelt. Welche Restriktion bei der Bestimmung der Potenziale berücksichtigt worden sind und welche Methodik zur Berücksichtigung von ökologischen Nachhaltigkeitskriterien angewendet worden ist, ist in Unterkapitelkapitel 2.1.2 beschrieben.

2.3 Aufkommen landwirtschaftlicher Reststoffe

In Tabelle 1 sind gemäß der oben beschriebenen Definitionen die möglichen landwirtschaftlichen Reststoffarten aus Ernte, Tierproduktion und Verarbeitung aufgeführt und die durchschnittlich anfallenden Mengen zwischen 1999 und 2007 dargestellt. Das theoretische Potenzial dieser landwirtschaftlichen Reststoffe summiert sich auf etwa 215 Millionen Tonnen Frischmasse pro Jahr (Mio. t_{FM}/a). Bezogen auf die Frischmasse machen die tierischen Exkrememente mit über 70 Prozent den größten Anteil am Aufkommen aus. Mit durchschnittlich 30 Mio. t_{FM}/a hat das Getreidestroh den größten Anteil an den Nebenernteprodukten. Ein signifikanter Anteil entfällt mit 19 Mio. t_{FM}/a auf die Ernterückstände von Hackfrüchten. Einige landwirtschaftliche Nebenprodukte werden bereits in erheblichem Umfang für die stoffliche oder energetische Nutzung verwendet. Zum Beispiel werden etwa fünf Millionen Tonnen Stroh als Einstreumaterial in Stallungen eingesetzt (vgl. 3.1.2). Raps- und Körnermaistroh sowie Rübenblatt und Kartoffelkraut verbleiben in der Regel zur Humusreproduktion auf dem Feld. Die energetische Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen findet gegenwärtig vor allem durch die Biogasgewinnung auf der Basis von tierischen Exkrementen statt. Circa zwölf Prozent der anfallenden Gülle und drei Prozent des Festmists werden als Biogassubstrat verwendet. Im Vergleich dazu ist die Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen als Festbrennstoff gegenwärtig marginal: Aktuell werden schätzungsweise 25 bis 50 (Klein) Feuerungsanlagen in Deutschland auf der Basis von Stroh betrieben und weniger als 10.000 Tonnen für diese Anwendung genutzt. Auch andere (stoffliche) Nutzungen können als Nischenanwendungen charakterisiert werden, bzw. sie sind nur regional von Bedeutung (Dämmstoffproduktion, Champignon- oder Erdbeerzucht; vgl. 3.4).

Tabelle 1: Aufkommen und Nutzung verschiedener landwirtschaftlicher Reststoffarten, Mittelwert 1999-2007 (eigene Berechnung)

Reststoff	Menge (Mio. t_{FM}/a)	Wasser- gehalt (%)	Bisherige Nutzung
Getreidestroh (Winter-, Sommerweizen, Roggen, Winter-, Sommergerste, Triticale und Hafer)	30	14	16,6 % Einstreu für die Viehhaltung, sehr geringer Anteil für die energetische Nutzung
Rapsstroh	7,5	14	100 % Humusreproduktion
Körnermaistroh	4	14	100 % Humusreproduktion
Ernterückstände Hackfrüchte (Kartoffel und Zuckerrübe)	19	82-85	100 % Humusreproduktion
Rapspresskuchen	3	10	vorwiegend als Futtermittel
Rinder- und Schweinegülle	122	90 (88-97)	vorwiegend als organischer Dünger und 11,6 % als Biogassubstrat
Festmist (Rinder-, Schweine-, Pferde-, Schafs- und Geflügelmist inkl. Hühner trockenkot)	30	75 (40-75)	vorwiegend als organischer Dünger und ca. 2,6 % als Biogassubstrat
Summe	215		

In Abbildung 3 ist die Verteilung der Reststoffmengen in Bezug auf die Trockenmasse (TM) zu sehen. Getreidestroh hat mit 42 Prozent den größten Anteil am Gesamtaufkommen. Insgesamt weisen die Ernterückstände mit einem Anteil von 63 Prozent am gesamten Aufkommen ein sehr hohes theoretisches Potenzial auf. Etwa 61 Mio. t_{TM} landwirtschaftliche Reststoffe werden pro Jahr produziert.

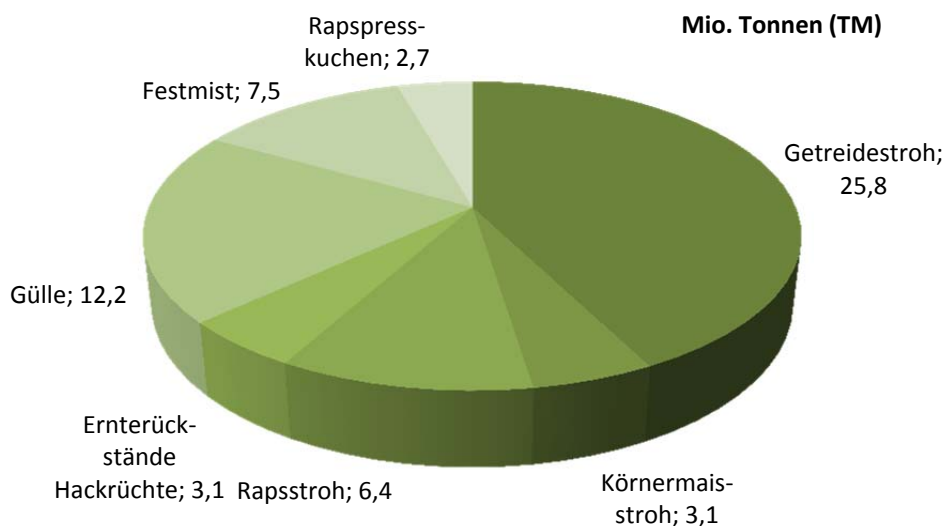


Abbildung 3: Aufkommen landwirtschaftlicher Reststoffe (Mittelwert 1999-2007, eigene Berechnung)

2.4 Substrateigenschaften

Neben der mengenmäßigen Relevanz bestimmen die Substrateigenschaften über die Nutzungsmöglichkeiten von Reststoffen für Anwendungen außerhalb des landwirtschaftlichen Betriebes. Zum einen wirken sich diese Eigenschaften auf die Bereitstellungslogistik aus, da sie die Transportwürdigkeit, Lagerfähigkeit und den Aufbereitungsaufwand maßgeblich beeinflussen. Zum anderen bestimmen sie, welche Art der energetischen Nutzung generell in Frage kommt. Organische Reststoffe können je nach den Eigenschaften der entsprechenden Fraktion für thermo-chemische oder biochemische Verfahren eingesetzt werden. Für heterogen zusammengesetzte, Lignin-arme und feuchte Stofffraktionen kommen dabei vor allem biochemische Verfahren (anaerober Biomasseabbau) in Frage. Biogene Festbrennstoffe eignen sich prinzipiell eher für die thermo-chemischen Verfahren [13].

Gemäß der Bandbreite der oben beschriebenen Reststoffarten, variieren auch die Substrateigenschaften von landwirtschaftlichen Reststoffarten in Bezug auf ihre Energiedichte, den Wassergehalt und die chemische Zusammensetzung sehr stark. Aus der typischen Dichte (Schütt- oder Stapeldichte) der Biomassen kann unter Berücksichtigung des Heizwertes die Energiedichte abgeleitet werden. Eine Eigenschaft von Reststoffen ist, dass sie im Vergleich zu anderen Biomassen (z. B. Anbaubiomasse) tendenziell eine geringere Energiedichte aufweisen. Die Energiedichte ist dabei allerdings von der gewählten Aufbereitung (Trocknung, Zerkleinerung, Verdichtung) abhängig, so dass aufbereitete Reststoffbiomassen auch hohe Energiedichten aufweisen können. Die Energiedichte ausgewählter Festbrennstoffe liegt zwischen 1,5 GJ/m³ für Strohballen bis zu 9,5 GJ/m³ für Pellets.

Bezüglich des Wassergehaltes weisen landwirtschaftliche Reststoffe ebenfalls eine sehr große Spanne auf. Dabei reicht der Wassergehalt von ca. 14 % im Fall von Getreidestroh bis zu 82 % bei

Rübenblättern. Der Wassergehalt beeinflusst maßgeblich die Lagerfähigkeit, den Heizwert und die Transportwürdigkeit. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die chemische Zusammensetzung, die wiederum Auswirkungen auf die Brennstoffausnutzung, Emissionen, Abbaubarkeit u.v.a. haben. Im Anhang A1 (Tabelle A 2-Tabelle A 4) werden die Substrateigenschaften der oben beschriebenen Reststoffarten anhand von Steckbriefen vorgestellt.

Anhand der Kriterien mengenmäßiges Aufkommen, Substrateigenschaften und der bisherigen Nutzung der Reststoffe wurde im Projekt eine Vorauswahl getroffen, welche landwirtschaftlichen Reststoffe das aussichtsreichste Potenzial im Hinblick auf eine deutschlandweite energetische Nutzung haben. Getreidestroh bietet gemessen am jährlichen Aufkommen in Trockenmasse auch abzüglich der bisher genutzten Mengen in der Tierhaltung die größten Potenziale. Ölsaatenstroh ist ebenfalls in relativ großen Mengen vorhanden, allerdings sind die Substrateigenschaften insgesamt ungünstiger und die Strohhergung wird gegenwärtig kaum praktiziert. Gülle und Festmist sind ebenfalls Substrate, welche sehr hohe Aufkommensmengen haben. Gülle wird gegenwärtig in einem Umfang von ca. 20 bis 23 Mio. Tonnen Frischmasse als Gärsubstrat eingesetzt. Der hohe Wassergehalt macht Gülle und auch andere vergärbare Reststoffbiomassen wie Rübenblätter unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen allerdings zu kaum transportwürdigen Rohstoffen. Kartoffelkraut ist mit gegenwärtigen technischen Mitteln nicht erntbar. Rapspresskuchen wird als Viehfutter verwendet, so dass die energetische Nutzung unter den derzeitigen Bedingungen kaum relevant ist.

Insgesamt stellt sich Getreidestroh als das aussichtsreichste Substrat dar, auf das im Folgenden näher eingegangen werden soll. Die Einsatzmöglichkeiten von Getreidestroh als Bioenergieträger sind in Vergleich zu den anderen landwirtschaftlichen Reststoffen vielfältiger: Neben der Nutzung von Stroh als Festbrennstoff zur Wärmebereitstellung sind verschiedene Konversionspfade zur Strombereitstellung und Kraftstoffproduktion möglich.

2.5 Literaturlauswertung Strohpotenziale

Wissenschaftliche Publikationen, die sich mit der Biomassepotenzialanalyse auseinandersetzen, verweisen zunehmend auf die Möglichkeiten der Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen. Globale Potenzialstudien bilanzieren substantielle Potenziale von Reststoffen (vgl. [11][14][15]). Für landwirtschaftliche Reststoffe werden für den Zeitraum 2000-2009 technische Potenziale zwischen 0,11 und 3,9 EJ/a auf Europaebene ermittelt [16]. Für den Reststoff Stroh werden europaweit Strohpotenziale zwischen 820 und 1,829 PJ/a ausgewiesen [17–20].

Vorteile der Nutzung von Reststoffen werden vor allem in einer umweltverträglichen Bereitstellung gesehen. Allerdings wird in diesem Kontext auch darauf hingewiesen, dass die Nutzung von Ernterückständen mit ökologischen Risiken verbunden sein kann. Die Entnahme von landwirtschaftlichen Reststoffen kann negative Auswirkungen auf Bodenfunktionen haben wie z. B. Minderung der Boden-Kohlenstoff-Sequestrierung, reduzierte Humusbildung und eingeschränkter Erosionsschutz [4].

Die Ergebnisse aus verschiedenen Studien, in denen das deutschlandweite Strohpotenzial berechnet worden ist, sind in Abbildung 4 zusammengefasst. Das technische Brennstoffpotenzial von Stroh wird für Deutschland in einer Bandbreite zwischen 59 und 274 PJ/a bzw. zwischen 4,2 und 18,7 Mio. t_{TM} Stroh angegeben.

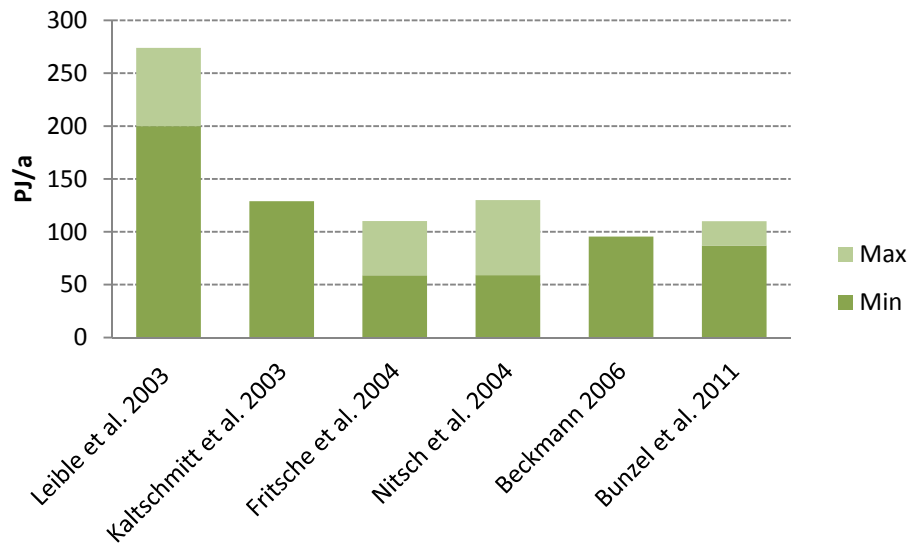


Abbildung 4: Technisches Brennstoffpotenzial von Stroh in Deutschland; Literaturvergleich basierend auf [21][22][23][24][25][17]

Die in allen Studien zugrunde gelegte Vorgehensweise zur Analyse von Strohpotenzialen besteht aus den folgenden Teilschritten:

- Ermittlung der Getreideanbauflächen und der Kornerträge
- Ermittlung des Strohaufkommens über Korn-Stroh-Verhältnisse
- Abschätzung des Strohbedarfs in der Viehhaltung
- Abschätzung des Strohbedarfs zur Erhaltung der Humusbilanz mittels pauschalierter Faktoren.

Die Variationen in den Ergebnissen lassen sich auf divergierende Ansätze und Annahmen zurückführen. Zum einen wurde in den Studien der Untersuchungsrahmen unterschiedlich gewählt: In den Studien wurden verschiedene Feldfrüchte betrachtet, so dass bereits für das theoretische Potenzial (Strohaufkommen) unterschiedliche Werte ermittelt wurden. In der Studie von Fritsche et al. [23] wurden beispielsweise das Ölsaatenstroh, Maisstroh und sonstiges Stroh ausgeschlossen. Zum anderen wurden unterschiedliche Annahmen getroffen, welche Strohmenge in der Tierhaltung und als Gründünger eingesetzt wird und welche Bergeraten den „Stand der Technik“ widerspiegeln. In der Studie, welche das höchste Brennstoffpotenzial ausgibt, wurde davon ausgegangen, dass u. a. durch die Rückführung des Einstreustrohs, 37-52 % des Strohs auf dem Feld verbleiben. In anderen Studien wurden konservativere Annahmen getroffen, die davon ausgehen, dass bis zu 88 % des Strohs auf dem Feld verbleiben sollen. In allen Studien wurde der Anteil des Strohs, der energetisch genutzt werden kann, beziehungsweise, der Anteil, der aufgrund der Humusversorgung auf dem Feld verbleiben muss, mit pauschalen Faktoren abgeschätzt. Eine räumliche Differenzierung erfolgte ausschließlich über die verschiedenen Aufkommensmengen auf Bundesland- oder Landkreisebene.

Eine Ausnahme bildet die Studie von Gauder et al., 2010 [26], die auf Basis statistischer Daten und mittels Humusbilanzierung die Strohpotenziale auf Landkreisebene berechnet. Allerdings bezieht sich die Publikation nur auf Baden-Württemberg und ist deshalb nicht in dem deutschlandweiten Literaturvergleich aufgeführt.

2.6 Politisch-rechtliche Rahmenbedingungen

Die Verfügbarkeit und Nutzung von Reststoffen wird von agrar-, klima- und energiepolitischen- bzw. rechtlichen Rahmenbedingungen beeinflusst, die im Folgenden dargestellt werden sollen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen sind insofern relevant, da sie zum einen konkrete Zielsetzungen und Förderinstrumente für Erneuerbaren Energien (auch für Bioenergie) und zum anderen Anforderungen an die Rohstoffproduktion und -nutzung festlegen. Zunächst werden die agrarpolitischen Rahmenbedingungen dargestellt und daran anschließend die energiepolitischen bzw. -rechtlichen Rahmenbedingungen, die insbesondere für die Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen wie z. B. Stroh gelten.

2.6.1 Agrarpolitische und -rechtliche Rahmenbedingungen

Agrarpolitische Rahmenbedingungen haben maßgeblichen Einfluss auf Agrarmärkte und Agrarproduktion und somit auch über die Verfügbarkeit von landwirtschaftlichen Reststoffen. Die EU-Agrarpolitik und damit die Agrarpolitik Deutschlands sind abhängig von der Welthandelsorganisation (WTO). International wurde die bisherige Entwicklung der Agrarpolitik vornehmlich durch die Vereinbarungen der Uruguay-Runde des allgemeinen Zoll- und Handelsabkommen (GATT) und durch die bisher erzielten Ergebnisse im Rahmen der WTO-Verhandlungen in Doha bestimmt. Die Vereinbarungen haben durch den Abbau der inländischen Stützung und die Reduktion der Exportsubventionen eine Liberalisierung der Märkte zum Ziel.

Die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) der EU beruht auf den Säulen der gemeinsamen Marktordnung und der Entwicklung des ländlichen Raumes. Verantwortlich für die Umsetzung der ersten Säule sind im Wesentlichen Direktzahlungen an landwirtschaftliche Betriebsinhaber. Diese Zahlungen werden durch die hohen Standards im Umwelt-, Tier- und Verbraucherschutz in der EU im Vergleich zu den Auflagen in Drittstaaten begründet. Mittels der zweiten Säule werden Maßnahmen zur Entwicklung des ländlichen Raumes finanziell unterstützt. Ein Instrument zur Umsetzung ist die Schaffung des Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des Ländlichen Raums (ELER).

Mit der Einführung der Betriebsprämienregelung 2005 werden die Direktzahlungen zum überwiegenden Teil unabhängig von der landwirtschaftlichen Produktionsmenge gewährt. Die Höhe der Direktzahlungen bemisst sich nach der Flächenausstattung und der Verfügbarkeit weiterer Zahlungsansprüche. Damit sind Zahlungen – wie von der WTO gefordert – nahezu von der Produktion entkoppelt. In der Bundesrepublik werden aktuell nur für Stärkekartoffeln, Eiweißpflanzen oder Schalenfrüchte an den Produktionsumfang bzw. an die Anbaufläche gekoppelte Direktzahlungen geleistet. Darüber hinaus gibt es noch Verarbeitungsprämien für Trockenfutter, Flachs und Hanf sowie Kartoffelstärke (diese Zahlungen haben in Deutschland einen Anteil von unter 2 % aller Direktzahlungen). Direktzahlungen für den Anbau von Tabak und Energiepflanzen wurden 2010 in Deutschland eingestellt. Die restlichen noch gekoppelten Zahlungen werden spätestens 2012 vollständig entkoppelt und in die Betriebsprämienregelung einbezogen.

Die Regierungen der Mitgliedstaaten beschlossen im Rahmen der Agrarreform 2003 die Zahlungen von der Einhaltung bestimmter Verpflichtungen abhängig zu machen (Cross Compliance, CC). Dieser Verpflichtung unterliegen alle Betriebe, welche Direktzahlungen oder Zahlungen im Rahmen bestimmter Fördermaßnahmen für die Entwicklung des ländlichen Raums beziehen.

Die im Einzelnen relevanten Vorschriften regelt die Verordnung (EG) Nr. 73/2009 in Verbindung mit den Umsetzungsbestimmungen der einzelnen Mitgliedsstaaten [27]. In Deutschland sind dies vor allem das Direktzahlungen-Verpflichtungengesetz und die Direktzahlung-Verpflichtungsverordnung [28][29]. Die Cross-Compliance (CC) Regeln umfassen in allen Mitgliedstaaten Grundanforderungen an die Betriebsführung: das sind einschlägige europäische Rechtsakte (Richtlinien und Verordnungen) im Bereich Umwelt, Kennzeichnung und Registrierung von Tieren Gesundheit (insbesondere Pflanzenschutz, Lebensmittel- und Futtermittelsicherheit), Tierseuchenbekämpfung sowie Futtermittelsicherheit. Diese Rechtsakte gelten alle in Deutschland auch unabhängig von CC, werden hier aber gezielt mit Zahlungen verknüpft. Des Weiteren umfassen CC-Bestimmungen Regelungen zur Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in „gutem landwirtschaftlichem und ökologischem Zustand“ (GLÖZ). Unter diese GLÖZ-Vorgaben fallen die Erhaltung der organischen Substanz im Boden und der Schutz der Bodenstruktur. Im Prinzip sind in Deutschland diese Ziele wie die Erhaltung der organischen Bodensubstanz schon indirekt sowohl im Grundgesetz (Art. 20a) als auch direkt im Bundesbodenschutzgesetz § 17, Absatz 2, Punkt 7 verankert [30][31].

Im Rahmen der CC-Bestimmungen werden in der EG-Verordnung Nr. 73/2009 des Rates der EU, im Artikel 6, Anhang III die „Erhaltung des Anteils der organischen Substanz im Boden durch geeignete Praktiken“ gefordert.

Konkreter wird dieser Sachverhalt im Direktzahlungsverpflichtungengesetz geregelt und in der Direktzahlungsverpflichtungsverordnung in Vorschriften umgesetzt. In der Direktzahlungsverpflichtungsverordnung sind die drei Möglichkeiten für einen Betrieb dargelegt, wie dieser den Nachweis über den Erhalt des Anteils der organischen Bodensubstanz erbringen kann. Diese Möglichkeiten können über bestimmte Anbauverhältnisse, durch eine Humusbilanz oder durch eine Bodenhumusuntersuchung erfolgen. Die Aufstellung der Humusbilanz lehnt sich an die VDLUFA Methode untere Werte an (siehe Kapitel 3.1.2). Verstöße gegen die CC-Vorgaben werden nach Schwere und Dauer behandelt und könnten mit einer Minderung bis hin zu einer Aussetzung der Zahlungen sanktioniert werden.

Die Bundesregierung vertritt in der am 31.März 2010 veröffentlichten Position zur Weiterentwicklung der GAP nach 2013 die Auffassungen das Zwei-Säulen Modell zu erhalten. Weiterhin möchte sie statt einer jährlichen Umschichtung der so genannten Modulation von den Direktzahlungen zur 2. Säule, im Vorfeld jeder Haushaltsperiode eine sachgerechte Aufteilung der Mittel auf beide Bereiche [32].

Damit steht die Position der Bundesregierung nicht im Einklang mit den Empfehlungen des Wissenschaftlichen Beirats für Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. In seinem Gutachten vom Mai 2010 für eine EU Agrarpolitik nach 2013 fordert der Beirat das gegenwärtige System der Direktzahlungen bis 2020 zu reduzieren bzw. abzuschaffen. Das Gremium begründet diese Aussage damit, dass Direktzahlungen weder für die aktuellen noch für die zukünftigen Herausforderungen (Nahrungsmittelsicherheit, Welternährungssicherung, Anpassung an den Klimawandel, Vermeidung von Klimagasemissionen, Erhalt der Biodiversität, usw.) entworfen wurden und daher auch zu ihrer Lösung lediglich marginale Beiträge liefern.

Der Beirat empfiehlt für den Planungszeitraum 2014-2020 die Direktzahlungen schrittweise zu reduzieren bzw. abzuschaffen und im Gegenzug eine finanzielle Aufstockung oder Neukonzipierung von Politikmaßnahmen welche die oben genannten Herausforderungen effizienter lösen können [33].

2.6.2 Energie- und klimapolitische Rahmenbedingungen

Im Kontext der Analyse von Reststoffpotenzialen ist es vor allem wichtig aufzuzeigen, welche Ziele es für die Nutzung von Bioenergie in Deutschland gibt und welche Anforderungen an die Produktion von Biomasse und Bioenergie gestellt werden.

Die energiepolitischen Ziele für erneuerbare Energien sind auf europäischer Ebene in der Richtlinie 2009/28/EG, der sogenannten Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energy Directive, RED) festgelegt worden [2]. Die Richtlinie ist im April 2009 in Kraft getreten und fasst Anstrengungen der EU zum Ausbau der erneuerbaren Energien in den Sektoren Wärme, Strom und Verkehr zusammen. Jeder Mitgliedstaat wird beauftragt, seinen Anteil an erneuerbaren Energien zu erhöhen, so dass die EU insgesamt einen Anteil von 20 % im Jahr 2020 erreichen kann. In der Richtlinie sind länderspezifisch verbindliche Ziele für den Gesamtanteil von Energie aus erneuerbaren Quellen am Bruttoendenergieverbrauch festgelegt. In Deutschland sollen die erneuerbaren Energien mit einem Anteil von 18 % zur Deckung des Endenergiebedarfs beitragen.

Darüber hinaus wird der Anteil von Energie aus erneuerbaren Quellen im Verkehrssektor festgelegt, der bis zum Jahr 2020 10 % des gesamten Energieverbrauches erreichen soll. Neben den Zielen und Regeln für statistische Transfers, gemeinsame Projekte, Herkunftsnachweise, administrative Verfahren und anderen Regelungen werden in der Richtlinie auch Anforderungen an die nachhaltige Herstellung von Bioenergieträgern formuliert. Diese Kriterien betreffen zwar vorerst nur die Produktion von flüssigen Brennstoffen zu, die EU-Kommission hat aber bereits den Mitgliedstaaten Vorschläge zur Übertragung bzw. Anpassung der Nachhaltigkeitsanforderungen auf feste und gasförmige Energieträger vorgelegt [34].

Die Nachhaltigkeitskriterien umfassen Anforderungen an die Einsparung von Treibhausgasen, flächenbezogene Anforderungen (Schutz von Flächen mit hohem Naturschutzwert, bewaldete Flächen, Naturschutzzwecken dienende Flächen, Grünland mit hoher biologischer Vielfalt, Flächen mit hohem Kohlenstoffbestand, Feuchtgebiete, kontinuierlich bewaldete Gebiete und Torfmoore) und Anforderungen an eine nachhaltige landwirtschaftliche Bewirtschaftung.

Um Anreize für den Ausbau neuer und noch nicht etablierter Systeme im Verkehrssektor zu fördern, wird der Einsatz von Kraftstoffen der zweiten Generation sowie die Elektromobilität von der EU und der Bundesregierung doppelt auf die Kraftstoffquote angerechnet. Darunter fallen auch reststoffbasierte Kraftstoffe, welche die vorgesehene Doppelgewichtung bei der Erhebung des Anteils von Energie aus erneuerbaren Quellen (vgl. Artikel 21 Abs. 2 der RL 2009/28/EG) erfahren. Diese gilt für Biokraftstoffe, die aus Abfällen, Reststoffen, zellulosehaltigem Non-Food-Material und lignozellulosehaltigem Material hergestellt werden. Dabei wird Stroh als Reststoff eingestuft.

Zusätzlich zu dem als „Double Counting“ bezeichneten Mechanismus ist in der Methodik zur Treibhausgasbilanzierung eine besondere Regelung für Reststoffe vorgesehen. Nach Anhang V Teil C Nr. 18 der Richtlinie werden die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen von Abfällen, Ernterückständen wie Stroh, Bagasse, Hülsen, Maiskolben und Nussschalen sowie Produktionsrückständen einschließlich Rohglycerin (nicht raffiniertes Glycerin) bis zur Sammlung dieser Materialien auf null gesetzt bzw. von den Treibhausgasemissionen befreit.

Damit die verbindlichen nationalen Gesamtziele erreicht werden, sieht die Richtlinie vor, nationale Aktionspläne für erneuerbare Energieträger mit Informationen zu sektorspezifischen Zielen zu erstellen. Die Bundesregierung hat am 4. August 2010 den Nationalen Aktionsplan für erneuerbare Energie beschlossen. Darin geht sie davon aus, dass das verbindliche nationale Ziel von 18 % erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch in 2020 erreicht wird und mit einem erwarteten Anteil von 19,6 % sogar übertroffen werden kann. Für die einzelnen Sektoren wird für 2020 ein Anteil von 15,5 % erneuerbaren Energien im Bereich Wärme/Kälte, ein Anteil von 38,6 % erneuerbaren Energien am Strom und ein Anteil von 13,2 % im Verkehrsbereich erwartet [35].

Im Hinblick auf das verbindliche Ziel von 18 % hat sich die Bundesregierung bereits vor Erstellung des Nationalen Aktionsplans Sektorziele gesetzt und diese in den entsprechenden Gesetzen verankert. Im Bereich der Stromerzeugung soll die Erhöhung des Anteils bis 2020 auf mind. 30 % erneuerbare Energien am Stromverbrauch maßgeblich durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz erreicht werden [3]. Das EEG dient der Förderung für Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und regelt die Vergütung von Anlagen, die Strom aus erneuerbaren Quellen produzieren. Mit der EEG Novellierung 2012 haben sich u. a. neue Vergütungsregeln ergeben. Mit der Einsatzstoffvergütungskategorie II wurde eine Rohstoffklasse geschaffen, in der sich u. a. landwirtschaftliche Reststoffe wie Gülle, Stroh oder andere Nebenernteprodukte wiederfinden und für die eine erhöhte Vergütung vorgesehen ist.

Im Bereich der Wärmeerzeugung ist die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien für Heizung, Warmwasser und Erzeugung von Kühl- und Prozesswärme auf 14 % bis 2020 vorgesehen und im EEWärmeG festgeschrieben [36]. Kern des Gesetzes ist die Nutzungspflicht von erneuerbaren Energieträgern an der Wärme- und Kältebereitstellung. Dies gilt für den Neubau von Gebäuden und die grundlegend zu renovierenden Gebäude der Öffentlichen Hand. In §5 EEWärmeG wird geregelt, zu welchem Anteil der Wärme- und Kältebedarf aus den jeweils eingesetzten Erneuerbaren Energien (EE) gedeckt werden muss. Dabei können die Gebäudeeigentümer grundsätzlich alle im Gesetz genannten Formen erneuerbarer Energie (solare Strahlungsenergie, Biomasse, Geothermie) nutzen. Entscheidend ist allein die Erfüllung des Pflichtanteils bezogen auf den gesamten Wärme- und Kälteenergiebedarf. Darüber hinaus bestehen Anforderungen an den eingesetzten Kessel (beste verfügbare Technik), Anforderungen an die Erfüllung von Emissionsgrenzwerten beim Betrieb von Feuerungsanlagen und Vorgaben bezüglich der Wirkungsgrade sowie Nachweispflichten in Hinblick auf die Erfüllung der Mindestanteile.

Zur Förderung des Einsatzes erneuerbarer Wärme im Gebäudebestand (ohne Öffentliche Hand) wurde 1999 das Marktanreizprogramm geschaffen. In Hinblick auf die Kontinuität des Förderprogramms sind neben kurzfristigen Förderstopps (z. B. 2010) auch jährliche Anpassungen der förderwürdigen Technologien zu benennen.

Um Belastungen von Schadstoffemissionen aus der Wärmeerzeugung aus Biomasse zu begrenzen und zu reduzieren, sind in gesetzlichen **Emissionsvorschriften** einzuhaltenden Grenzwerte an die maximal freizusetzenden Emissionen von Feuerungsanlagen verschiedener Leistungsklassen benannt und Aussagen zu zulässigen einzusetzenden Brennstoffen enthalten.

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, letzte Änderung 2011) dient zum Schutz der Umwelt vor übermäßigen Immissionen, wie Luftverunreinigungen, Geräusche oder Erschütterungen [37]. Es stellt Anforderungen an alle ortsveränderlichen als auch ortsfesten Anlagen. Bestimmte Anlagen

unterliegen aufgrund erhöhter Gefahrenpotenziale einer Genehmigungspflicht mit erhöhten Anforderungen (genehmigungsbedürftige Anlagen § 4 Abs. 1 BImSchG). Dabei ist häufig die Leistung oder der Produktionsdurchsatz einer Anlage entscheidend dafür, ob sie der Genehmigungspflicht unterliegt oder nicht. In den mehr als 30 Durchführungsverordnungen (BImSchV) zum Gesetz sind die für die Praxis wesentlichen vornehmlich technischen Einzelheiten geregelt, die konkrete Anforderungen an bestimmte Typen von Anlagen definieren sowie Einzelheiten zum Genehmigungsverfahren und zur Überwachung von Anlagen enthalten. Die Einteilung der Feuerungsanlagen und die damit verbundene Wirksamkeit bestimmter Verordnungen sind in Abbildung 5 dargestellt.

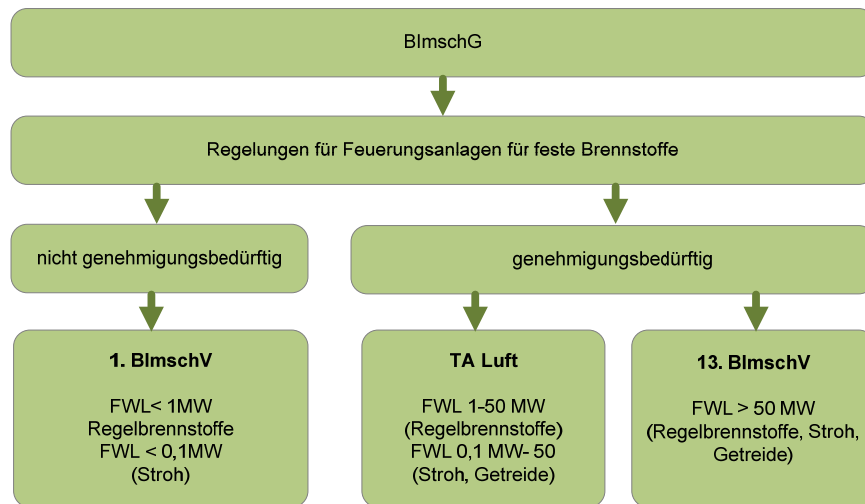


Abbildung 5: Emissionsschutzrechtliche Bestimmungen für Feuerungsanlagen

Feuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung (FWL) unter 1 Megawatt (MW) gehören zu den nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen und unterliegen der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (1. BImSchV) [38]. Beim Einsatz von halmgutartigen Brennstoffen in Kleinfeuerungsanlagen gelten allerdings ab 100 Kilowatt (kW) die Anforderungen der Technischen Anleitung Luft (TA Luft) und die Anlagen sind nach 4.BimSchV zu genehmigen. Die Anforderungen umfassen zum einen strengere Grenzwerte für Staub und Kohlenmonoxid (CO) sowie maximale Grenzwerte für weitere Komponenten (u. a. HCl), zum anderen aber auch aufwendigere Mess- und Kontrollvorschriften. In Tabelle 2 sind die Grenzwerte für Stroh nach TA Luft im Vergleich zu Holz dargestellt.

Tabelle 2: Grenzwerte TA Luft

Brennstoff	Feuerungswärmeleistung (MW)	Staub (g/m³)	CO (g/m³)	NOx (g/m³)
Holz	1 -< 2,5	0,1	0,15	0,25
	2,5 -< 5	0,05	0,15	0,25
	>5	0,02	0,15	0,25
Stroh	0,1- <1	0,05	0,25	0,5
	> 1	0,02	0,25	0,4

Sauerstoffbezug 11 %

Die Novellierung der BImSchV ist im März 2010 in Kraft getreten und betrifft u. a. rund 14 Mio. Einzelraumfeuerungen für Festbrennstoffe, die bisher keiner konkreten Emissionsbegrenzung unterlagen und ca. 0,66 Mio. Heizkessel. Die Leistungsgrenze (Schwellenwert) für die Festlegung von Emissionsgrenzwerten wurde für sonstige Heizkessel auf 4 kW gesenkt. Die Emissionsbegrenzung für Heizkessel sieht eine deutliche Verschärfung der Emissionsgrenzwerte in zwei Stufen vor (siehe Tabelle 3). Die erste Stufe trat mit Inkrafttreten der 1. BImSchV 2010 ein, die zweite Stufe gilt für Anlagen, die ab dem Jahr 2015 errichtet werden. Die Emissionsbegrenzung erfordert die Entwicklung von primärer und/oder sekundärer Anlagentechnik zur Emissionsminderung bzw. zur Staubreduktion. Mit der Novellierung der 1. BImSchV wurden neben Stroh auch ähnliche pflanzliche Stoffe, nicht als Lebensmittel bestimmtes Getreide, wie Getreidekörner und Getreidebruchkörner, Getreideganzpflanzen, Getreideausputz, Getreidespelzen und Getreidehalmreste sowie Pellets aus den vorgenannten Brennstoffen als Regelbrennstoffe zugelassen (§ 3, Abs. 1, Nr. 8, 1. BImSchV).

Tabelle 3: Emissionsbegrenzung für Heizkessel nach 1. BImSchV

Brennstoff	Nennwärmeleistung (kW)	Staub (g/m ³)	Staub (g/m ³)	CO (g/m ³)	CO (g/m ³)
		1. Stufe	2. Stufe	1. Stufe	2. Stufe
Holz (Nr. 4 und 5) und Stroh	4-500	0,1	0,02	1	0,4
	<500	0,1	0,02	0,5	0,4

Bei der Verwendung von halmgutartigen Brennstoffen kann das Einhalten der Grenzwerte derzeit von vielen Kesselherstellern nicht garantiert werden. Als eine technologische Herausforderung wird die weitere Verschärfung der Grenzwerte voraussichtlich ab dem Jahr 2015 gesehen. Die Entwicklung auf diesem Gebiet ist abhängig von der erfolgreichen Entwicklung und Marktablierung von primären und/oder sekundären Anlagentechniken zur Emissionsminderung bzw. zur Staubreduktion Staub- und Feinstaubfiltern zu verbraucherfreundlichen Preisen.

3 Potenzialanalyse

[Autoren: Christian Weiser, Frank Reinicke, Bernhard Wagner, Peter Deumelandt]

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, welche landwirtschaftlichen Reststoffe in welchen Mengen vorhanden sind und wie sich ihre bisherige Nutzung darstellt. Stroh wurde als das aussichtsreichste Substrat identifiziert, welches zum einen in sehr großen Mengen in Deutschland produziert wird und zum anderen bezüglich der Substrateigenschaften vergleichsweise flexibel genutzt werden kann. Die Auswertung von Potenzialstudien hat den großen Forschungsbedarf auf diesem Gebiet aufgezeigt, da bisherige deutschlandweite Potenzialanalysen Restriktionen für die Strohnutzung lediglich pauschal abgeschätzt haben. Die Bedeutung von ökologischen Restriktionen der Strohnutzung wird im Folgenden dargestellt und dann erläutert, wie in dieser Studie der Parameter Humusbedarf in der Potenzialanalyse berücksichtigt worden ist. Anschließend werden die Ergebnisse aus der Analyse des nachhaltigen Strohpotenzials vorgestellt und diskutiert. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Analyse von Modellregionen, in dem das Thema Erschließbarkeit von Potenzialen thematisiert wird sowie mit einer Analyse der Möglichkeiten der Fernerkundung für die Biomassepotenzialanalyse.

3.1 Potenzialanalyse mittels Humusbilanzierung

3.1.1 Einleitung

Böden sind fundamentaler Bestandteil landwirtschaftlicher Produktionssysteme. Sie sind begrenzt verfügbar und unterliegen unterschiedlichen Ansprüchen. Eine effiziente und nachhaltige Nutzung der Ressource Boden muss daher angestrebt werden. Neben der Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln, werden zunehmend auch nachwachsende Rohstoffe auf den Flächen erzeugt. So stieg der Anbau im Jahr 2011 bis auf 2,28 Mio. Hektar (ha) [39]. Aktuell bestehen Bestrebungen, Nebenernteprodukte für die energetische Nutzung deutlich stärker zu berücksichtigen. Nach Aussage der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) könnten Nebenernteprodukte im Jahr 2050 einen Beitrag von bis zu 300 PJ leisten und damit 4,3 % des dann projizierten Energiebedarfs abdecken. Mit 42 % nimmt Getreidestroh den größten Anteil unter den Nebenernteprodukten ein (vgl. Tabelle 1).

Die Strohnutzung sowie das Strohmanagement unterlagen in den letzten Jahrzehnten einem grundlegenden Wandel. Neben der Nutzung als Einstreu finden sich derzeit auch untergeordnete Nutzungspfade für Futter, Baumaterial und Substrate im Garten- und Gemüsebau. Einhergehend mit der Intensivierung der Landwirtschaft und den Verlagerungen von stroh- zu güllebasierten Haltungssystemen, verringerte sich der Bedarf an Getreidestroh zur Einstreu deutlich. Das Verbot zum Verbrennen des Strohs auf dem Feld verhindert die Entsorgung auf diese Weise. So wird größtenteils das Stroh nach dem Dreschen des Getreides gehäckselt und auf dem Feld verteilt. Hauptaufgabe der Nebenernteprodukte ist daher ein Ersatz des mit dem Anbau der Kulturart einhergehenden Humusverlustes. Je nach Anbauspektrum und Nutzung wird damit ein ungenügender oder auch übermäßiger Humusersatz erwirkt. Bei zu geringer Rückführung ist die Bodenfruchtbarkeit in Gefahr. In Regionen mit einem hohen Getreidefruchtanteil (ohne Körnermais) kann „viel Stroh“ Probleme bei der Bodenbearbeitung und Saatbettbereitung hervorrufen, den Krankheitsdruck erhöhen und zu einer Immobilisierung von Stickstoff führen. Der optimale Bewirtschaftungszustand ist ein Gleichgewicht von Abbau und Ersatz der organischen Bodensubstanz. Ein ausgeglichener Humussaldo ist daher die Mindestanforderung für die Bestimmung des überschüssigen Getreidestrohs zur energetischen Nutzung.

Bei den meisten Konversionspfaden der energetischen Strohverwertung von Stroh kommt es zu keiner oder nur geringer Rückführung der organischen Substanz auf die landwirtschaftliche Nutzfläche.

Die Ausrichtung der Potenzialanalyse an einem ausgeglichenen Humussaldo begründet sich in der komplexen Beeinflussung nahezu aller Bodeneigenschaften und -funktionen durch die organische Bodensubstanz (OBS). Diese OBS ist Lebensgrundlage für heterotrophe Bodenorganismen. Streustoffe werden durch Pilze, Vertreter der Makrofauna, (z. B. Regenwürmer, Asseln und Tausendfüßler) oder von Vertretern der Mesofauna (z. B. Enchyträen, Collembolen) umgewandelt. Bereits zerkleinerte Pflanzen- oder Tierreste sowie Exkremente der Bodentiere werden durch Sekundärzersetzer weiter abgebaut. Im Allgemeinen ist der Abbau von OBS einerseits von den Lebensbedingungen (Witterungsbedingungen, Bodeneigenschaften) der am Abbau beteiligten Organismen und zum anderen von den Eigenschaften des Substrates (Zusammensetzung, Kohlenstoff/Stickstoff [C/N]-Verhältnis, Grad und Art der Stabilisierung) abhängig. Der Grad der Stabilisierung ist wiederum abhängig von der standortgebundenen Bodencharakteristik und Eigenschaften der OBS [40]. Eine Form der Stabilisierung der OBS verläuft in Wechselwirkung mit Mineralen aus der Tonfraktion (Tonminerale, Eisenoxide), durch die Bildung so genannter Ton-Humusassoziate. Diese Verbindungen sind so stabil, dass sie den organischen Kohlenstoff vor der Oxidation durch Bodenmikroorganismen schützen. Aus diesen starken Bindungen resultieren auch Schwierigkeiten bei der Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehaltes. Bei einer abstrakten, modellhaften Betrachtung wird der organische Bodenkohlenstoff je nach Stabilität in verschiedene Fraktionen von labil bis inert eingeteilt [41]. Zahlreiche Stoffumsatzprozesse im Boden werden durch die Zufuhr organischer Substanz nachhaltig aktiviert. Die Humusversorgung ackerbaulich genutzter Böden dient nicht nur der Ertragssicherung, sie hat – insbesondere durch die Steuerung des Kohlenstoff- und Stickstoffumsatzes – auch eine ökologische Relevanz [42][43]:

- als Speicher und Transformator von Nährstoffen, insbesondere von Stickstoff, Schwefel und Phosphor: allmähliche Nährstoffnachlieferung und Verbesserung der Nährstoffausnutzung, wichtiger N-Pool im Stickstoffkreislauf mit 95 bis 98 % des Gesamt-N des Bodens [44][45];
- als Filter und Puffer: Immobilisierung und Entgiftung toxischer Substanzen [46];
- als CO₂-Senke: temporäre C-Speicherung und Beeinflussung des CO₂-Haushaltes der Atmosphäre [47][48];
- durch die Förderung der bodenbiologischen Aktivität: erhöhter mikrobieller Umsatz und Besiedlung durch Bodenfauna bei guter Humusversorgung und damit verbundene phytosanitäre Wirkungen und Möglichkeit zur Einsparung von Pflanzenschutzmitteln;
- beim Aufbau eines günstigen Bodengefüges: erhöhte Aggregatstabilität, gute Bodendurchlüftung, verbesserte Wasserspeicherung und Durchwurzelbarkeit, verminderte Bodenerosion durch geringere Verschlammungsneigung, höhere Infiltrationsrate und durch geringeren Oberflächenabfluss, Verminderung der Gefahr von Bodenschadverdichtung [49][50][51].

Unter konstanten Umwelt- und Vegetationsbedingungen stellt sich auf Ackerböden ein Gleichgewicht zwischen Anlieferung und Abbau organischer Substanz ein. Dieses Gleichgewicht ist durch einen standortgebundenen, charakteristischen Humusgehalt gekennzeichnet [52]. Längerfristig hohe Humussalden verbunden mit einer drastischen Änderung dieser Umwelt- und Vegetationsbedingungen können sich negativ auswirken. Der akkumulierte Humus kann rasch mineralisieren und die beschriebenen Vorteilswirkungen des Humus als Nährstoffspeicher und Schadstoffpuffer können sich in eine Quellwirkung umkehren. Je nach den vorherrschenden Bedingungen im Boden (z. B. Temperatur,

Wasser- bzw. Sauerstoffangebote, usw.) können durch Prozesse der Bodenatmung, Nitrifikation, Denitrifikation und Methanogenese klimarelevante Gase entstehen und in die Atmosphäre gelangen [53]. Des Weiteren können rasch freigesetzte Nährstoffe wegtransportiert werden und an anderer Stelle zu Störungen der Ökosysteme z. B. durch Eutrophierung führen. Kennzahlen zur Humusversorgung werden daher als wichtige Agrar-Umweltindikatoren angesehen [54]. Aufgrund der vielfältigen Wirkungen ist eine geordnete, standortangepasste Humusersatzwirtschaft in landwirtschaftlichen Betrieben eine wesentliche Grundlage für die Sicherung einer nachhaltigen pflanzlichen Produktion. Bisherige Potenzialschätzungen zu nutzbaren Strohmenge berücksichtigten dieses Kriterium lediglich als pauschalen Faktor (vgl. Unterkapitel 2.5).

3.1.2 Methodische Grundlagen

Humusbilanzierung

Auf Ackerschlägen direkt bestimmte Humusgehalte sind schwierig zu beurteilen, da geeignete Grenzwerte fehlen, eine enorme zeitliche und räumliche Variabilität der Gehalte auftritt und lange Zeiträume bis zum sicheren Nachweis von Humusgehaltsänderungen notwendig sind. Um die aufgeführten Schwierigkeiten zu umgehen, wurde die Humusbilanzierung als Instrument zur (indirekten) Einschätzung des Humushaushaltes ackerbaulich genutzter Böden entwickelt. Mit Humusbilanzen sind quantitative Aussagen zur Humusersatzwirtschaft realer oder geplanter Bewirtschaftungssysteme möglich. Die Dauergrünlandflächen sind von der Bilanzierung ausgenommen, da sich durch ständige Bodenbedeckung, starker Durchwurzelung und fehlender Bodenbearbeitung optimale Humusspiegel einstellen. Untersuchungen zur Dynamik des organischen Kohlenstoffgehaltes, des Stickstoffgehaltes von Böden in Dauerversuchen sowie Vergleiche aus langjährigen Fruchtfolge Düngungsversuchen stellen die Grundlage dar, um Bedarfs- und Reproduktionsfaktoren für die Humusbilanzierung abzuleiten. Aufgrund dieser Untersuchungen werden Fruchtarten in humusmehrend (z. B. Leguminosen, Ackergras) und humuszehrend (z. B. Zuckerrübe, Silomais) unterschieden. Ihnen werden nach der Intensität der Mehrung bzw. Zehrung Koeffizienten zugewiesen. Anfallenden Koppelprodukten (z. B. Stroh, Rübenblatt) und organischen Düngern (z. B. Festmist, Rindergülle, Klärschlamm) werden ebenfalls reproduktionswirksame Koeffizienten zugewiesen. Die spezifischen Koeffizienten der Fruchtarten sind durch die für sie charakteristische Art und Dauer der Bodenbedeckung und -bearbeitung sowie durch die Menge und Qualität des Streueintrags über die Ernte- und Wurzelrückstände begründet (Abbildung 6). Die Koeffizienten für organische Dünger sind nach ihrer Herkunft (z. B. Tierart), nach ihrem Rottegrad und dem Trockensubstanzgehalt differenziert.

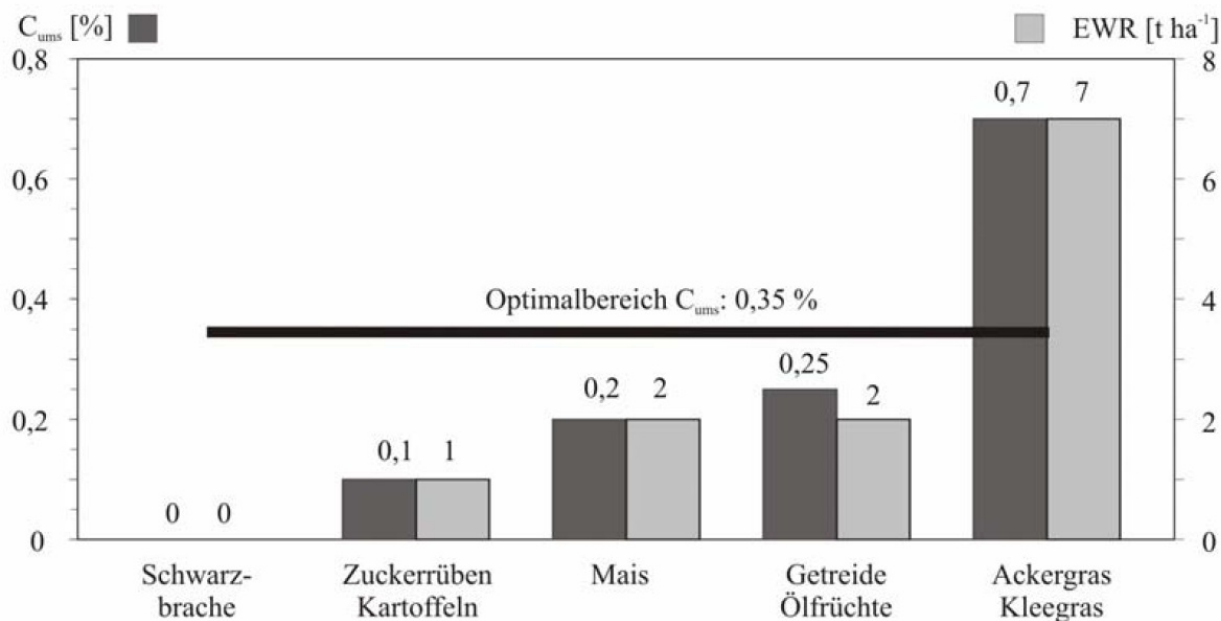


Abbildung 6: Beziehungen zwischen der Masse an Ernte- und Wurzelrückständen (EWR) ausgewählter Fruchtarten und dem Gehalt des Bodens an umsetzbaren Kohlenstoff (C_{ums}) im Durchschnitt von 22 Dauerfeldversuchen (Laufzeit der Versuche 20–100 Jahre) [55].

Bei der in diesem Projekt durchgeführten Humusbilanzierung stellt theoretisch der Landkreis den landwirtschaftlichen Betrieb dar. Der Anteil der betrachteten Fruchtarten an der Ackerfläche des Landkreises gibt die Fruchtfolge wieder. Flächenumfang und Koeffizient der einzelnen Fruchtarten ergeben in der Gesamtheit den spezifischen Humusbedarf im Landkreis. Anfallende Koppelprodukte und applizierte organische Dünger stellen die realisierte Humusreproduktion dar. Aus der Gegenüberstellung beider Werte berechnet sich der Humussaldo (Abbildung 7). Diese Bilanzgröße wird nach der verwendeten Methode in verschiedenen Abrechnungseinheiten ausgegeben. Das Ergebnis ist weder ein absoluter Humusgehalt noch eine Angabe zur absoluten Änderung des Humusgehaltes, sondern eine Abschätzung des Humusversorgungsgrades und lässt lediglich die Bewertung einer längerfristigen Entwicklung zu.

Ein Vorteil der Humusbilanzierung ist die leichte und kostengünstige Anwendung aufgrund der geringen Datenanforderungen. Ein generelles Problem der Humusbilanzierung liegt in ihrer linearen Betrachtungsweise. Theoretisch hätte demnach eine humuszehrende Fruchtfolge das Potenzial den gesamten Bodenhumusvorrat zu mineralisieren bzw. eine humusmehrende Fruchtfolge den Bodenhumusvorrat unendlich zu steigern. Wie im vorherigen Unterkapitel beschrieben, existiert jedoch ein oberer und unterer Gleichgewichtszustand. In der Realität kommt es in Ökosystemen nach einer Störung bzw. auf Ackerland nach einem Bewirtschaftungswechsel zur Bildung neuer Fließgleichgewichte [41].

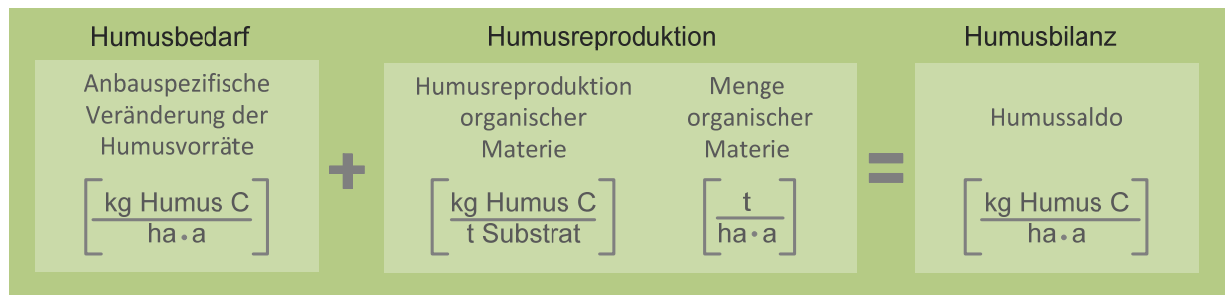


Abbildung 7: Schematische Darstellung zur Berechnung der Humusbilanzsalden in Humus-C [55]

Bei der Frage nach den Humuswirkungen über angebaute Fruchtarten existieren derzeit unterschiedliche Ansätze, die entsprechend differenzierte Humussalden nach sich ziehen. Innerhalb dieser Studie kommen die momentan anerkannten Methoden zur Anwendung.

VDLUFA-Methode

Die Methode zur Humusbilanzierung nach VDLUFA [56] beruht auf Arbeiten von [55][57][54]. Die Bilanzkoeffizienten für Fruchtarten und organische Substanzen werden in Humusäquivalenten (Häq.) ausgedrückt. Die Koeffizienten der Fruchtarten sind statisch und werden in untere Richtwerte und obere Richtwerte unterschieden. Die unteren Werte sind auf Böden anzuwenden, auf denen standort- und bedarfsgerecht Mineralstickstoffdünger angewendet wird und auf denen über eine längere Zeit eine ausgeglichene Humusbilanz erreicht wurde. Die oberen Werte sind für Böden mit jahrelang negativer Humusbilanz anzuwenden. Diese Definition zur Anwendung der oberen und unteren Koeffizienten sowie die Spanne des Strohreproduktionspotenzials (80 bis 110 kg Humus C pro Tonne Stroh) lassen Raum für subjektive Interpretationen. Deshalb werden Humusbilanzen nach der VDLUFA-Methode mit unteren und oberen Werten mit einem Strohreproduktionspotential von 100 kg Humus C erstellt. Das Strohreproduktionspotential wird für die Diskussion der Ergebnisse im Rahmen der angegebenen Spanne variiert. Bei der Humusbilanzierung nach CC-Richtlinien werden die unteren Werte und ein Strohreproduktionswert von 100 kg (Humus C) pro Tonne Stroh benutzt [28].

Die Ergebnisse der Humusbilanzierung werden bei VDLUFA in Klassen von A (< -200 kg Humus C) bis E (> 300 kg Humus C) eingeteilt (Tabelle 4). Die Klasse C (-75 bis 100 kg Humus C) gilt als optimal.

Tabelle 4: Bilanzklassen zur Bewertung der Humussalden [58]

Humussaldo		Bewertung
kg Humus-C/ha a	Gruppe	
< -200	A	Ungünstige Beeinflussung von Bodenfunktionen und Ertragsleistungen
-200 bis -76	Sehr niedrig	Mittelfristig tolerierbar, besonders auf mit Humus angereicherten Böden
-75 bis 100	B	Optimal hinsichtlich Ertragssicherheit bei geringem Verlustrisiko; langfristige Einstellung standortangepasster Humusgehalte
101 bis 300	niedrig	Mittelfristig tolerierbar, besonders auf mit Humus verarmten Böden
> 300	C	Erhöhtes Risiko für Stickstoff-Verluste, niedrige N-Effizienz
kg Humus-C/ha a	optimal	Ungünstige Beeinflussung von Bodenfunktionen und Ertragsleistungen

HE-Methode

Aus der Kritik, das Humusbedarfsniveau der Methode [57] sei zu niedrig angesetzt, wurde die Humuseinheiten-Methode (HE-Methode) weiterentwickelt [59][54]. Diese so genannte dynamische HE-Methode ist in dem Programm REPRO integriert. Die Koeffizienten sowie das Ergebnis der Bilanz werden in dieser Methode in Humuseinheiten ausgegeben. Eine Humuseinheit (HE) ist definiert als 1 t Humus mit 50 kg Stickstoff (N) und 580 kg Kohlenstoff (C) und kann in Humusäquivalente umgerechnet werden.

Im Gegensatz zur VDLUFA-Methode werden Koeffizienten aus [59][54] verwendet, welche durch drei wesentliche Unterschiede gekennzeichnet sind. Erstens werden humusmehrende Koeffizienten für mehrjähriges Feldfutter stärker differenziert (unterschiedliche Koeffizienten für Luzerne, Klee, Gemenge). Zweitens liegt der Strohreproduktionsfaktor mit 70 kg Humus C pro Tonne Stroh unter der bei VDLUFA angegebenen Spanne. Drittens sind die verwendeten Koeffizienten für Fruchtarten variabel. Die Dynamik der Koeffizienten und damit der bewirtschaftungsbedingte Humusaufbau bzw. -abbau unter einem Anbausystem, werden indirekt anhand des im Pflanzenbestand gebundenen Stickstoffs geschätzt. Die nach Modellvorstellungen zur Ausbildung eines Pflanzenbestandes benötigte Menge an Stickstoff aus der Humusmineralisierung wird durch Subtraktion des effektiven Beitrages aller anderen Quellen zur N-Versorgung der Pflanze erfasst (Mineraldüngung, N-Immission). Eine differenzierte Ausnutzung aus den N-Quellen wird durch Verwertungs- und Verlustraten abgebildet. Die Verwertungsraten werden je nach N-Quelle und Standortbedingungen modifiziert. So erfolgt z. B. die Differenzierung der N-Verwertungsraten nach Standorten durch lineare Interpolation in einem Bereich zwischen 45 % auf Böden mit einer Ackerzahl < 20 und 85 % auf Lössschwarzerdeböden mit einer Ackerzahl 100 [59]. Ansätze zur Weiterentwicklung bzw. Differenzierung dieser Methode finden sich bei [60]. So differenziert der fruchtartenspezifische Humuskoeffizient nach Ertragshöhe, Mineraldüngung, N-Immission, Niederschlag und Boden. Für die Bewertung der berechneten Humussalden werden ebenfalls die Bilanzklassen der VDLUFA herangezogen.

3.1.3 Datengrundlagen

Statistikdaten

Die Anforderungen an die Datengrundlage werden durch die Methode der Humusbilanzierung und durch die räumliche Auflösung definiert. Die räumliche Auflösung sind Stadt- und Landkreise der Bundesrepublik Deutschland (Stand 2010). Die in Tabelle 5 aufgelisteten Größen gehen für jeden Landkreis in die Bilanzierung ein. Die wichtigsten Fruchtarten in Deutschland sind Winterweizen, Winterraps, Silomais, Wintergerste, Roggen, Sommergerste, Zuckerrüben, Körnermais, Triticale, Grasanbau auf dem Ackerland, Kartoffeln, Klee, Hafer, Futtererbsen, Luzerne Sommerweizen und Ackerbohnen. Es kann davon ausgegangen werden, dass damit zusammen mit Brache etwa 95 % des Ackerlandes berücksichtigt werden. Regionale Sonderkulturen wie z. B. Hopfen oder Lupinen werden vernachlässigt.

Die Abfrage der Daten erfolgte koordiniert über das Thüringer Landesamt für Statistik an die jeweiligen Landesämter für Statistik (als Quellen sind stellvertretend für die jeweiligen Länderberichte die Thüringer Berichte angegeben). Die statistische Datenbasis stellen Daten der Agrarstrukturerhebung 1999, 2003 und 2007 dar: Flächen von Ackerland gesamt, Brache [61], sowie Anbauflächen und Erntemengen der genannten Fruchtarten [62]. Für die Humusbilanzierung werden die Daten der drei Bezugsjahre gemittelt. Angaben über den Anbau von Zwischenfrüchten sind flächendeckend nur auf Bundeslandebene verfügbar [63]. Indem die Verhältnisse der Ackerfläche pro Kreis zur gesamten Ackerfläche im Bundesland einbezogen werden, wird jedem Kreis ein Anteil der gesamten mit Zwischenfrüchten bestellten Fläche zugewiesen.

Die Viehzahlen nach Art (A_i) und Tierkategorie (A_j) werden aus der Tierzählung aus dem Jahr 2007 entnommen [64]. Diese Daten umfassen alle Rinder, Schweine, Pferde, Schafe und Geflügel. Daten zum Wirtschaftsdüngeranfall (A_{wd}) in Deutschland sind nicht auf Kreisebene vorhanden und auf Bundeslandebene gibt es nur grobe Schätzungen [65]. Für das Projekt werden diese Daten mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$A_{WD} = \left[(A_{ij} - (A_{ij} * W_{pd})) * H_f \right] * WD_{ij} \quad \text{Gl. 1}$$

A_{WD}	Wirtschaftsdüngeranfall
$A_{i,j}$	Viehzahlen nach Art und Tierkategorie
W_{pd}	Anteil und Dauer des Weidegangs
H_f	Haltungsform
WD_{ij}	Wirtschaftsdüngeranfall nach Art und Tierkategorie

Durch Informationen zum Anteil (W_p) und Dauer (W_d) des Weidegangs der einzelnen Tierkategorien werden je Landkreis die Anzahl der Tiere ohne Weidegang bestimmt. Multipliziert mit der jeweiligen Haltungsform (H_f) werden über die spezifischen Anfallsmengen (WD_{ij}) die tierischen Wirtschaftsdünger pro Landkreis bestimmt. Gleiches Vorgehen gilt für die Bestimmung des Getreidestrohs (A_s) welches zur

Einstreu verwendet wird. Die Haltungsform (H_f) ist dabei der Anteil der auf Stroh gehaltenen Tiere und (EB_{ij}) die spezifische Einstreumenge.

$$A_s = \left[\left(A_{ij} - (A_{ij} * W_{pd}) \right) * H_f \right] * EB_{ij} \quad \text{Gl. 2}$$

A_s	Anfall Getreidestroh
A_{ij}	Getreidestrohbedarf nach Art und Tierkategorie
W_{pd}	Anteil und Dauer des Weidegangs
H_f	Anteil der auf Stroh gehaltenen Tiere
EB_{ij}	Spezifische Einstreumenge

Daten zur Klärschlamm Entsorgung in der Landwirtschaft stammen ebenfalls aus der Länderabfrage, wobei 2007 das Bezugsjahr darstellt [66].

Tabelle 5: Eingangdaten für die Humusbilanzierung

Parameter	Einheit
Anbauflächen der wichtigsten Fruchtarten	ha
Erträge der wichtigsten Fruchtarten	dt
Fläche der Brache	ha
Fläche Zwischenfrüchte	ha
Organischer Dünger (einschl. Klärschlamm)	t
Mineralischer Dünger	t
Stickstoff – Depositionen	kg/ha
Stroh als Einstreu	t
Ackerzahl	-
Durchschnittlicher Jahresniederschlag	mm

Ackerzahlen

Die Abfrage und ggf. Aufbereitung der Daten zu Ackerzahlen, N-Düngereinsatz, Niederschlägen und Depositionen erfolgten koordiniert über den INL e.V. Zur Berechnung des Strohpotenzials in Deutschland werden die Ackerzahlen der jeweiligen Bundesländer auf Landkreisebene benötigt. Auf Anfrage wurden diese von den länderspezifischen Finanzämtern zur Verfügung gestellt. Die Daten sind auf Landkreisebene erfasst und wurden in Excel-Tabellen gesendet. Teilweise war eine Nachbearbeitung notwendig, da die Landkreise der Bundesländer jüngsten Gebietsreformen unterlagen und/ oder die Regionen dem derzeitigen Wissenstand nicht mehr entsprachen.

Mineralischer Stickstoff-Düngereinsatz

Für den mineralischen N-Düngereinsatz (Menge, Zeitpunkt und gedüngte Kultur) im Betrachtungszeitraum gibt es keine statistischen Erhebungen, so dass die Mineral-N-Düngung nur pauschal eingestuft werden konnte. Speziell bei der dynamischen Humusbilanz hat die Mineraldüngung einen entscheidenden Einfluss auf den sich errechnenden Humusbedarf der Fruchtarten. Mit steigender Verfügbarkeit an Mineral-N verringert sich die Nährstoffversorgung der Kulturpflanze aus dem Humuspool und die Humuszehrung fällt geringer aus. Hier konnte nur unter der strikten Annahme einer mineralischen N-Düngung nach Entzug gerechnet werden.

Niederschlag

Die mittleren Niederschlagssummen der Landkreise basieren auf Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) aus den Beobachtungsstationen der Zeitreihen 1971 bis 2000, welche aktuell die Bezugszeitreihe des DWD darstellt. Diese wurden auf ein 1-km-Raster interpoliert und anschließend als Mittelwert auf die Ebene der Landkreise aggregiert.

Stickstoff-Depositionen

Das Umweltbundesamt (UBA) stellte flächendeckend modellierte Depositionsdaten für Stickstoff (1*1 km²; wet, dry, occult, gesamt) für das Jahr 2004 zur Verfügung. Für flächige Auswertungen stellt das UBA den gesamten Datensatz für Deutschland bereit. Der Datensatz enthält keine Auflösung auf Kreisebene, konnte aber über GIS-Anwendungen aggregiert werden. Der Datensatz unterscheidet u. a. auch nach Grünland, Wald und Ackerland – letzteres wird für das Projekt Anwendung finden

3.1.4 Bestimmung des Strohpotenzials auf Grundlage der Humusbilanz

Die Gesamtaufwuchsmenge an Getreidestroh eines Landkreises ist abhängig von der Anbaufläche und dem Nebenproduktertrag der Getreideart. Der Strohertrag wird aus dem Ertrag des Hauptproduktes und dem Hauptprodukt-Nebenprodukt-Verhältnis berechnet. Für VDLUFA-Bilanzierung werden dabei die Standardwerte nach Düngeverordnung verwendet [64]. Die Humuseinheitenmethode verwendet bei einigen Getreidearten leicht abweichende Korn-Stroh-Verhältnisse. Aus Untersuchungen der TLL zum damaligen Strohheizwerk in Schkölen wurde deutlich, dass nur 2/3 der gesamten Aufwuchsmenge bei derzeitiger konventioneller Bergetechnik bergbar sind [67]. Etwa 1/3 verbleibt durch Schnitthöhe, Presstechnik und sonstigen Feldverlusten auf den Flächen.

Zunächst wird der Bedarf an Stroh für Einstreu in der Tierhaltung ermittelt. Diese Menge wird aus dem Tierbestand [64], der Weidehaltung [68] und Aufstallungssysteme [63][69][68] sowie den Einstreubedarf für die jeweilige Tiergruppe ermittelt [70]. Letzteres wird einheitlich mit den Werten nach Düngeverordnung versehen [71].

Hat ein Landkreis eine negative Humusbilanz ist sein Strohpotenzial null. Ist die Humusbilanz positiv, wird die Menge des humuswirksamen Kohlenstoff bestimmt, welche dem Kreis bis zu einer ausgeglichenen Humusbilanz (0 kg Humus C) entnommen werden kann. Diesem Wert wird entsprechend dem Reproduktionskoeffizienten von Stroh eine Strohmenge zugeordnet. In Abhängigkeit der Aufwuchsmenge von Stroh in dem betreffenden Landkreis und unter Berücksichtigung des Einstreubedarfes in der Tierhaltung berechnet sich die zusätzlich entnehmbare Menge. So kann die Strohmenge zum einen durch die erntbare Aufwuchsmenge limitiert werden. Zum anderen kann der Humussaldo das Strohpotenzial begrenzen, da ein Teil weiterhin zur Versorgung der organischen

Bodensubstanz benötigt wird. Zusätzlich werden 10 % der berechneten Entnahmemengen einer stofflichen Nutzung zugeschrieben.

Szenariorechnungen

Zur Bewertung der berechneten Potenziale über mittlere Zeiträume werden die Berechnungen unter den Annahmen zu drei Szenarien erstellt. Diese Szenarien haben unmittelbaren Einfluss auf das Überschussstrohpotenzial.

Szenario 1: „Business as usual“

In diesem Szenario wird ein züchterischer Fortschritt unterstellt. Dabei werden die Erträge aller Fruchtarten um 1 % erhöht. Es ist zu erwarten, dass durch diese Entwicklung mehr Koppelprodukte anfallen, welche für die Humusreproduktion bzw. für die energetische Nutzung zur Verfügung stehen. Eine Veränderung der Korn-Strohverhältnisse kann nicht unterstellt werden. Aus fachlicher Sicht ist eine Verengung des Verhältnisses züchterisch kaum noch möglich. Ein höherer Strohanfall wird von den Landwirten nicht angestrebt werden. Seit 1990 haben die auf Stroh basierten Aufstallungen der Rinder- und Schweinehaltung kontinuierlich abgenommen. Wurden 1990 noch 33,8 % der Milchkühe in Deutschland in Ställen mit Einstreu und 66,2 % auf Gülle gehalten, so waren es 2008 nur noch 16 % auf Stroh und ca. 84 % auf Gülle [72]. Für die Rechnung in den Szenarien konnten diese Entwicklungen wegen einer unsicheren Datenbasis nicht umgesetzt werden. Prognosen waren lediglich zur Veränderung des Anteils am Weidegang sowie zur Dauer des Weidegangs vorhanden. Demnach wurde der Anteil von Milchkühen, Färsen und Mutterkühen welche auf der Weide stehen um 10 % auf 23 % verringert. Ebenfalls verändert wurde die durchschnittliche Dauer des Weidegangs. Laut [69] stehen 2020 die Milchkühe 32 Tage weniger, Färsen 2 Tage mehr und Mutterkühe 3 Tage weniger auf der Weide. Aufgrund dieser Veränderung ist zu erwarten, dass geringfügig mehr Einstreu notwendig wird. Andererseits fällt somit mehr humuswirksamer organischer Dünger an, welcher auf die Ackerfläche gelangt.

Szenario 2: „Stroh bekommt einen Wert“

In diesem Szenario wird von einer extrem gesteigerten Nachfrage nach Stroh zur energetischen und stofflichen Verwertung ausgegangen. Es wird davon ausgegangen, dass es zu Neuentwicklungen von Mähdreschern kommt, welche weniger Kurzstroh während des Dreschvorgangs produzieren. Durch diese Innovationen kann der Anteil des bergbaren Getreidestrohs von 66 % auf 90 % erhöht werden. Die durch eine erhöhte Strohabfuhr verschlechterte Humusbilanz kann durch ein Umstellen der Fruchtfolge ausgeglichen werden. Dieser Ausgleich wird durch den vermehrten Anbau von mehrjährigem Ackerfutter wie z. B. Luzerne, Klee oder Feldgras erreicht. Daher wird unterstellt, dass in jedem Landkreis der Anteil der Ackergräser an der Ackerfläche um 5 % auf Kosten des Silomaisanbaus erhöht wird. Wird Silomais nicht auf 5 % der Ackerfläche angebaut, so werden die Ackergräser lediglich um die Silomaisfläche erhöht. Die damit verbundenen ökonomischen Nachteile aufgrund der höheren Kosten von Ackergrassilage gegenüber Maissilage werden durch einen erhöhten Strohpreis ausgeglichen.

Szenario 3: „Extensivierung“

Der Schutz der natürlichen Ressourcen rückt zunehmend in den gesellschaftlichen und politischen Diskurs. Daher unterstellt folgendes Szenario eine verstärkte Ausrichtung agrarpolitischer Instrumente auf den Umweltschutz. Das kann einerseits durch Kulturlandschaftsprogramme geschehen, welche eine Extensivierung bzw. den Erhalt extensiver Bewirtschaftungsformen direkt fördern. Andererseits kann

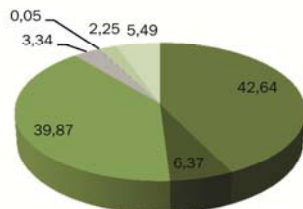
auch eine Verschärfung des geltenden Fachrechtes oder Cross Compliance Regeln eine weniger intensive Bewirtschaftung fordern. Bei extensiver Bewirtschaftung ist im Vergleich mit intensiver Bewirtschaftung immer mit einem geringeren Ertrag zu rechnen. Diese Ertragseinbußen betragen im Szenario 10 % im Vergleich zu den „Ist-Werten“.

Varianten zur differenzierten Bereitstellung von landwirtschaftlichen Energieträgern

Die IST-Analyse zur Strohverfügbarkeit ist Anlass, in vier ausgewählten Kreisen die Nutzungskonkurrenz durch die Erzeugung von landwirtschaftlichen Energieträgern auf das derzeitige Strohpotenzial abzuschätzen. Bei der Auswahl der Referenzkreise wurde nach spezifischen Rahmenbedingungen variiert. Neben den Bewirtschaftungsstrukturen waren speziell für die HE-Methode auch Standortbedingungen (Ackerzahl, Niederschlag) Auswahlkriterien (Abbildung 8). Mit dem Landkreis Vechta ist eine Region mit äußerst hohem Tierbesatz vertreten. Bei ertragsschwachen Sand- und Moorböden, aber hohen Niederschlägen, ist vor allem ein überdurchschnittlich hoher Maisanteil in der Anbaustruktur gegeben. Fast identische Standortbedingungen sind für den Landkreis Roth zu verzeichnen. Die vorwiegend der Milchproduktion dienenden Tierhaltung nimmt hier immerhin noch eine Größenordnung von 1,6 Großvieheinheiten (GVE)/ha ein. Ähnliche Böden sind auch für den Landkreis Uecker-Randow die Produktionsgrundlage. Allerdings fallen die Niederschläge etwas geringer aus. In der Tierhaltung überwiegt die Milchviehhaltung bei einem moderaten Besatz von 0,8 GVE/ha. Auffallend ist hier ein relativ hoher Bracheanteil. Demgegenüber stehen die guten Schwarzerdeböden im Landkreis Sömmerda. Daher ist diese Region von typischen Marktfruchtbetrieben geprägt und verzeichnet einen geringen Tierbesatz.

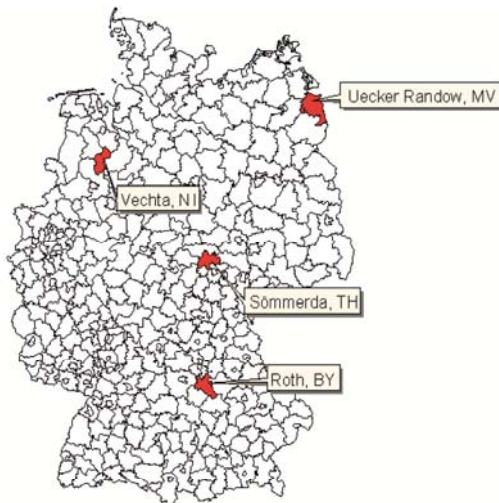
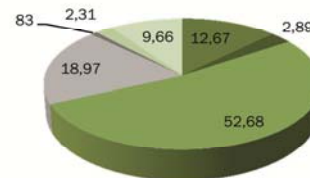
Landkreis Vechta (NI)

Durchschn. Ackerzahl: 35
 jährlicher Niederschlag: 744 mm
 Tierbesatz: 3,9 GV/Bilanzfläche
 Anbaustruktur (in Prozent):



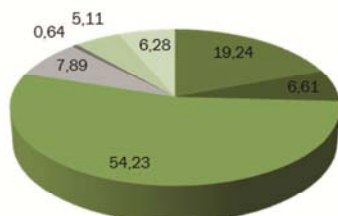
Landkreis Uecker-Randow (MV)

Durchschn. Ackerzahl: 33
 jährlicher Niederschlag: 543 mm
 Tierbesatz: 0,8 GV/Bilanzfläche
 Anbaustruktur (in Prozent):



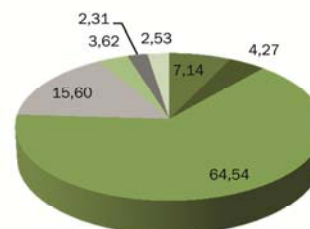
Landkreis Roth (BY)

Durchschn. Ackerzahl: 37
 jährlicher Niederschlag: 738 mm
 Tierbesatz: 1,6 GV/Bilanzfläche
 Anbaustruktur (in Prozent):



Landkreis Sömmerda (TH)

Durchschn. Ackerzahl: 64
 jährlicher Niederschlag: 519 mm
 Tierbesatz: 0,3 GV/Bilanzfläche
 Anbaustruktur (in Prozent):



- Silomais + Körnermais
- Zuckerrübe + Kartoffel
- Getreide
- Raps
- Ackerbohne + Futtererbsen
- Ackergräser
- Brache

Abbildung 8: Standortbedingungen und Bewirtschaftungsstrukturen der Referenzkreise

Untersucht wurde in vier Varianten ein erweiterter Anbau von Energiepflanzen mit unterschiedlichen Nutzungspfaden.

In **Variante 1** stand die Erhöhung der Biokraftstoffe der 1. Generation im Fokus. Energieträger sind hier Biodiesel und Bioethanol. Dazu wurden in den 4 Landkreisen der Rapsanbau um 20 % und der Winterweizenanbau um 10 % erhöht. Allen anderen Kulturarten wurde in Abhängigkeit ihrer realen Flächenanteile die Restfläche zugeordnet.

Variante 2 betrachtete eine erweiterte Biogaserzeugung. Auf 30 % der Ackerfläche sollte zu 70 % Silomais und zu 30 % Getreideganzpflanzensilage (Triticale) produziert werden. Diese Fläche wurde auf Kosten des Getreides verfügbar gemacht. Im Sinne der Humusbilanz wird die anfallende Biogasgülle auf die Fläche des Landkreises rückgeführt. Die Berechnung der Menge erfolgte mit den Faustzahlen der FNR.

Variante 3 stellt eine Alternativversion zu Variante 2 dar. Ziel war es, speziell Humusmehrer zur Biogaserzeugung zu nutzen und damit den Humusbedarf in den Kreisen deutlich zu senken. Statt Silomais wurde demzufolge Klee und für Ganzpflanzensilage Luzerne auf den 30 % der Bilanzfläche angebaut.

In einer **Variante 4** wurde die Auswirkung einer Etablierung von Kurzumtriebsplantagen (KUP) auf 30 % der Ackerfläche unterstellt. Diese können Rohstoff für Heizkraftwerke oder BtL-Verfahren sein. Die Aufteilung der Kulturarten auf der Restfläche blieb entsprechend ihrer realen Anbauverhältnisse konstant.

Innerhalb der Variantenrechnung blieben Daten zum Standort und zur Tierhaltung konstant.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Strohpotenziale in den Landkreisen

Die Darstellung der Ergebnisse beginnt mit der Beschreibung der recherchierten und abgeleiteten Datenbasis. Alle Angaben, soweit nicht anders benannt, beziehen sich auf die Bilanzfläche. Die Bilanzfläche (BF) repräsentiert 95 % der Ackerfläche (AF) im Bundesdurchschnitt.

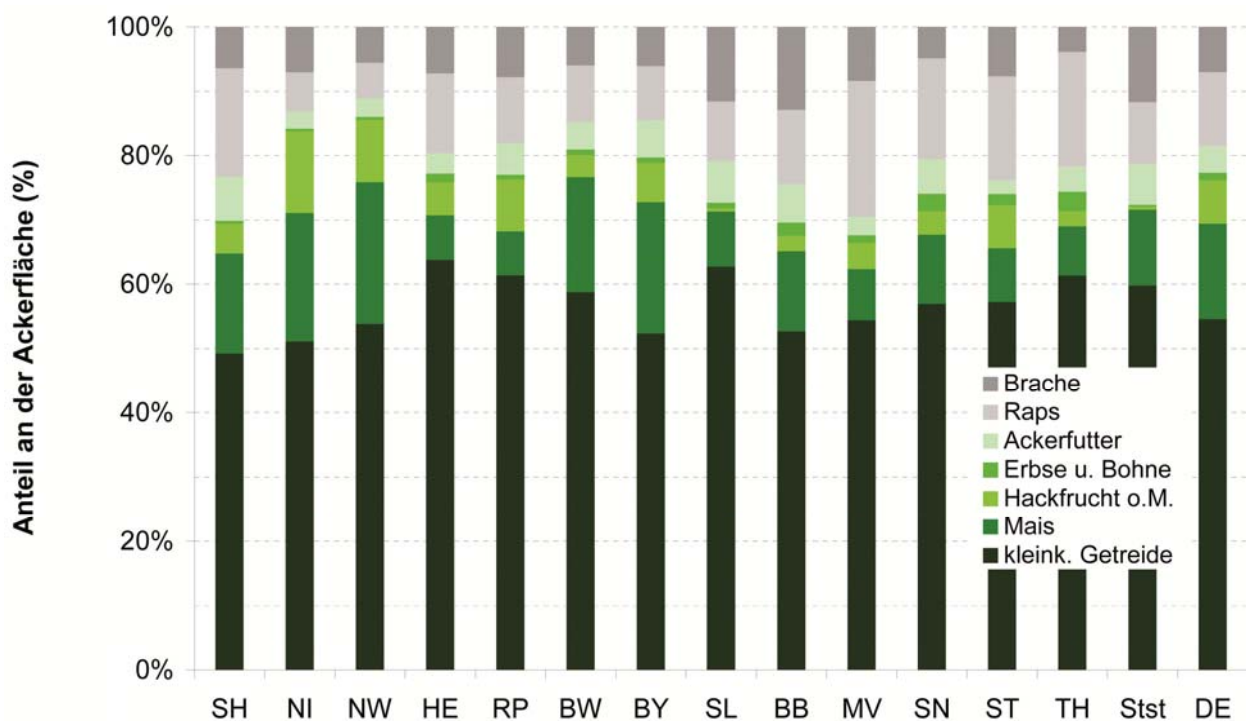


Abbildung 9: Flächenanteile nach Fruchtartengruppen in den Bundesländern im Mittel der Jahre 1999, 2003 und 2007 (%) [61][62]

Abbildung 9 zeigt auf Bundeslandebene zusammengefasste Fruchtartengruppen in ihren Anbauanteilen im Mittel der Jahre 1999, 2003 und 2007. Deutschlandweit ist Winterweizen mit einem Anteil von 24,8 % die dominierende Fruchtart. In den Bundesländern Schleswig-Holstein, Hamburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen liegt der Anteil bei über 30 %. Insgesamt nimmt Getreide außer in Schleswig-Holstein über 50 % der BF ein. Der Körner- und Silomaisanbau beträgt im Mittel des betrachteten Zeitraums in Gesamtdeutschland 15 %. Deutlich über dem Durchschnitt liegen die Anteile in Nordrhein-Westfalen (22 %), Bayern (20,4 %) und Niedersachsen (20 %). Der Kartoffel- und Rübenanteil bewegt sich im Mittel bei 6,4 % mit stark lokalen Konzentrationen in Niedersachsen (z. B. um den Landkreis Uelzen

38,8 %), Nordrhein-Westfalen (z. B. um Landkreis Viersen 37,7 %), Rheinland-Pfalz (z. B. um den Rhein-Pfalz Kreis 45,5 %) und Bayern (z. B. um den Stadt- und Landkreis Straubing 25,8 %). Ackerbohnen und Felderbsen sowie Luzerne-, Klee- und Feldgras spielen von der Anbaufläche her gesehen mit 1,1 bzw. 4,2 % im Bundesdurchschnitt eine vergleichsweise untergeordnete Rolle. Die Produktion von Winterraps konzentriert sich in der Bundesrepublik vor allem auf die Länder Mecklenburg-Vorpommern (21,2 %), Thüringen (17,8 %), Schleswig-Holstein (17 %) und Sachsen-Anhalt (16,2 %). Der Brachflächenanteil beträgt im betrachteten Zeitraum 7 %. Zwischenfrüchte wurden im Mittel der betrachteten Jahre auf 7,8 % der Ackerfläche angebaut. Schwerpunkte liegen in den Ländern Baden-Württemberg (17,5 %), Bayern (16,6 %) und Nordrhein-Westfalen (10,7 %).

In der Abbildung 10 ist die Beziehung zwischen dem Humusbruttobedarf der Landkreise und dem Anteil der Kartoffel- und Rübenanbaufläche an der gesamten Bilanzfläche für die unteren Koeffizienten der VDLUFA-Methode aufgezeigt. Ähnliches ist auch für die anderen Methoden festzustellen, wobei der Verlauf flacher ausfällt.

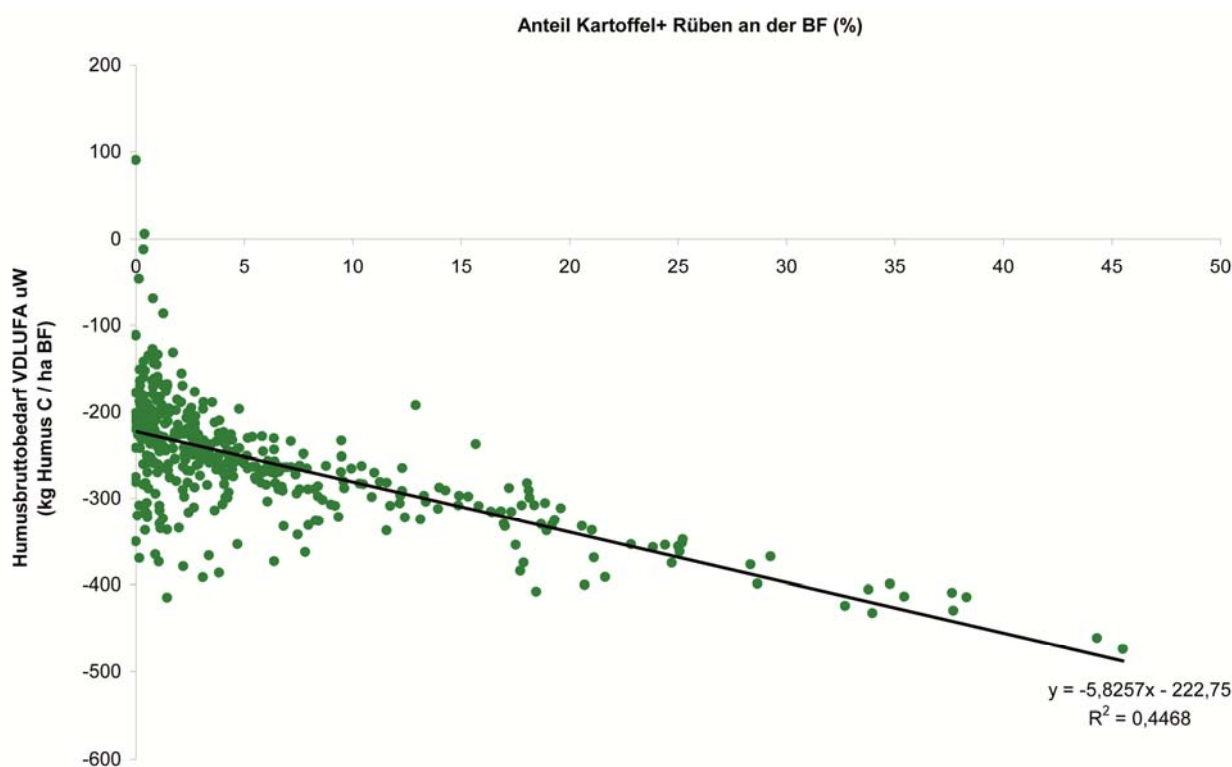
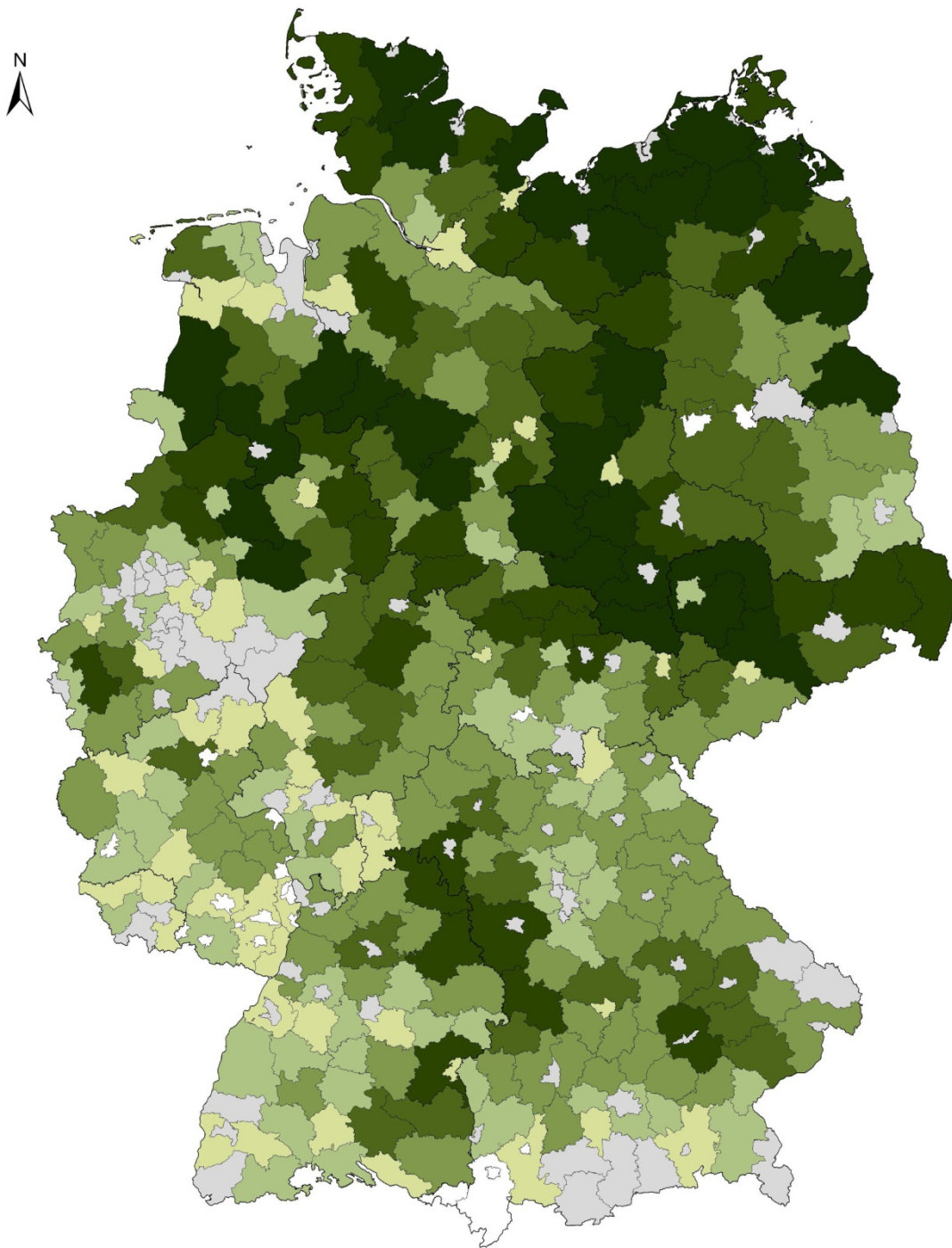


Abbildung 10: Beziehung zwischen Gesamt-Humusbedarf und Anteil von Kartoffel und Rube in der Fruchtfolge

Für die Berechnung der Koppelprodukte und der Anpassung der dynamischen Humuseinheitenkoeffizienten ist der Ertrag von Bedeutung. Im Mittel des betrachteten Zeitraumes haben die Getreidefruchtarten Winterweizen, Sommerweizen, Winterroggen, Wintergerste, Sommergerste, Hafer und Wintertriticale einen bundesweiten Durchschnittsertrag von 60 Dezitonnen (dt_{FM}/ha). Die höchsten Erträge für die untersuchten Getreidefruchtarten werden in Schleswig-Holstein (78,6 dt_{FM}/ha FM), Nordrhein-Westfalen (69,1 dt_{FM}/ha) und Niedersachsen (64,6 dt_{FM}/ha) erreicht. Aus Getreidefläche und Ertragshöhe leitet sich mit Hilfe der Korn-Stroh-Verhältnisse (vgl. [71]) für die jeweiligen Kreise der Gesamtaufwuchs an Stroh als Grundlage des theoretischen Potenzials ab. Im Mittel wachsen in Deutschland 29,8 Mio. t_{FM} Getreidestroh auf, was bezogen auf die Getreidefläche etwa 48 dt/ha ergibt.



Strohaufwuchs auf Landkreisebene in t FM

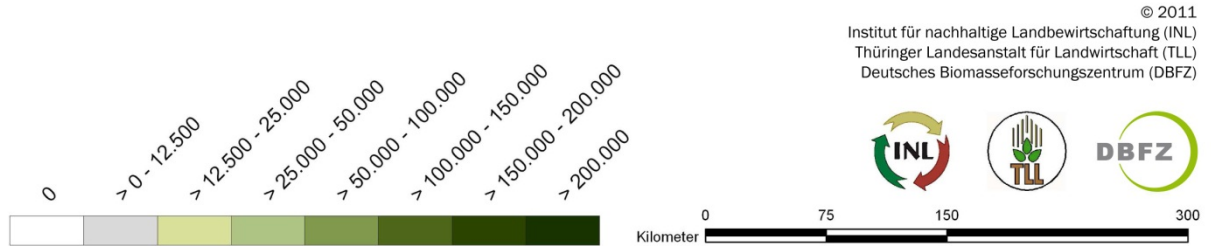


Abbildung 11: Verteilung der Strohmenigen in Deutschland

Der Anfall der Wirtschaftsdünger ist abhängig von den Tierzahlen, der Art, der Kategorie bzw. der Nutzung der Tiere. Die Ausrichtung der Tierproduktion bestimmt die Haltungsform, den Weidegang und die Fütterung. Davon wiederum hängt der technologische bedingte Wassereinsatz ab, welcher entscheidend den TS-Gehalt der Exkremente bestimmt. Den Berechnungen der tierischen Wirtschaftsdünger und der Stroheinstreu liegen deutschlandweit 14,86 Mio. Großvieheinheiten (GVE) zugrunde. In Tabelle 6 ist für die Bundesländer der Tierbesatz unterteilt nach Tierarten in GVE aufgeführt. Hieraus werden beispielsweise starke Konzentrationen der Veredlungsindustrie im Nordwesten und der Milchwirtschaft im Südosten ersichtlich.

Tabelle 6: Tierzahlen und Tierbesatz in den Bundesländern [61][64], (landwirtschaftliche Fläche (LF))

	LF (1000 ha)	BF (1000 ha)	Rinder (GVE)	Schweine (GVE)	Geflügel (GVE)	Schafe (GVE)	Pferde (GVE)	Gesamt (GVE)	GVE/LF	GVE/BF
SH	1.008	623	904.149	191.599	5.878	113.183	46.619	1.261.428	1,3	2,0
NI	2.618	1.767	1.911.686	1.065.356	190.233	69.726	80.132	3.317.134	1,3	1,9
NW	1.503	1.025	933.412	725.548	25.451	42.014	86.048	1.812.474	1,2	1,8
HE	784	467	392.336	104.525	7.330	41.308	34.880	580.380	0,7	1,2
RP	715	372	316.251	36.212	1.903	24.562	21.101	400.029	0,6	1,1
BW	1.436	797	839.412	304.775	23.964	55.796	50.990	1.274.937	0,9	1,6
BY	3.221	2.025	2.794.711	488.182	28.660	110.155	88.560	3.510.268	1,1	1,7
SL	79	37	43.533	2.117	480	3.602	5.461	55.193	0,7	1,5
BB	1.328	952	469.122	103.139	22.202	28.819	18.464	641.747	0,5	0,7
MV	1.354	1.047	450.426	97.768	21.666	26.849	13.994	610.703	0,5	0,6
SN	918	675	362.622	51.248	5.725	27.577	12.212	459.384	0,5	0,7
ST	1.170	959	286.119	125.104	31.624	26.619	7.111	476.577	0,4	0,5
TH	794	593	285.014	95.927	11.529	44.412	8.763	445.645	0,6	0,8
Stst	25	7	13.945	178	12	750	3.645	18.529	0,7	2,6
DE	16.953	11.347	10.002.739	3.391.681	376.657	615.371	477.979	14.864.427	0,9	1,3

Aus dem Tierbesatz ergibt sich die Art und Menge der anfallenden tierischen Wirtschaftsdünger in den Bundesländern (Tabelle 7). Zusätzlich ist der Einsatz von Klärschlamm einbezogen, welcher aus den Statistikzahlen der Länder entnommen wurde [66].

Tabelle 7: Anfall organischer Dünger in den Bundesländern (eigene Berechnungen, [66])

Bundesländer	Bilanzfläche (ha)	Tierischer Wirtschaftsdünger (1000 t _{TM})	Klärschlamm (t _{TM})	Einsatz (t _{TM} / ha)
Schleswig-Holstein	622.762	1.524	61.787	2,55
Niedersachsen	1.767.457	4.295	140.873	2,51
Nordrhein-Westfalen	1.024.584	2.176	101.133	2,22
Hessen	467.457	774	49.641	1,76
Rheinland-Pfalz	372.366	542	63.532	1,63
Baden-Württemberg	797.245	1.745	7.604	2,20
Bayern	2.025.436	4.929	56.712	2,46
Saarland	36.552	73	6.818	2,18
Brandenburg	952.458	886	18.591	0,95
Mecklenburg - Vorpommern	1.047.110	862	32.333	0,85
Sachsen	674.739	635	8.645	0,95
Sachsen-Anhalt	959.386	663	15.701	0,71
Thüringen	592.910	582	17.791	1,01
Stadtstaaten	6900	24	0	3,48
Deutschland	11.347.361	19.710	581.161	1,79

Insgesamt werden die anfallenden organischen Dünger dem Ackerland bzw. der Bilanzfläche zugeschrieben. Da bei der vorliegenden Ermittlung der Humusbilanzen ein Stofffluss zwischen den Landkreisen ausgeschlossen wurde, würden theoretisch in 51 Landkreisen die Stickstofffrachten nach DüV überschritten. Diese Landkreise befinden sich mit Ausnahme einer kreisfreien Stadt in Mecklenburg-Vorpommern in den viehstarken Gebieten Bayerns, Baden-Württembergs, Nordrhein-Westfalens, Niedersachsens und Schleswig-Holsteins. In 45 Kreisen ist, nach Abzug des Stroh zur Einstreu vom bergbaren Stroh, kein bzw. ein negativer Strohsaldo gegeben. Zum einen betrifft dies die Landkreise Rosenheim (-25.329 t), Oberallgäu (-24.675 t) und Ostallgäu (-21.928 t) die einen sehr hohen Grünlandanteil und GV-Besatz aufweisen. Andererseits sind Landkreise mit so genannter Pensionspferdehaltung betroffen, in denen der Viehbesatz komplett oder zu großen Teilen aus Pferden besteht: So ist der Anteil der Pferdehaltung an der Gesamttierhaltung z. B. Landau in der Pfalz (100 %), Speyer (100 %), Worms (80 %) Rheinisch-Bergischer Kreis (21,8 %) und Oberbergischer Kreis (6,2 %) über dem Bundesdurchschnitt von 3 %. Von den 45 Kreisen sind 15 kreisfreie Städte, die teilweise keine statistischen Angaben zum Anbau auf dem Ackerland machen bzw. eine sehr geringe Ackerfläche aufweisen. Dieses Defizit findet bei der Potenzialschätzung für Deutschland keine Beachtung.

Aus dem spezifischen Verhältnis des berechneten Humusbruttobedarfs und der Humusproduktion ergeben sich die Humussalden der Landkreise. Aufgrund fehlender Daten konnten Ergebnisse nur für

397 Kreise nach VDLUFA und 392 Kreise nach dynamischer HE-Methode erarbeitet werden. Die Verteilung der Anzahl der Kreise pro Humusbilanzsaldo je Methode ist in Abbildung 12 dargestellt. Zu erkennen ist ein Anstieg der Häufigkeiten der Bilanzsalden ab 900 HÄq./ha.

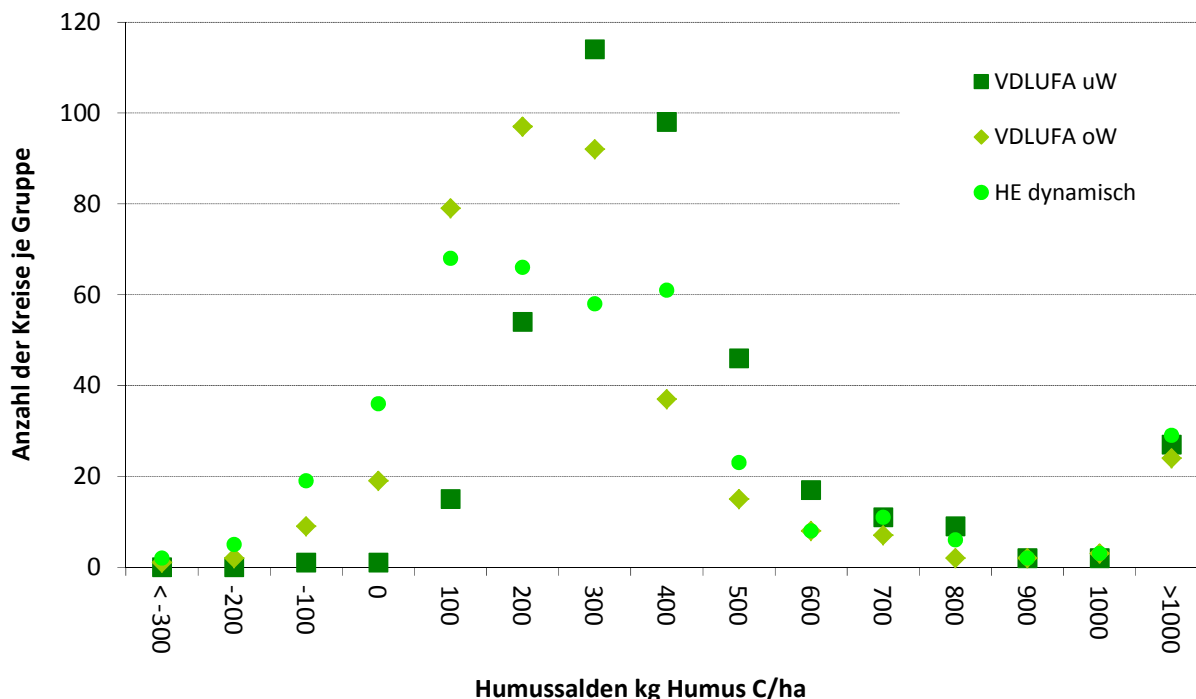


Abbildung 12: Verteilung der Humussalden in Gruppen (Gruppengröße 100 kg Humus C), n = 397

Dieser Anstieg resultiert aus der Festlegung heraus, dass der Landkreis die verwendete Modelleinheit ist. Die mit den Landkreisen verbundenen statistischen Kenndaten und Ableitungen stehen nicht im Ausgleich mit den Nachbarkreisen. Die Kreise mit einer Bilanz von größer 900 HÄq. entfallen, wenn Kreise, bei denen das Verhältnis AF/LF kleiner 30 % ist und Stadtkreise, welche kaum AF vorweisen (< 700 ha) ausgenommen werden. Dadurch reduzieren sich die betrachteten Landkreise geringfügig von 397 auf 364. Die betrachtete BF und GF verringert sich aufgrund der hohen Anzahl von kreisfreien Städten und Landkreisen mit hohem Grünlandanteil lediglich um 1,1 und 0,7 %. Für die Aussagen zu den Ergebnissen der Humusbilanzen soll der daraus resultierende Datensatz mit den in Tabelle 8 dargestellten Kennzahlen im Folgenden genutzt werden.

Werden diese Ergebnisse nach den Bilanzgruppen nach VDLUFA eingeteilt so zeigen sie, dass 0,3 % (VDLUFA untere Werte, uW/ Cross Compliance), 4,1 % (VDLUFA obere Werte, oW) und 8,2 % (HE-Methode) der Landkreise eine Humusunterversorgung (Gruppe A und B) aufweisen. Im Gegensatz dazu sind 95,3 % (VDLUFA untere Werte/Cross Compliance), 69,5 % (obere Werte) und 64,6 % (HE-Methode) in die VDLUFA-Gruppen D und E einzuordnen.

Tabelle 8: Statistische Maßzahlen der Humusbilanzen (Getreidefläche (GF))

Größe	Bilanz VDLUFA _{uW} (Häq./ha)	Bilanz VDLUFA _{oW} (Häq./ha)	Bilanz HE dynamisch (Häq./ha)	GV/BF (GV/ha)	AF/LF (%)	BF (ha)	GF (ha)
Max.	778	658	831	5,35	98	144.138	82.807
Min.	-122	-335	-966	0,00	25	179	118
Mit.	314	185	193	1,21	70	30.828	16.932
Med.	297	177	187	0,97	73	24.081	13.174
n - Kreise	364	364	364	-	-	-	-
Summe						11.221.451	6.163.409

Demnach beträgt im Mittel der Humusbilanzsaldo 314 Häq./ha (uW), 185 Häq./ha (oW) und 193 Häq./ha wenn die dynamische Humuseinheitenmethode zur Anwendung kommt. Für die unteren Werte sind die Landkreise mit dem maximalen Humusbilanzüberschuss pro Hektar Wittmund (778 Häq./ha), Hochsauerlandkreis (765 Häq./ha) und Altenkirchen/Westerwald (730 Häq./ha). Die niedrigsten Salden nach VDLUFA unteren Werten werden für den Rhein-Pfalz-Kreis (-122 Häq./ha), Uelzen (-35 Häq./ha) und Neuburg-Schrobenhausen (11 Häq./ha) berechnet. Für die Humusbilanzen nach VDLUFA oberen Werte ändern sich die Bilanzsalden jedoch nicht die betroffenen Landkreise für die Extremwerte. Die Landkreise mit den höchsten Bilanzsalden sind demnach der Hochsauerlandkreis (658 Häq./ha) Wittmund (644 Häq./ha) Altenkirchen/Westerwald (620 Häq./ha). Die niedrigsten Salden ergeben sich analog den unteren Werten im Rhein-Pfalz-Kreis (-335 Häq./ha), Uelzen (-234 Häq./ha) und Neuburg-Schrobenhausen (-149 Häq./ha). Nach der dynamischen HE-Methode werden teilweise andere Landkreise mit Extremwerten ausgewiesen. Die höchsten Salden finden sich in Traunstein (831 Häq./ha), Wittmund (814 Häq./ha) und Altenkirchen/Westerwald (791 Häq./ha). Die negativsten Bilanzsalden werden in den Kreisen Schaumburg (-966 Häq./ha), Verden (-582 Häq./ha) und Uelzen (-254 Häq./ha) berechnet.

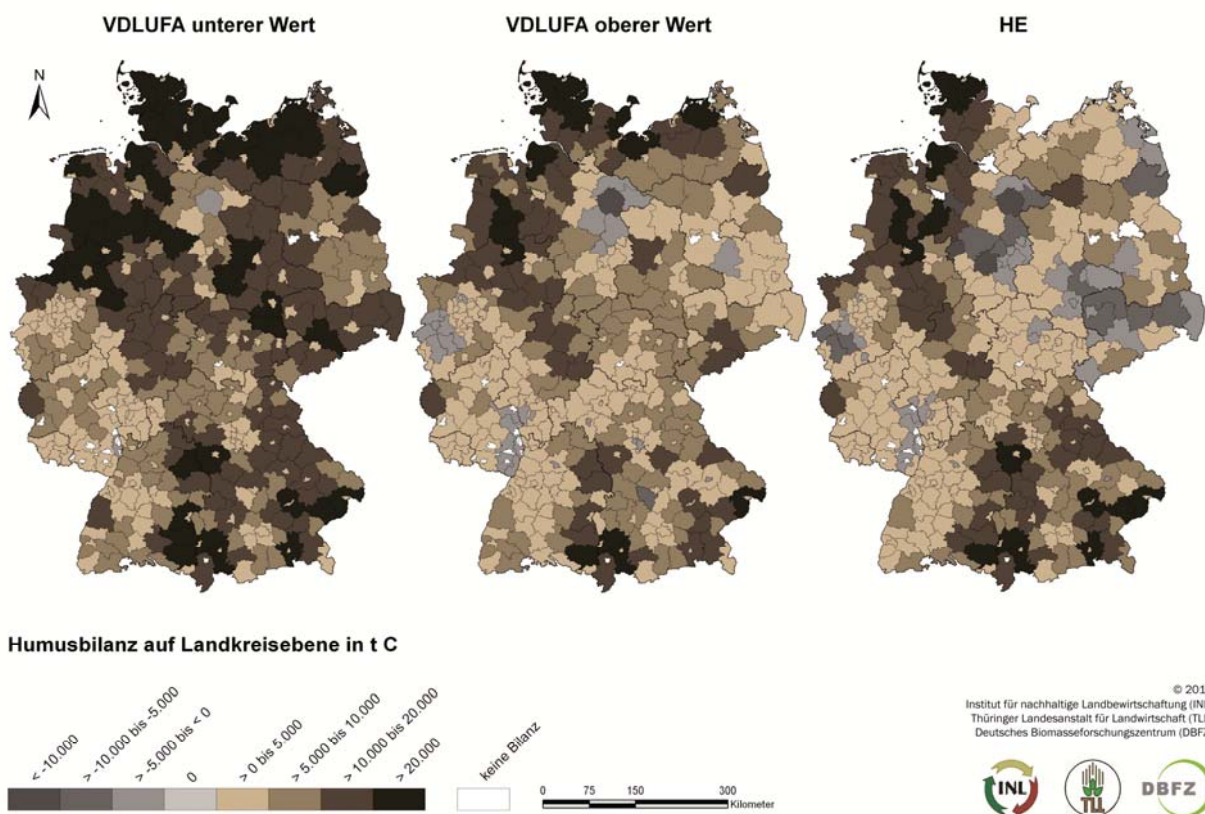


Abbildung 13: Humussalden auf Landkreisebene nach verschiedenen Bilanzmethoden

Die Ergebniskarten der Humusbilanzen zeigen, dass die Regionen mit hohem GVE-Besatz hohe Humusüberschüsse ausweisen (Abbildung 13). Im Gegensatz zu den Ergebnissen nach VDLUFA untere Werte/Cross Compliance führt nach VDLUFA obere Werte und nach HE-Methode eine hohe Konzentration von Kartoffeln und Rüben in der Fruchtfolge zu negativen Salden in den entsprechenden Landkreisen. Weiterhin wird in Abbildung 14 der geringe Einsatz tierischer Wirtschaftsdünger sowie die daraus resultierende Abhängigkeit von der Strohdüngung zum Humusersatz in den vielschwachen Gebieten deutlich.

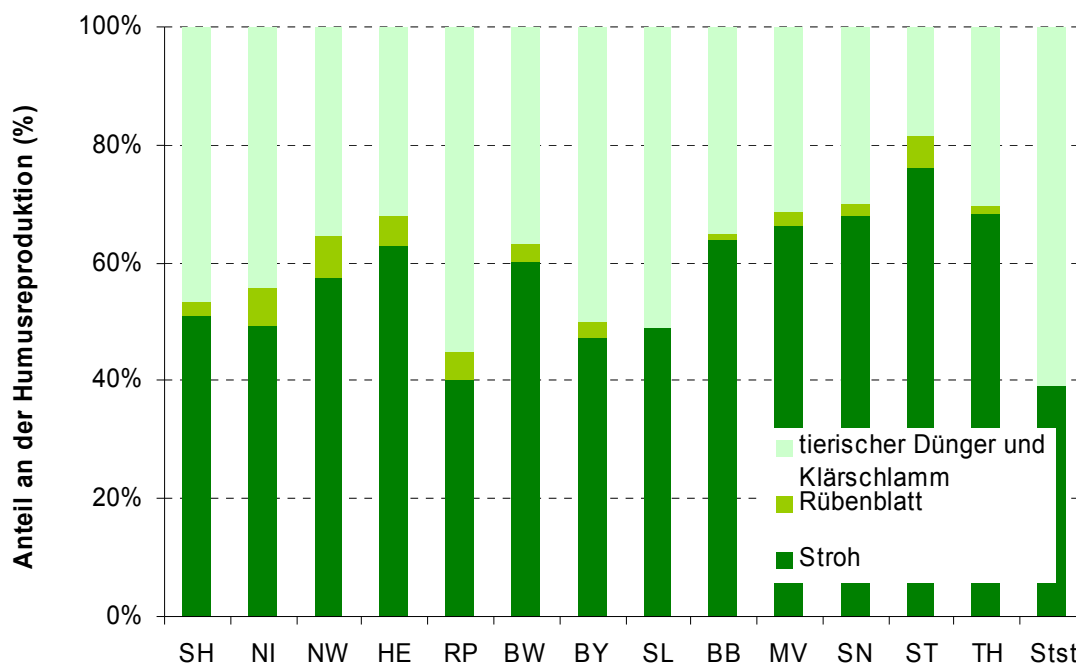


Abbildung 14: Anteil der organischen Dünger an der Humusproduktion für die Bundesländer in % bei einer Humusproduktion von 100 kg Humus C je t Stroh

Aus Strohverfügbarkeit und methodisch bestimmter Humusbilanzierung können die Strohpotenziale der Landkreise dargestellt werden (Abbildung 15). Nach den unteren Bedarfskoeffizienten der VDLUFA ergibt sich ein Gesamtpotenzial von 13 Mio. t Frischmasse. Diese Menge entspricht etwa 44 % des total aufgewachsenen Getreidestrohs. Bei einem mittleren Heizwert von 14,3 MJ/kg Getreidestroh FM ergibt sich daraus ein Energiepotenzial von 186 PJ. Die Humusbilanzen wirken lediglich zu 9 % als limitierender Faktor. Die höchsten Potenziale finden sich nach dieser Methode in den Landkreisen Börde (244.000 t_{FM}), Nordwestmecklenburg (225.000 t_{FM}) und Ostholstein (200.000 t_{FM}). Bezogen auf die Getreidefläche werden Spitzenwerte in den Landkreisen Ostholstein (39,9 dt_{FM}/ha), Hildesheim (36,2 dt_{FM}/ha) und Salzgitter Stadt (36,2 dt_{FM}/ha) erreicht. In 52 Landkreisen kann kein Getreidestrohpotenzial ausgewiesen werden.

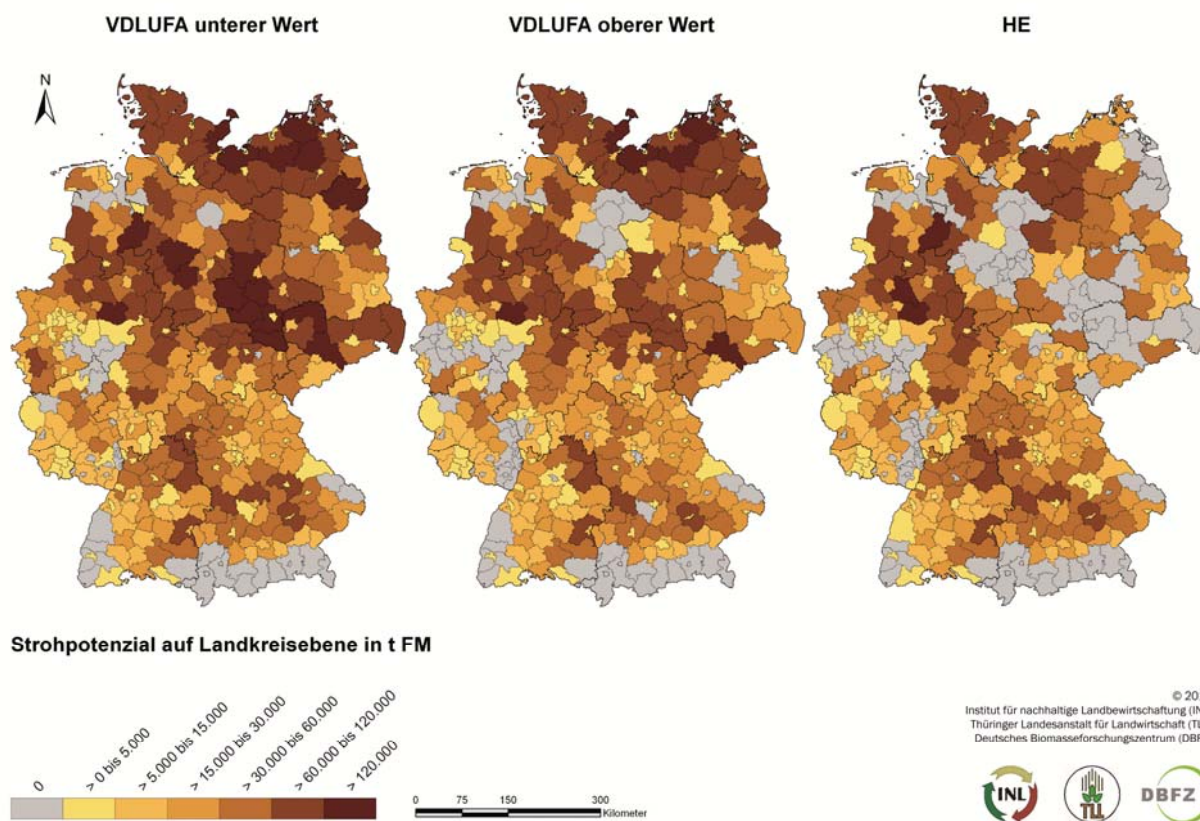


Abbildung 15: Nachhaltiges Strohpotenzial nach verschiedenen Humusbilanzmethoden (Mittelwert 1999-2007)

Werden die oberen Bedarfswerte der VDLUFA verwendet, verringert sich die potenzielle Strohmenge zur energetischen Nutzung auf 10 Mio. t FM. Damit wäre jedoch immer noch ca. 1/3 des aufgewachsenen Getreidestrohs nutzbar. Diese Menge entspricht einem Energiegehalt von 143 PJ. Die Humusbilanzen wirken hier bei 38 % der Landkreise limitierend. Die höchsten Potenziale finden sich nach dieser Methode in den Landkreisen Nordwestmecklenburg (211.000 t_{FM}), Ostholstein (200.000 t_{FM}) und Nordvorpommern (176.000 t_{FM}). Relativ zu der Fläche auf denen die betrachteten Getreidearten angebaut werden, können die größten Potenziale in Ostholstein (39,9 dt_{FM}/ha), Plön (34,9 dt_{FM}/ha) und dem Herzogtum Lauenburg (32,9 dt_{FM}/ha) beobachtet werden. Die Anzahl der Kreise, in denen kein Potenzial zur Verfügung steht, erhöht sich auf 81. Die nutzbare Strohmenge reduziert sich weiter, wenn die HE-Methode verwendet wird. In Summe sind nur noch 8 Mio. t FM Getreidestroh entnehmbar. Dieser Wert entspricht in etwa 27 % des total aufgewachsenen Strohs und 114 PJ. Die Humusbilanzen sind bei der dynamischen HE-Methode zu 32 % der limitierende Faktor. In diesem Fall sind die Landkreise mit den höchsten absoluten Strohmenge die Landkreise Diepholz (140.000 t_{FM}), Soest (133.000 t_{FM}) und Warendorf (120.000 t_{FM}). Relativ zur Getreidefläche sind die höchsten Hektarpotenziale in Soest (33,4 dt_{FM}/ha), Herford (33,2 dt_{FM}/ha) und Unna (32,9 dt_{FM}/ha). Insgesamt werden 109 Landkreise ohne überschüssiges Getreidestroh ausgewiesen. Statistische Maßzahlen zu den Strohpotenzialen sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Statistische Maßzahlen der Strohpotenziale

Größe	Bilanz VDLUFA _{uw} (t _{FM})	Bilanz VDLUFA _{ow} (t _{FM})	Bilanz HE dynamisch (t _{FM})	Stroh _{uw} /GF (dt _{FM} /ha)	Stroh _{ow} /GF (dt _{FM} /ha)	Stroh HE/ GF (dt _{FM} /ha)
Max.	244.354	211.076	139.608	39,9	39,9	34,2
Min.	0	0	0	0	0	0
Mittelwert	33.375	24.922	20.313	18,5	14,2	13,3
Med.	16.977	12.822	8.454	19,8	14,5	14,6
Kreise (n)	397	397	392			
Summe	13.252.000	9.898.000	7.965.000			

Werden die korrigierten Humusbilanzen (n = 364) zur Potenzialableitung verwendet, ergibt das für Gesamtdeutschland bei allen 3 Methoden einen um 12.000 t_{FM} Stroh reduziertes Potenzial. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die größten Strohpotenziale bei allen drei verwendeten Methoden im Osten Schleswig-Holsteins und im Nordwesten Mecklenburg-Vorpommerns vorzufinden sind. Ebenfalls hohe Strohpotenziale sind im nördlichen Teil Nordrhein-Westfalens bis hinein ins angrenzende Niedersachsen vorhanden. Drastische Unterschiede zwischen den Methoden zeigen sich für weite Gebiete Sachsens und Sachsen-Anhalts. Nach beiden VDLUFA-Methoden werden hohe bis sehr hohe Potenziale ausgewiesen, wohingegen nach der dynamischen HE-Methode kaum bzw. kein Strohpotenzial vorhanden ist, da dieses zur Humusreproduktion notwendig ist. Kennzahlen zu den Bundesländern sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Getreidestrohaufwuchs und -potenzial in den einzelnen Bundesländern

BL	Getreidestrohaufwuchs		Strohpotenzial VDLUFA _{uw}		Strohpotenzial VDLUFA _{ow}		Strohpotential HE-Methode	
	(1000 t _{FM})	(dt _{FM} /ha GF)	(1000 t _{FM})	(dt _{FM} /ha GF)	(1000 t _{FM})	(dt _{FM} /ha GF)	(1000 t _{FM})	(dt _{FM} /ha GF)
SH	1.908	62,2	904	29,5	904	29,5	610	19,9
HH	13	50,6	4	15,6	4	15,6	0	0,0
NI	4.649	51,5	1.952	21,6	1.196	13,2	945	10,5
HB	4	48,4	1	12,1	1	12,1	0	0,0
NW	3.014	54,6	1.407	25,5	1.166	21,1	1.219	22,1
HE	1.508	50,5	660	22,1	605	20,3	634	21,2
RP	990	43,3	367	16,1	248	10,9	247	10,8
BW	2.116	45,2	816	17,4	699	14,9	832	17,8
BY	4.707	44,4	1.828	17,2	1.509	14,2	1.828	17,2
SL	96	41,9	32	14,0	32	14,0	33	14,4
BE	3	41,1	1	13,7	1	13,7	0	0,0
BB	1.807	36,0	759	15,1	471	9,4	439	8,8
MV	2.839	49,8	1.417	24,9	1.245	21,9	509	8,9
SN	1.701	44,3	810	21,1	470	12,2	87	2,3
ST	2.689	49,0	1.415	25,8	664	12,1	271	4,9
TH	1.787	49,2	879	24,2	683	18,8	311	8,6
DE	29.832	48,0	13.252	21,3	9.898	15,9	7.965	12,8

3.2.2 Szenarienrechnungen

Im ersten Szenario erhöhen sich die Potentiale gegenüber dem Basisszenario um 1 % VDLUFA untere Werte, 3 % VDLUFA obere Werte und um 2,4 % bei der Humusbilanzierung nach der HE-Methode. Die Humusbilanzen im Basisszenario sind leicht positiv, begründet durch einen höheren Anteil der organischen Dünger. Der leicht gestiegene Einstreubedarf wird durch den erhöhten Aufwuchs von 1% Getreidestroh kompensiert. Das Getreidestrohpotential bleibt konstant bzw. erhöht sich bis 2020.

Nach den Annahmen zum zweiten Szenario erhöhen sich die Potentiale um 45,9 % VDLUFA untere Werte, 62,7 % VDLUFA obere Werte und 53,2 % bei der HE-Methode. Die Humusbilanzen sind nach allen Methoden im Szenario 2 höher als im Basisszenario. Die alleinige Veränderung der technologischen Rahmenbedingungen führt zu einer Potentialerhöhung des Getreidestrohs um 40 % VDLUFA untere Werte, 24,3 % VDLUFA obere Werte und zu 40 % nach Berechnungen mit der HE - Methode. Eine alleinige Ausdehnung des Ackergrasanbaus führt demnach zu einer Erhöhung des Potentials um 1 % VDLUFA untere Werte, 21 % VDLUFA obere Werte und 11 % dynamische HE-Methode.

Im dritten Szenario verändern sich die Strohpotenziale um -14,4 % VDLUFA untere Werte, -26,7 % VDLUFA obere Werte und -2,2 % dynamische HE-Methode. Die absoluten Veränderungen sind in Abbildung 16 dargestellt. Die Humusbilanzen verschlechtern sich entsprechend der verminderten Stroh- und Gründüngung.

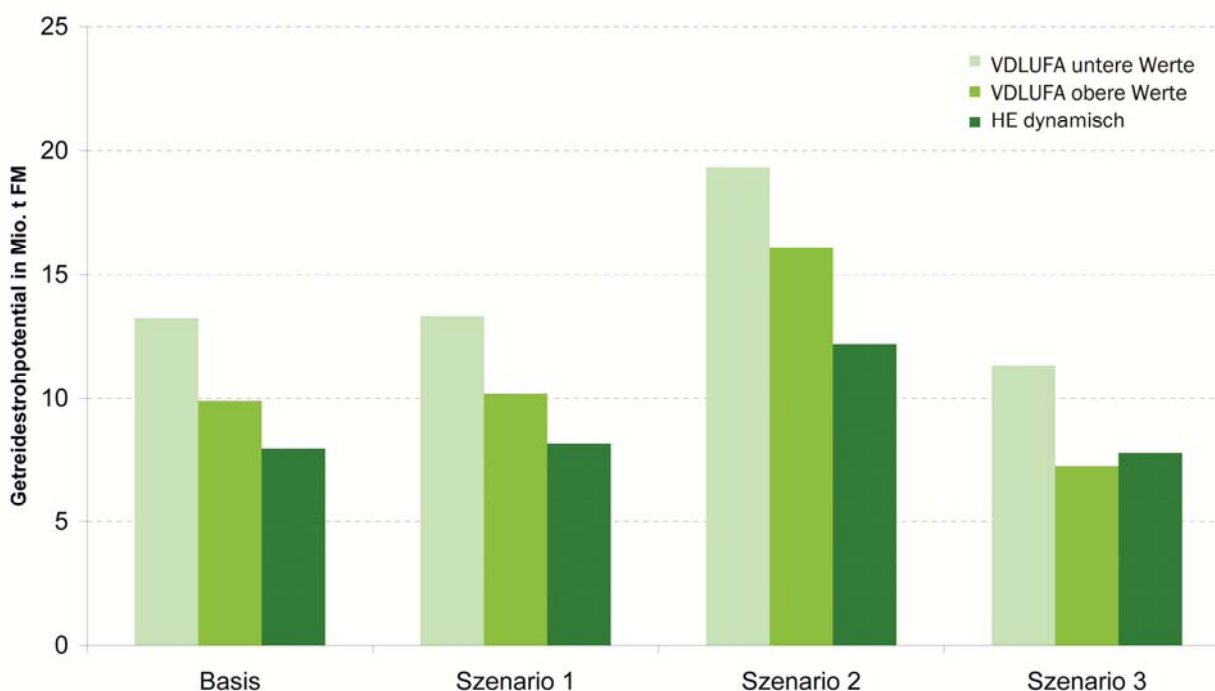


Abbildung 16: Ergebnisse der Szenarienrechnungen zum Getreidestrohpotential in Mio. t_{FM}

Die Szenarienrechnungen zeigen, dass eine technische Weiterentwicklung der Erntetechnik mittelfristig die größten Strohpotenziale erwarten lässt. Durch derartige Innovationen würde sich das theoretisch bergbare Getreidestroh von 20 Mio. t FM auf 27 Mio. t FM erhöhen. Das Szenario 2 zeigt außerdem, dass diese Entwicklungen nur in Verbindung mit Humusersatzmaßnahmen nachhaltig sind. In diesem

Fall müssen die Aufwendungen für einen entsprechenden Humusersatz wie etwa die Umstellung der Fruchtfolge oder Kompostanwendung durch den Strohpreis gedeckt sein (vgl. 6.3).

3.2.3 Variantenrechnungen in ausgewählten Landkreisen

Variante 1

Die Erhöhung der Raps- und Weizenanteile auf Kosten aller anderen Kulturarten in den Referenzkreisen führt nicht zwangsläufig zu einer Steigerung des Strohanfalls. Da die Kreise hauptsächlich von Getreideanbau geprägt sind, sorgt in der Regel der gesteigerte Rapsanbau zu verringertem Strohaufkommen. Nur in Kreisen mit geringem Getreideanteil, wie in Vechta, wirkt sich ein höherer Weizenanteil positiv auf das Strohaufkommen aus.

Differenziert sind die Auswirkungen auf den Humussaldo in Abhängigkeit der Bilanzmethode zu betrachten (Abbildung 17). In beiden VDLUFA-Methoden führen ein Anbaurückgang der stark zehrenden Hackfrüchte und die Ausweitung der Ölpflanzen- und Getreidefläche (mit einheitlich günstigeren Koeffizienten) zu einem höheren Humussaldo. Die gleichfalls stattfindende Reduktion der Humusmehrerfläche fällt aufgrund ihres geringen Ausgangsverhältnisses dabei kaum ins Gewicht. Dem stehen die Bilanzsalden der dynamischen HE-Methode gegenüber. Die Humuszehrung wird hier für Weizen und Raps höher eingestuft als bei anderen Getreidearten und Silomais. Daher erhöht sich mit ihren Anteilen an der Fruchtfolge auch der ausgewiesene Humusbruttobedarf und der Saldo verringert sich demzufolge.

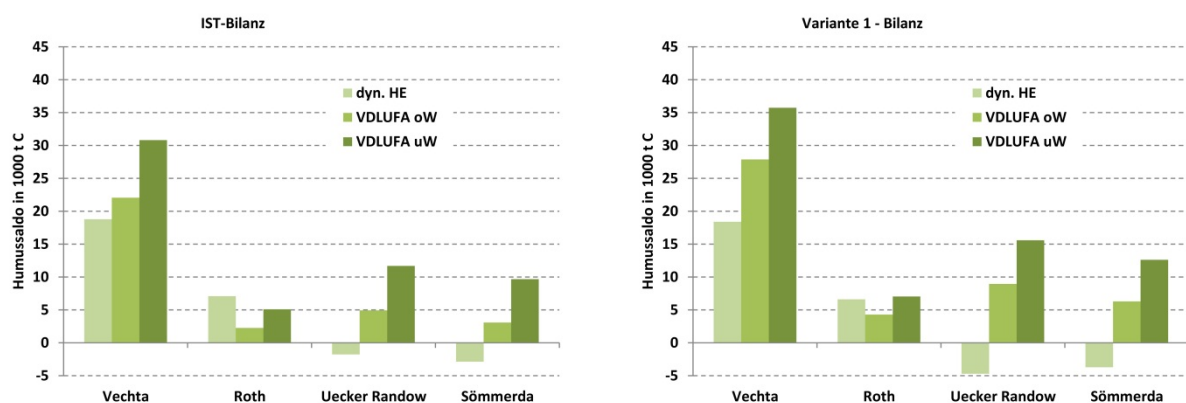


Abbildung 17: Änderung der Humussalden in den Referenzkreisen bei gesteigerten Raps- und Weizenanbau

So ist vor allem die Humusbilanz in dieser Variante bestimmend für die Änderungen in den Strohpotenzialen der Kreise (Abbildung 18). Ein vermehrter Anbau von Raps und Weizen für Biodiesel bzw. -ethanol erhöht bei Bilanzierung nach VDLUFA das Strohpotenzial, wenn in diesen Kreisen die Humusbilanz ursprünglich der limitierende Parameter ist. Mit der HE-Methode wird die Begrenzung der Strohentnahme durch den Humussaldo eher verstärkt. Die Erhöhung des Potenzials durch höhere Anfallmengen bei positiven Humussalden stellt eine Ausnahme dar. Insgesamt ist in dieser Variante durch vermindertes Strohaufkommen von einer Reduzierung des Strohpotenzials auszugehen. Nur in wenigen Kreisen kann ein vom Humushaushalt bestimmtes Potenzial leicht erhöht werden.

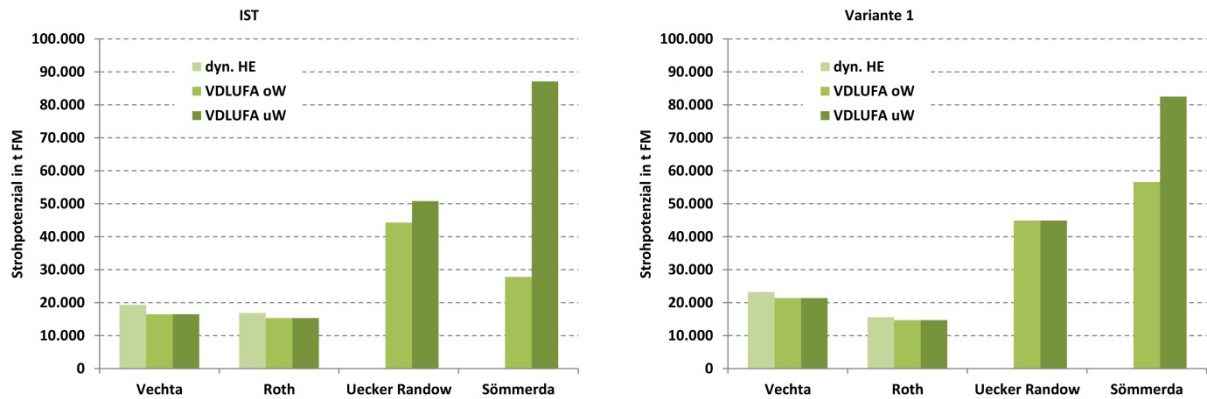


Abbildung 18: Auswirkungen eines erweiterten Raps- und Weizenanbaus auf berechnete Strohpotenziale

Variante 2

Im Gegensatz zu Variante 1, wo bei gesteigertem Weizenanbau gleichzeitig auch mehr Stroh anfällt, wird bei Silomais und Getreideganzpflanze (GPS) die gesamte oberirdische Masse geerntet und siliert. Dadurch verringert sich in den Kreisen das Strohaufkommen enorm. Es kann von einer Halbierung (Getreideanteil in der Ausgangssituation schwankt etwa zwischen 60 % und 70 %) des Strohaufwuchses ausgegangen werden.

Die Tatsache einer höheren Konzentration von Silomais in der Fruchtfolge auf Kosten von Getreide, führt mit den Koeffizienten nach VDLUFA zu höherem Humusbedarf (Abbildung 19). Dieser kann auch nicht durch die Rückführung der Biogasgülle im Vergleich zur Ausgangssituation kompensiert werden. Demzufolge sinken in dieser Variante die Humussalden nach Methodik der VDLUFA. In der dynamischen HE-Methode halten sich ein veränderter Humusbedarf und eine zusätzliche Reproduktion durch den Einsatz entstehende Biogasgülle das Gleichgewicht, so dass es nur marginale Änderungen im Saldo zur IST-Bilanz gibt.

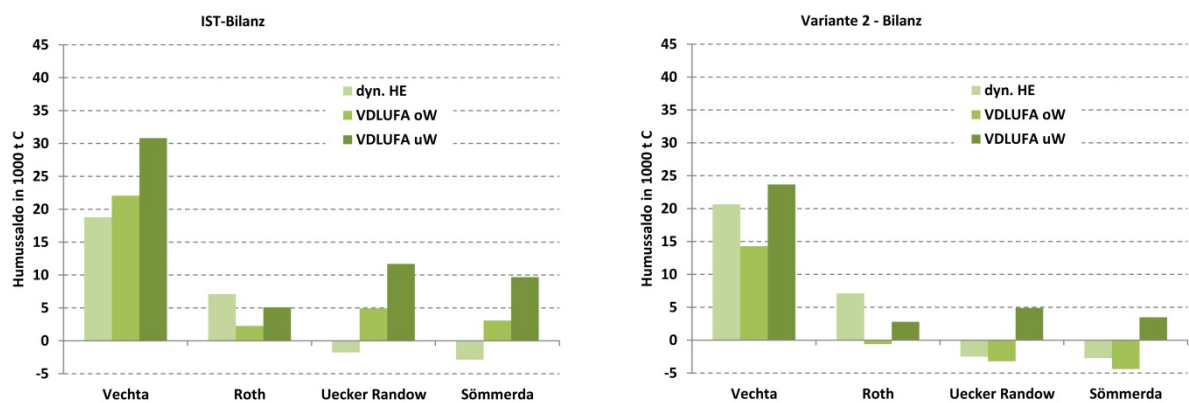


Abbildung 19: Auswirkung erhöhter Biogasferzeugung durch erweiterten Anbau von Silomais und GPS auf Humussalden

Entscheidend für die Strohpotenziale ist daher das Zusammenspiel beider Veränderungen (Abbildung 20). Zum einen reicht der Anfall an Stroh nicht mehr für einen nutzbaren Restbestand, wie in den Landkreisen Vechta und Roth, aus. Zum anderen limitierte nun ein niedriger Humussaldo die nachhaltig erntbare Strohmenge, wie in den Landkreisen Uecker-Randow und Sömmerda ersichtlich wird. Nur die Bilanz mit den unteren Werten der VDLUFA weist in letzteren Landkreisen Potenziale auf. Als Fazit

lässt sich eine starke Konkurrenz ertragreicher Biogassilagen zur energetischen Nutzung von Stroh erkennen.

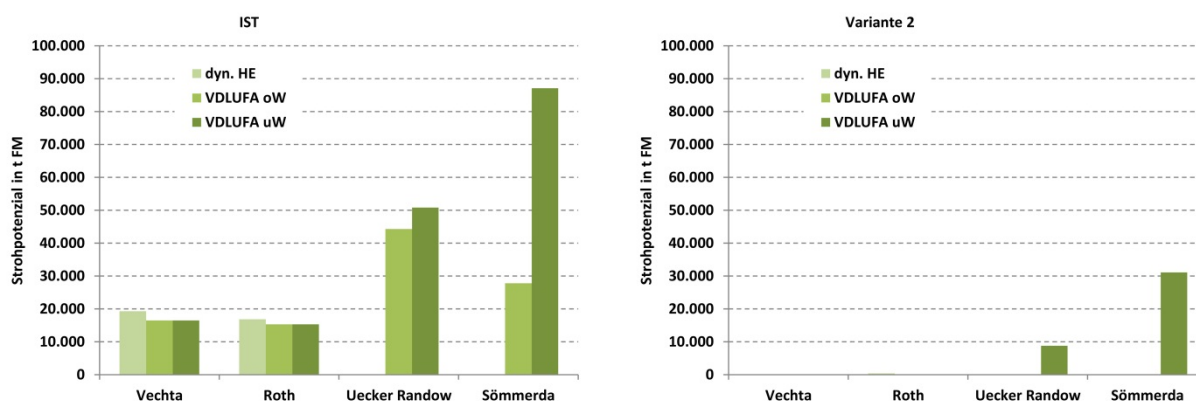


Abbildung 20: Veränderungen der Strohpotenziale bei Ausweitung des Anbaus von Silomais und GPS

Variante 3

Analog zu Variante 2 führte die Änderung in der Anbaustruktur zur Reduktion des insgesamt aufgewachsenen Strohs.

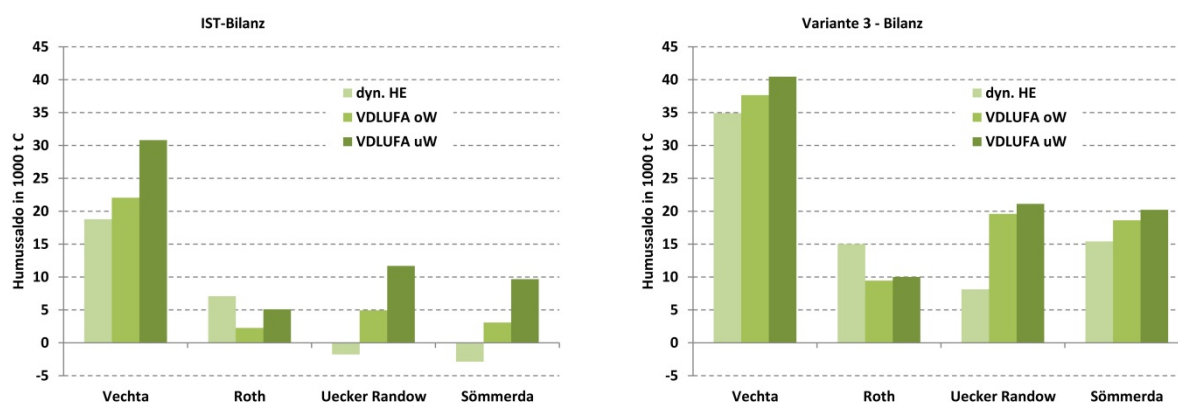


Abbildung 21: Auswirkung eines verstärkten Anbaus von Luzerne und Klee auf die Humusbilanz

Deutlich positiv wirkt sich erwartungsgemäß ein um 30 % gestiegener Anteil von Humusmehrern auf den entsprechenden Saldo aus (Abbildung 21). Zusätzlich werden ebenfalls die entstehenden Biogasgülle über organische Düngung in den Bilanzen berücksichtigt. Somit sind für alle Bilanzmethoden höhere Salden festzustellen. Mit der dynamischen Humuseinheitenmethode können daher auch für die Landkreise Uecker-Randow und Sömmerda positive Salden ausgewiesen werden.

Die sich in dieser Variante ableitenden Potenziale differenzieren in ihrer Veränderung zur Ausgangssituation (Abbildung 22). Wie schon in der vorangegangenen Variante, sind durch Reduzierung im Anbauumfang von Getreide für die Landkreise Vechta und Roth keinerlei Strohmenge mehr zur energetischen Verwertung frei. In den anderen beiden Kreisen ist die Anfallsmenge ebenfalls begrenzt. Allerdings stehen auch bei einer Bilanz nach HE-Methode diese Restmengen vollständig für die Nutzung bereit. Somit ist diese Variante für Flächenbewirtschaftung mit negativen oder für die Strohnutzung limitierende Humussalden interessant. Mit dem Anbau von Ackerfutterpflanzen und der Biogaserzeugung können bedeutende Strohmenge nachhaltig nutzbar gemacht werden.

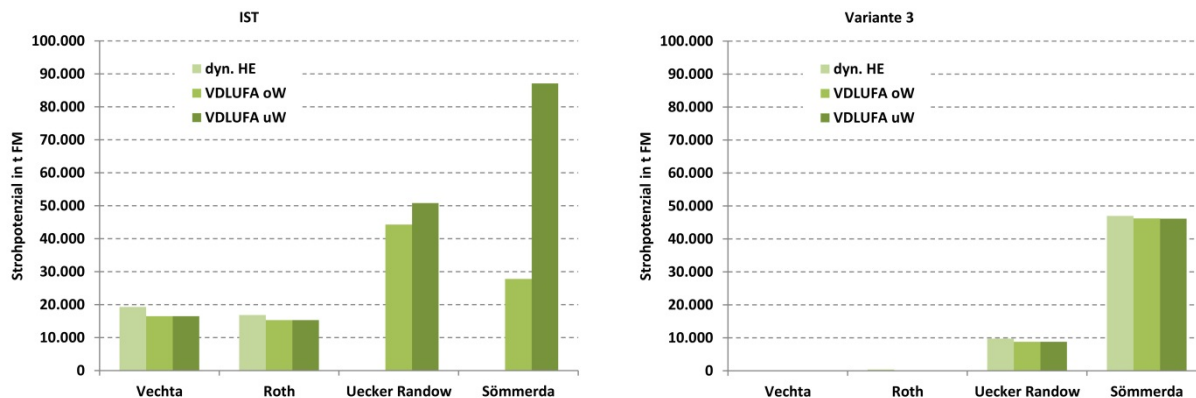


Abbildung 22: Änderungen in den Strohpotenzialen bei erhöhtem Luzerne- und Kleeanbau

Variante 4

In dieser Variante kommt es zur Reduktion der aufgewachsenen Strohmenge um ein Drittel. Änderungen in den Humussalden sind unabhängig der Bilanzmethode nur marginal (Abbildung 23). Unterschiede werden nur in den Landkreisen mit ausgeprägter Tierhaltung sichtbar. Aufgrund der um 30 % verringerten Bilanzfläche verteilen sich die anfallenden organischen Dünger ebenfalls auf einer kleineren Fläche. Dies hat dann höhere Salden zur Folge.

Die reduzierten Aufwuchsmengen von Stroh wirken bei der Bilanzierung nach VDLUFA für eine energetische Reststoffverwertung vorwiegend limitierend (Abbildung 24). Es steht weniger Stroh zur Verfügung als auf Basis des Humussaldos theoretisch von den Flächen abgefahren werden kann. Nach der HE-Methode ist dagegen hauptsächlich der Humussaldo der begrenzende Faktor. Allerdings zeigt das Beispiel Uecker-Randow, dass durch leicht höhere Salden auch Strohmenge erschließbar werden. Schlussfolgernd kann für eine erweiterte Nutzung von Kurzumtriebsplantagen festgehalten werden, dass damit insgesamt weniger energetisch nutzbares Stroh bereitsteht. Nur Landkreise, in denen der Humussaldo in der Ausgangssituation limitierend wirkte, können unter Umständen höhere Potenziale vorweisen. Diese fallen aber eher gering aus (vgl. 3.2.1).

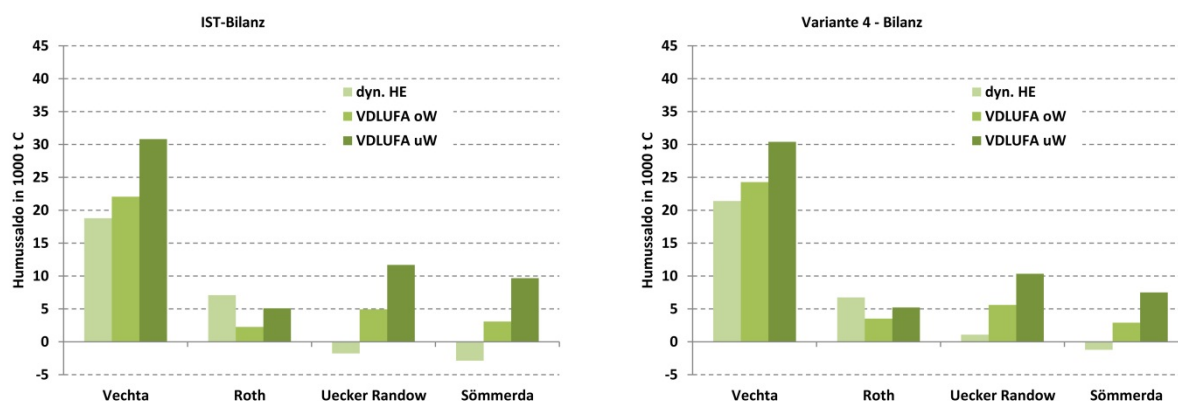


Abbildung 23: Auswirkungen einer verstärkten Etablierung von Kurzumtriebsplantagen auf den Humussaldo

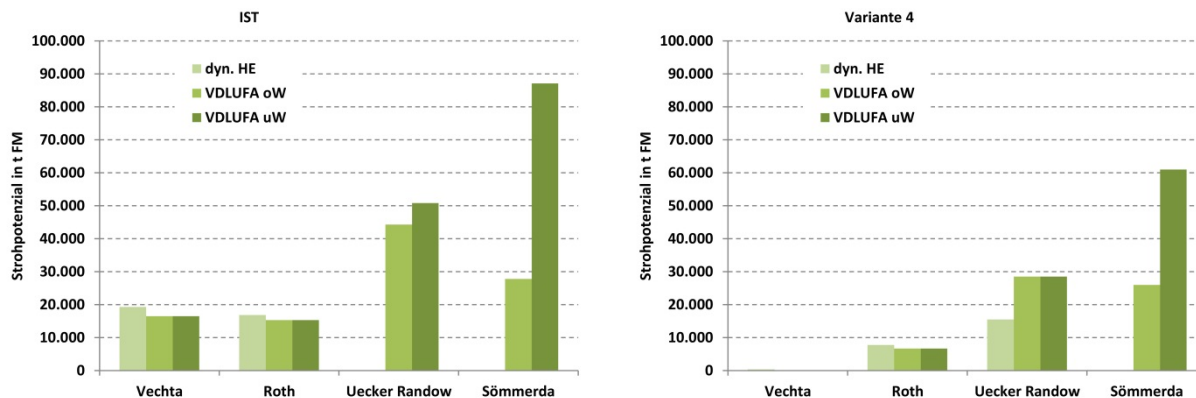


Abbildung 24: Auswirkung einer verstärkten Etablierung von Kurzumtriebsplantagen auf bestehende Strohpotenziale

3.3 Diskussion

Die Ergebnisse zu den Strohpotenzialen stehen in enger Beziehung zur Datengrundlage. So werden Anbau- und Erntedaten aus 3 Jahren verwendet. Zusätzlich ist in den Daten beispielsweise der Getreideanbau zur Ganzpflanzensilage nicht berücksichtigt. Dieser betrug im Jahr 2010 rund 73.000 ha. Bezüglich der Veränderungen in der Anbaustruktur, kann festgestellt werden, dass diese nur langsam von statten gehen. Die Erträge sind jedoch stark von den jeweiligen Witterungseinflüssen in den Jahren abhängig. Das Jahr 2003 zählte beispielsweise als ein ausgesprochenes Trockenjahr, indem starke Ertragsverluste zu verzeichnen waren. Demzufolge variierte hier der Strohaufwuchs regional unterschiedlich stark. Die Abbildung 25 gibt einen Ausblick inwieweit diese Extremereignisse auf den Strohertrag und die resultierenden Potenziale wirken.

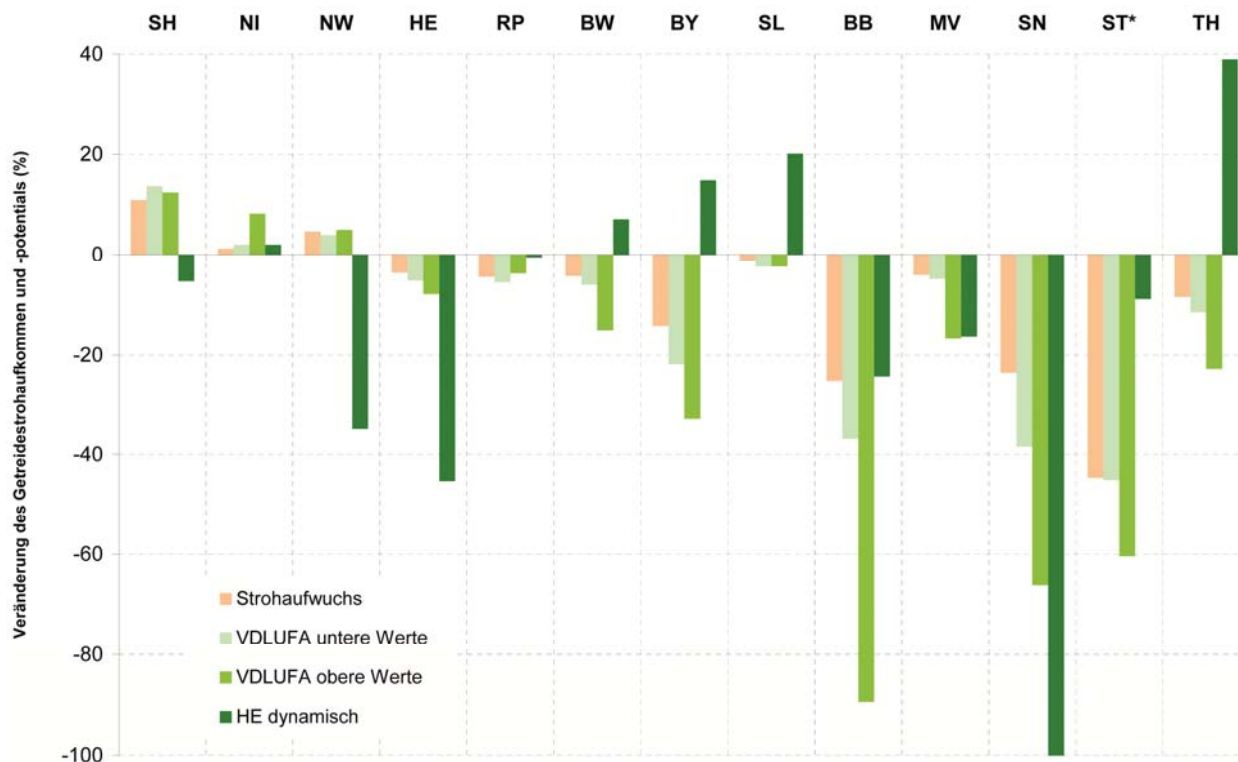


Abbildung 25: Veränderter Strohaufwuchs und abweichendes Strohpotential im Vergleich des Jahres 2003 und dem Durchschnitt der Jahre 1999, 2003 und 2007 (*aufgrund von Gebietsreformen sind die Ertragsdaten in 7 Kreisen Landesmittelwerte).

Tierbestände und N-Immissionen sind gar nur einjährig und stellen eine Momentaufnahme dar. Die Ausarbeitung langjähriger Statistikdaten hätte den Rahmen der vorliegenden Potenzialanalyse überstiegen. Berechnete Strohüberschüsse müssen daher als vorläufige Orientierungswerte angesehen werden. So sollte bei der Planung einer energetischen Strohnutzung zunächst vom ungünstigsten Fall ausgegangen werden.

Eindeutig konnten jedoch Gebiete herausgestellt werden in denen eine Strohentnahme ohne Umstellung der Fruchtfolgen oder zusätzlicher organischer Düngung nicht möglich ist. So sind Gebiete mit einem hohen Kartoffel- und Rübenanteil in der Fruchtfolge nicht für die energetische Strohnutzung ohne humuswirksame Rückfuhr geeignet. Demgegenüber konnten Regionen mit hohen Strohüberschüssen eindeutig identifiziert werden, was bei einer effizienten Anlagenplanung als Entscheidungsgrundlage dienen kann. Nutzungskonzept und -umfang können im Vorfeld standortangepasst geplant werden. Darüber hinaus sind mit dem methodischen Ansatz der Potenzialermittlung und den digitalen Berechnungsvorlagen genauere Berechnungen auf Basis langjähriger Statistikdaten für einzelne Landkreise ohne viel Aufwand möglich. Eine nachhaltige Strohnutzung wird in den Zielregionen abgesichert und die Gefahr von Verlust der Bodenfruchtbarkeit minimiert.

Bei der Bilanzierung ist die Berücksichtigung der aus den Tierzahlen und Haltungsformen berechnete Wirtschaftsdüngeranfall kritisch zu betrachten. Aufgrund nicht verfügbarer Informationen zum Wirtschaftsdüngereinsatz wurde vereinfachend unterstellt, dass der berechnete Anfall vollständig auf der jeweiligen Bilanzfläche ausgebracht wurde. Entgegen der Verfahrensweisen in der Praxis wurde weder Gülle noch Stallmist auf Grünlandflächen ausgebracht. Es ist also davon auszugehen, dass die Reproduktion aus tierischen Wirtschaftsdüngern überschätzt wird. Andererseits sind die sich in den

letzten Jahren rasant entwickelnde Biogaserzeugung und die damit anfallenden ca. 60 Mio. t anfallenden Gärreste nicht berücksichtigt worden, was wiederum die Humusbilanzen unterschätzt. Hier waren ebenfalls keine umfassenden Informationen über Stoffflüsse zu erhalten.

Stark unterschiedliche Strohpotenziale in Abhängigkeit der Humusbilanzierungsmethode deuten ebenfalls auf Unsicherheiten hin. Zwar gilt die Bilanzierung gegenüber Bodenuntersuchungen als bessere Grundlage zur Einschätzung der Entwicklung von Bodenfruchtbarkeit, doch sind sowohl zwischen als auch innerhalb der Methoden Diskussionspunkte zu verzeichnen.

Großen Einfluss hat der verwendete Reproduktionswert für Stroh, welcher bei den VDLUFA Methoden als Spanne von 80 bis 110 kg Humus-C je t Substrat angegeben ist. Die bayerische Methode schlägt sogar einen Reproduktionswert von 70 kg Humus-C pro Tonne Stroh vor. Tatsächlich gibt es keine genaue Anweisung, wann welcher Faktor genutzt werden soll. So verringern sich die nach VDLUFA berechneten Strohpotenziale bei einem Koeffizienten von 80 kg Humus-C je t Stroh bei unteren Werten um ca. 400.000 t FM. Werden die oberen Werte mit dieser Reproduktionsleistung bilanziert, verringert sich das Potenzial für Gesamtdeutschland um sogar 3 Mio. t auf 7 Mio. t Stroh. Für Landkreise mit niedrigem Viehbesatz entstehen so enorme Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Humusbilanzen der unteren und oberen Werte. In der Abbildung 26 ist dieser Einfluss für den Landkreis Sömmerda (0,3 GV/ha BF) dargestellt. In diesem Beispiel wird die Humusreproduktion von einer Tonne Getreidestroh im Bereich von 70 – 110 kg Humus C in fünf Schritten variiert. Die Humusbilanz ändert sich bei den unteren Werten von 72 auf 224 Häq. / ha. Der Saldo nach den oberen Werten wird von -55 Häq./ha erhöht. 98 Häq./ha erhöht.

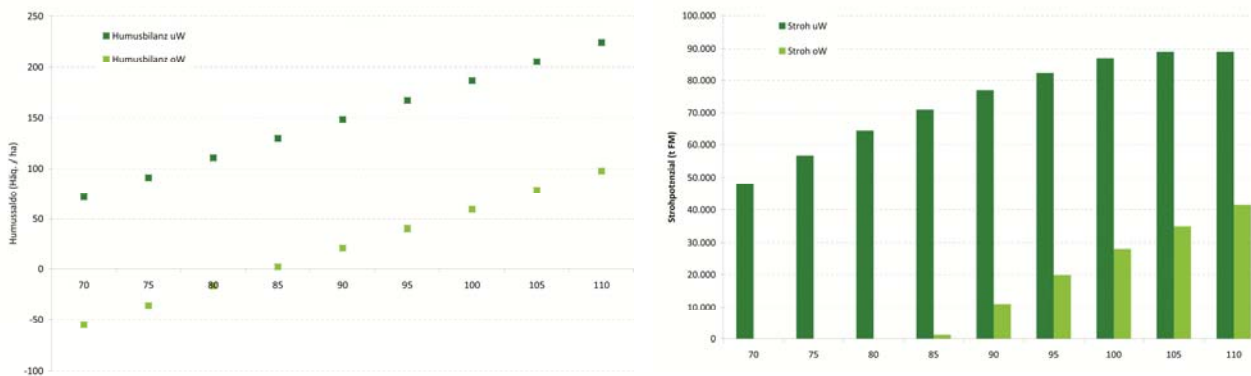


Abbildung 26: Auswirkung veränderter Humusreproduktion von Stroh auf die Humusbilanz (links) und das Getreidestrohpotenzial (rechts) nach VDLUFA unterer und oberer Wert im Landkreis Sömmerda

Wenn der Anteil der Strohdüngung an der gesamten organischen Düngung wie in Abbildung 27 zurück geht, verringert sich die Spanne zwischen den Strohpotenzialen nach VDLUFA oberer und unterer Wert, weil dann bei den unteren Bedarfswerten nicht mehr die Humusbilanz sondern das aufgewachsene Stroh (abzüglich dem Einstreustroh) der limitierende Faktor für das Potenzial ist (vgl. Abbildung 27). Diese Beziehungen sind eine Erklärung für die drastischen Unterschiede der Humusbilanzen und Strohpotenziale vor allem in weiten Teilen Sachsens, Sachsen-Anhalts, der Thüringer Ackerebene und in Gebieten um die Hildesheimer Börde.

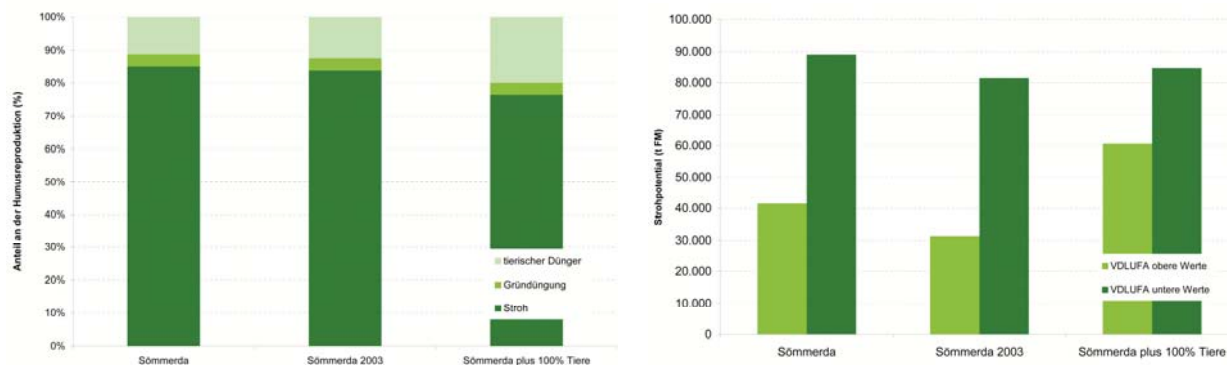


Abbildung 27: Einfluss des Viehbesatzes auf die Zusammensetzung der Humusproduktion und des Strohpotenzials

Nach Überprüfung der VDLUFA-Methode an Dauerversuchen wird die Optimierung dieser Methode nach Standortgruppen vorgeschlagen [73][74]. Für bayerische Standortbedingungen werden zu Beratungszwecken ausschließlich die oberen Werte vorschrieben [75].

Des Weiteren kann die Bestimmung des Getreidestrohs über die angesprochenen Korn-Stroh-Verhältnisse aus der Düngeverordnung unter verschiedenen Standortverhältnissen, Düngermenge und Sortenwahl zu Über- und Unterschätzung des tatsächlich aufgewachsenen Getreidestrohs führen. Daher können auch die dargestellten Potenziale erheblich schwanken. Werden für Gesamtdeutschland die Korn-Stroh-Verhältnisse beispielsweise um den Wert 0,1 verändert, resultiert das in ungefähr 4 Mio. t mehr oder weniger aufgewachsenen Getreidestroh.

Zusätzlich sind auch die Humuskoeffizienten für Biogasgülle aufgrund einer beschränkten Datenlage in Diskussion [76][77]. Eine Überarbeitung der VDLUFA-Methode findet derzeit statt [58].

Die dynamische Humuseinheitenmethode besitzt einen höheren Datenumfang. Hier fehlten Angaben zur fruchtartenspezifischen Mineral-N-Düngung, welche den Humusbedarfskoeffizienten entscheidend beeinflusst. Da diese Daten nicht vorlagen, wurde vereinfachend eine konsequente Entzugsdüngung angenommen. In der Praxis wird allerdings oft der eingesetzte organische Dünger bei der N-Gabe berücksichtigt und dementsprechend geringer gedüngt. Bei den vorliegenden Berechnungen wurde der Bedarf ausschließlich über Mineraldünger gedeckt und die organischen Dünger als Zusatzposten betrachtet. In Folge dessen werden die Humusbedarfskoeffizienten von Fruchtarten, welche in der Praxis bevorzugt organische Düngung erhalten (z. B. Silomais) unterschätzt. Es ist davon auszugehen, dass die Salden und damit das Strohpotenzial in der Realität geringer ausfallen.

Werden alle drei Methoden betrachtet, kristallisiert sich heraus, dass besonders Standorte, welche in den Fruchtfolgen und Viehzahlen deutliche Spezialisierungen erkennen lassen, für die Strohentnahme weniger geeignet erscheinen. Auf der einen Seite ist in Gebieten mit hohen GV-Besätzen nicht genügend Stroh vorhanden und bei Gebieten mit geringem Viehbesatz hängt davon entscheidend die Humusproduktion ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass die bis 2050 von der FNR prognostizierte Energiebereitstellung durch landwirtschaftlichen Nebenernteprodukte zu mehr als 50 % schon heute durch Getreidestroh erfolgen kann.

Auf der betrieblichen Ebene wurden bundesweit 685 Humusbilanzen in 385 Betrieben nach den Cross Compliance Vorgaben ausgewertet [78]. Diese Bilanzierung erfolgte innerhalb einer Umweltverträglichkeitsprüfung mit dem KUL/USL-System. Während in der kreisweisen Bilanzierung 0,3 % einen Humussaldo von $< -75 \text{ kg Humus C} / \text{ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und 95,3 % einen Saldo $> 125 \text{ kg Humus C} / \text{ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ aufweisen sind in der betrieblichen Berechnung die Verhältnisse 2 % und 83 %.

Die oben genannten Potenziale von [21] können mit der vorliegenden Studie widerlegt werden. Die maximalen Potenzialergebnisse von [23][24] sowie die Ergebnisse von [22] gehen mit dem Potenzial von mindestens 8 Mio. t konform. Das Potenzial [22] kann nach dieser Studie als zu niedrig angesehen werden. Diese Summenwerte lassen jedoch noch keinen regionalen Vergleich der berechneten Ergebnisse zu. Die Werte von [79] sind nahezu identisch mit den im Projekt errechneten. Während die vorliegenden Zahlen zu den Strohpotenzialen für Baden-Württemberg und Hessen leicht höher als in den spezifischen Länderstudien [26][80] ausfallen wird für Sachsen-Anhalt ein deutlich niedrigeres Potenzial als in [81] ausgewiesen.

Die Berechnungen der einzelnen Varianten zeigen, dass die einzelnen Nutzungspfade in unterschiedlicher Art auf die kreisweisen Humusbilanzen und auf das Strohpotenzial wirken. Durch die Wahl einer geeigneten Bioenergiebereitstellung verbunden mit einer angepassten Fruchtfolgegestaltung können negative Humusbilanzsalden vermieden werden. Damit können Ergebnisse von [78] bestätigt werden. Weiterhin ist bei derartigen Variantenrechnungen die Anwendung der Koeffizienten anzugeben. Während in der Literatur teilweise die Gärsubstrate linear über die festen und flüssigen linear interpoliert werden, hat die vorliegende Studie lediglich über die flüssigen Gärreste interpoliert. Daher könnte Variante 2 bei allen Methoden positivere Bilanzsalden ergeben.

3.4 Regionalanalyse

[Autoren: Shirley Callacna (DBFZ), Vanessa Zeller (DBFZ)]

3.4.1 Einleitung

Die nachhaltigen Strohpotenziale in Deutschland sind abhängig vom Strohaufkommen in der Landwirtschaft und den jeweiligen Standortbedingungen (Boden und Klima) sowie den Bewirtschaftungsformen (Einstreu in der Tierhaltung). Diese Agrarstrukturbedingungen können teilweise in den Humusbilanzen abgebildet werden. In der oben vorgestellten Potenzialanalyse wurden die Mengen des nachhaltig verfügbaren Strohpotenzials berechnet und auf Landkreisebene aufgelöst dargestellt. Welcher Anteil dieser theoretischen, technischen und nachhaltigen Potenziale jedoch tatsächlich verfügbar ist, hängt wiederum von weiteren Kriterien ab. Das erschließbare Potenzial beschreibt den Anteil des Strohaufkommens, welcher ein Rohstoff tatsächlich an der Energieversorgung leisten kann. Dieses Potenzial hängt von einer Vielzahl praktischer Randbedingungen ab.

Aufbauend auf den Potenzialergebnissen der deutschlandweiten Potenzialberechnungen wurden vier Modellregionen ausgewählt, die sehr unterschiedliche strukturelle Eigenschaften aufweisen. Anhand dieser Regionen sollte analysiert werden, wie sich die lokalen Unterschiede auf die Strohverfügbarkeit in den Gebieten auswirken und welche Faktoren existieren können, die für die Erschließung des Strohpotenzials ein Hemmnis darstellen können.





3.4.2 Methodik

Um lokale Informationen zum Thema Strohverfügbarkeit zu erhalten, wurden zunächst agrarstrukturelle Daten recherchiert und Telefoninterviews in den Modellregionen durchgeführt. Als Erhebungsmethode wurde das Leitfadeninterview gewählt. Dazu wurden zwei Fragebögen entwickelt, die sich zum einen an Landwirte und Lohnunternehmen und zum anderen an Bauernvertretungen sowie landwirtschaftliche Behörde richteten. Mit einem halbstandardisierten, telefonischen Einzelinterview ohne vorfixierte Antwortkategorien sind Fragen zu den folgenden Themen gestellt worden:

- Verkauf von Stroh (Mengen und Kapazitäten, Abnehmer und Preise)
- Verkaufspraxis
- Marktentwicklung in den letzten 5 Jahren
- Rolle der energetischen Nutzung
- Hindernisse für den Strohverkauf
- Entwicklung der Verfügbarkeit und der Nachfragesituation.

Die Analyse des Strohpotenzials wurde für die vier Landkreise Roth, Sömmerda, Vechta und Uecker-Randow durchgeführt, die ebenfalls in der Analyse der Varianten untersucht worden sind (vgl. 3.1.4). In Tabelle 11 sind die wichtigsten Kenndaten der Landkreise in einem Steckbrief dargestellt.

Tabelle 11: Kenndaten zu den Modellregionen

Modellregion (LK)	Roth	Sömmerda	Uecker-Randow	Vechta
				
Bundesland	Bayern	Thüringen	Mecklenburg-Vorpommern	Niedersachsen
Naturraum	Mittelfränkisches Becken	Thüringer Becken	Norddeutsches Tiefland	Dümmer- Geestniederung
Fläche	895 km ²	804 km ²	1624 km ²	813 km ²
Einwohnerzahl, Dichte	124.329 Ew.; 143 Ew./km ²	73.688 Ew.; 92 Ew./ km ²	73.027 Ew.; 45 Ew./km ²	134.838 Ew.; 166 Ew./km ²
Agrarstruktur	Milch- und Viehhaltungsregion	Marktfruchtregion	Marktfruchtregion mit Milchviehhaltung	Veredelungsregion
Landwirtschaftl. Nutzfläche	34.671 ha	58.407 ha	80.446 ha	63.620 ha
Getreidefläche	12.800 ha	33.823 ha	27.594 ha	23.114 ha
Strohpotenzial (VDLUFÄ) t/a	15.155	27.564 - 86.866	42.707 - 50.834	16.477
Strohpotenzial (HE) t/a	16.850	0	0	19.304
Kurzcharakteristik der Betriebsstruktur	In dem LK sind 1500 landwirtschaftl. Betriebe vertreten, die überwiegend Viehhaltung (Milchwirtschaft) betreiben. Die Anzahl mittelgroßer Betriebe (<50 ha) ist am stärksten vertreten.	In dem LK sind nur 260 Betriebe vertreten, von ca. die Hälfte Viehhaltung hat. Die durchschnittl. bewirtschaftete Fläche ist deutlich über 50 ha vergleichsweise hoch.	In dem LK gibt es nur 250 landwirtschaftl. Betriebe mit durchschnittl.Größe von 290 ha. Der überwieg. Anteil der Betriebe hat Rinderhaltung. Auffällig ist der relativ hohe Anteil des Öko-Landbaus.	In dem LK sind ca. 1.600 landwirtschaftl. Betriebe vertreten, von denen der Großteil auf die Veredelung ausgerichtet ist. Es sind viele Betriebe mit einer durchschnittlichen Größe von 40 ha vertreten.
Anzahl der landw. Betriebe	1.526	262	247	1.616
Anzahl Betriebe mit Viehhaltung	1.162	133	193	1.406
Anzahl Öko-Betriebe	28	5	61	12
Vieh-dichte GVE/ha LF	0.85	0.25	0.49	3.29
Größenstruktur	<10ha (594); 10-50ha (724); >50ha (203)	<10ha (90); 10-50ha (74); >50ha(98)	<10ha (70); 10-50ha (50); >50ha (127)	<10ha (484); 10-50ha (678); >50ha (454)

3.4.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Auswertung der Telefoninterviews dargestellt. Insgesamt wurde im Zeitraum Januar bis Februar 2011 ca. 100 Interviews geführt. Sechs Prozent der angesprochenen Personen haben ein Interview abgelehnt. Der Rest der Befragten zeigte sich auskunftsbereit. Die Datenerfassung erfolgt zeitgleich mit der Datenerhebung, durch die Aufnahme der inhaltlichen Aussagen in eine Excel-Tabelle. Auch wenn die Stichprobe sehr gering ausfällt und subjektive Einschätzungen vertreten sind, zeigt sich ein sehr interessantes und heterogenes Bild über das Strohmanagement in den Landkreisen.

Roth

Im Landkreis Roth wurden insgesamt 18 landwirtschaftliche Betriebe und Lohnunternehmen kontaktiert. Davon haben sich drei positiv geäußert, Stroh in geringen Mengen zu verkaufen. Darüber hinaus wurde mit dem Landwirtschaftsamt und dem Bauernverband gesprochen.

Stroh wird bisher in dem Landkreis wenig gehandelt. Die Betriebe produzieren zwar Stroh, aber es gibt in der Regel kaum Nachfrage, so dass sich auch keine Märkte entwickelt haben. Schätzungen des Landesamtes gehen davon aus, dass üblicherweise weniger als 1 % des Getreidestrohs verkauft wird. Wenn Stroh verkauft wird, sind die regionalen Hauptabnehmer in diesem Kreis die Pferdehalter. Nach Darstellung des Bauernverbandes kann sich ein temporärer Strohverkauf entwickeln, wenn witterungsbedingt Engpässe mit der Strohversorgung im Alpenvorland auftreten. Ist dies der Fall, wird Stroh teilweise bis nach Österreich transportiert. Es wird die Einschätzung getroffen, dass es eine leichte Erhöhung der Strohnachfrage in den letzten fünf Jahren gegeben hat. Die Preisspanne liegt zwischen 60 und 100 €/t Stroh, mit einem Durchschnittspreis von 80 €/t Stroh (Anzahl der Aussagen: 3).

Die Böden im Norden des Landkreises sind relativ ertragsschwache Sandböden, so dass dort aus pflanzenbaulicher Sicht große Anteile des Strohs als Humus-Quelle für die Böden benötigt werden. Die Einschätzung der pflanzenbaulichen Beratungsstelle ist, dass das Stroh auch nicht verkauft werden würde, wenn es neue Abnehmer für das Stroh wie Betreiber von Bioenergieanlagen gebe.

Sömmerda

Im Kreis Sömmerda wurden ebenfalls insgesamt 18 landwirtschaftliche Betriebe und Lohnunternehmen kontaktiert. Davon hat sich ein Betrieb positiv geäußert, Stroh in geringen Mengen zu verkaufen. Darüber hinaus wurde mit dem Landwirtschaftsamt und dem Kreisbauernverband gesprochen.

Der Landkreis Sömmerda ist aufgrund der guten Schwarzerdeböden mit Ackerzahlen zwischen 80 und 90 durch den Getreideanbau geprägt. Ein Teil des Strohs verbleibt auf dem Feld. Nach dem Dreschen des Getreides wird das Stroh gehäckselt und auf dem Feld verteilt. Auch wenn nur ein Betrieb gefunden werden konnte, der Stroh verkauft, bestätigen das Landwirtschaftsamt und der Kreisbauernverband, dass Stroh in dem Landkreis außerhalb des produzierenden Betriebes genutzt wird. Durch die Betriebsstrukturen mit sehr großen Betrieben stellen die Höfe die Technologie zur Bergung des Strohs in der Regel selber bereit und verkaufen das Stroh im Direktverkauf ab Hof. Seltener wird die Strohbereitstellung über Lohnunternehmen abgewickelt. Regionale Abnehmer sind tierhaltende Betriebe und Reiterhöfe. Geringe Mengen werden auch stofflich genutzt (Dämmstoffproduktion).

In den Einschätzungen zur Entwicklung der Strohverfügbarkeit wird der Trend gesehen, dass die Tierhaltung in dem Gebiet rückläufig ist und immer weniger Stroh benötigt wird. Daher steigt tendenziell die verfügbare Strohmenge. Insgesamt wird der Markt als volatil eingeschätzt. Welche Kapazitäten zukünftig zu Verfügung stehen, orientiert sich nach Aussagen des Landwirtschaftsamtes und des Kreisbauernverbandes in erster Linie an wirtschaftlichen Kriterien. Darüber hinaus sind aber auch andere Kriterien wichtig, wie die Verkaufskonditionen und die nachgefragte Qualität. Die Preisspanne liegt zwischen 40 und 50 €/t Stroh (Anzahl der Aussagen: 1).

Uecker-Randow

Im Kreis Uecker-Randow wurden insgesamt 34 landwirtschaftliche Betriebe und Lohnunternehmen kontaktiert. Davon hat sich lediglich ein Betrieb positiv geäußert, Stroh in einer sehr geringen Menge von 3 bis 4 t/a zu einem Verkaufspreis von 40 €/t Stroh zu verkaufen. Auch aus den Interviews mit Vertretern des Landwirtschaftsamtes und des Bauernverbandes geht hervor, dass Stroh in der Regel nicht gehandelt wird. Es sind ihnen keine Bauern bekannt, die Stroh verkaufen. Daher konnte auch kein Preis für das Stroh genannt werden.

Der Handel mit Stroh ist laut Aussage einer Person im Landkreis Uecker-Randow nur wenig ausgeprägt. Der Verkauf von Stroh findet in der Regel nur zwischen landwirtschaftlichen Betrieben im Direktverkauf statt, z. B. wenn es zu witterungsbedingten Ausfällen kommt. Die Abnehmer sind tierhaltende Betriebe aus der Region, vor allem die Milchwirtschaft. Im Landkreis überwiegen leichte Standorte (mit Ackerzahlen um 33 Bodenpunkte), daher wird das Stroh im Sinne der Kreislaufführung zur Humusproduktion stärker als in anderen Regionen benötigt.

In dem Landkreis gibt es Erfahrungen zur Reaktion der Bauern, wenn sich die Nachfragesituation ändert, indem externe Abnehmer auftreten. Bei Akquiseversuchen einer kanadischen Bioethanolfirma und einer Firma aus der Dämmstoffproduktion wurde deutlich, dass die Bereitschaft der Bauern gering war, ihr Stroh zu verkaufen. Aufgrund der teilweise schwierigen Standortbedingungen hat das Stroh einen sehr großen ökonomisch-ökologischen Wert. Die Mehrheit der Befragten betonen, dass Stroh zum Ausgleich der Humusbilanzen und Nährstoffverluste auf das Feld gehört. Es gibt widersprüchliche Angaben zur Entwicklung des Strohbedarfs in der Tierhaltung.

Vechta

Im Kreis Vechta wurden insgesamt 21 landwirtschaftliche Betriebe und Lohnunternehmen kontaktiert. Davon haben sich vier positiv geäußert, Stroh in einer Menge von 5000 bis 7000 t/a zu verkaufen. Darüber hinaus wurde mit dem Landwirtschaftsamtsamt und dem Bauernverband gesprochen.

Im Landkreis Vechta gibt es eine hohe regionale und überregionale Nachfrage, so dass Stroh in dieser Region stark gehandelt wird. Die regionale Nachfrage besteht hauptsächlich durch den Verbrauch von Stroh in der Geflügelhaltung, aber auch durch regionale Nachfrage in der Pilz- und Erdbeerzucht. Die überregionale Nachfrage hat ihren Ursprung in den Niederlanden. Dort wird Stroh für den Pflanzenbau oder auch für die Tierzucht benötigt. Durch die hohe Nachfrage haben sich Marktstrukturen entwickelt. Lohnunternehmen bergen, transportieren und lagern das Stroh in einer Größenordnung von 5.000 bis 7.000 t/a. Laut Aussage des Landvolkes Niedersachsen und verschiedener Personen sind die Getreideflächen im Kreis aufgrund der Zunahme von Silomaisflächen rückläufig, mit der Folge dass das Strohangebot knapper wird. Aufgrund des relativ hohen Anfalls von Wirtschaftsdünger gibt es laut Aussagen der befragten Personen keine Probleme mit der Humusversorgung der Böden. In einem Fall

wurde der Kali-Düngewert wird als Grund genannt, Stroh auf dem Feld zu belassen. Der Preis ab Lager beträgt zwischen 55 und 90 €/t Stroh in Abhängigkeit der Saison und der Strohqualität (Anzahl der Aussagen: 4).

Zusammenfassung

Insgesamt haben sich nur 11 % aller befragten Landwirte bzw. Lohnunternehmer positiv zum Strohverkauf geäußert. Die Kapazitäten schwanken von einigen Tonnen bis zu mehreren Tausend Tonnen Stroh, die jährlich verkauft werden. Die absoluten Mengen pro Landkreis können nicht quantifiziert werden, da diese Daten weder von Behörden aufgenommen noch abgeschätzt werden konnten. Der Stichprobenumfang ist zu niedrig, um Einschätzungen über Gesamtmengen für den ganzen Landkreis ableiten zu können. Der aktuelle Strohpreis liegt zwischen 40 und 80 €/t Stroh.

In Abhängigkeit der regionalen und überregionalen Nachfrage (und somit vor allem der agrarstrukturellen Gegebenheiten) haben sich Märkte für Stroh in den vier Landkreisen unterschiedlich stark ausgebildet. Im Landkreis Vechta gibt es aufgrund der überregionalen Nachfrage nach Stroh im Pflanzenbau und Tierhaltung etablierte Logistikketten und Verkaufsstrukturen. In Roth ist der Handel mit Stroh nur temporär vorhanden, wenn es im Alpenvorland Engpässe mit der Strohversorgung gibt. In Sömmerda und Uecker-Randow wird das Stroh fast ausschließlich betriebsintern verwendet, an Kollegen oder z. B. an Pferdehalter verkauft.

Die Mehrheit der befragten Teilnehmer betont, dass die Märkte von starken Schwankungen gekennzeichnet sind, da es das Angebot vom Wetter abhängig ist: in trockenen Jahren gibt es auch wenig Stroh und bei schlechtem Wetter zur Erntezeit kann die Strohqualität so leiden, dass das Stroh unverkäuflich wird. Der Anteil von Bruchstroh kann bei schlechten Wetterbedingungen und somit schlechter Halmqualität bis auf 50 % steigen.

Bis auf die „üblichen“ wetterbedingten Schwankungen schätzen die Befragten die Entwicklung der Strohnachfrage in ihrem Landkreis als relativ stabil ein. In Roth wird eine leicht erhöhte Nachfrage konstatiert, wohingegen es in Sömmerda zu einem Rückgang in der Nachfrage aufgrund der rückgängigen Tierhaltung gekommen sein soll. Dieser leichte Rückgang ist auch in der Statistik zur Entwicklung der tierhaltenden Betriebe und dem Verlauf der Rinderzahlen im Zeitraum 1999 – 2007 zu erkennen [82]. In Vechta wird die Nachfrage aus den Niederlanden und dem regionalen Pflanzenbau in den letzten fünf Jahren als konstant eingeschätzt. Allerdings sei das Angebot laut Aussage mehrerer Personen aufgrund des Rückgangs von Getreideflächen zu Lasten des Maisanbaus für die Biogasproduktion zurückgegangen. Auch diese Entwicklung ist in der Statistik belegt [82].

Die Bereitschaft zum Verkauf von Stroh orientiert sich in erster Linie an wirtschaftlichen Kriterien, sprich dem Preis, den ein potenzieller Anlagenbereiter zu zahlen bereit ist. Dieser Preis muss immer zumindest den Opportunitätskosten wie dem Nährstoffwert des Strohs abdecken bzw. auch die entgangene Humuswirkung abdecken. Bei schlechten Bodenbedingungen und fehlendem Ersatzdünger kann der ökologisch-ökonomische Wert des Strohs sehr groß werden. Dies drückt sich in der Haltung der Landwirte aus. In Uecker-Randow mit teilweisen schwierigen Standortbedingungen herrscht die Meinung vor, dass „Stroh auf das Feld gehört“ und der Wert unbezahlbar sei. Diese Meinung wurde auch deutlich als potenzielle Strohkäufer keine Erfolge bei der Akquise hatten. Auch in Teilen Roths (Norden) könnte die Bereitschaft zum Strohverkauf gering sein. In Sömmerda, einem Standort mit guten Böden bzw. in Vechta einem Standort mit hohem Wirtschaftsdüngeranfall ist die Bereitschaft zum Strohverkauf

hoch. In Tabelle 12 sind die wichtigsten Ergebnisse der Telefonumfrage dargestellt. Aus diesen kann abgeleitet werden, wie sich das erschließbare Potenzial in diesem Landkreis darstellen könnte. In Sömmerda und Vechta weisen die Parameter darauf hin, dass Stroh in der Region verfügbar ist. In Roth und in Uecker-Randow lassen die Indikatoren auf eine geringe Strohverfügbarkeit schließen.

Tabelle 12: Zusammenfassung verschiedener Parameter der Telefonumfragen

	Roth	Sömmerda	Üecker-Randow	Vechta
Verkäufer (% der Befragten)	17	17	3	19
Durchschn. Preis	80 €/t	45 €/t	40 €/t	68 €/t
Markt	Wenig, temporär	wenig	wenig	ausgebildet
Abnehmer	Regional bis überregional (Österreich)	regional	regional	Regional bis überregional (Niederlande)
Entwicklung	Leicht erhöhte Nachfrage	Leicht rückgängige Nachfrage	-	Nachfrage konstant, Angebot wird geringer
Verkaufsbereitschaft	gering	hoch	gering	hoch
Einschätzung zur regionalen Verfügbarkeit	+	+++	-	+

- kein Potenzial, + geringes Potenzial, ++ mittleres Potenzial, +++ hohes Potenzial

3.4.4 Diskussion

Die Ergebnisse der Telefonumfragen basieren auf ca. 100 Interviews und geben daher nur einen Bruchteil der landwirtschaftlichen Betriebe in den Modellregionen wieder. Sie basieren auf subjektiven Einschätzungen und sind als Momentaufnahme zu verstehen. Die Vorteile dieser Methode ist, dass die Stimmungslage der Produzenten von Stroh erfasst wird. In Kombination mit Aussagen der landwirtschaftlichen Behörden und Bauernvertretungen werden qualifizierte Einschätzung zur regionalen Situation abgegeben. Es fehlt allerdings belastbare Daten wie konkrete Angaben zu Mengen und Strohpreisen. In den Umfragen zur regionalen Verfügbarkeit von Stroh sind Informationen enthalten, die in der statistischen Bilanzierung (zumindest in einer regionalen Differenzierung) nicht enthalten sind. Dazu gehören die Abnehmer des Strohs im Pflanzenbau sowie überregionale Abnehmer von Stroh aus den Niederlanden und Österreich. Des Weiteren wurden die Faktoren Verkaufsbereitschaft und Mentalität miterfasst, die in der statistischen Analyse nicht enthalten sind.

Vergleicht man die Ergebnisse aus der qualitativen Regionalanalyse mit den Ergebnissen aus der Humusbilanzierung, so kann folgendes festgestellt werden: Der Trend, der aus den Umfragen abgeleitet werden kann, ist weder in den Ergebnissen der Potenzialanalyse nach VDLUFA noch in den Ergebnissen nach HE-Methode sichtbar (vgl. Tabelle 11). Im Fall von Sömmerda scheint die VDLUFA-Methode mit den Ergebnissen aus der Regionalanalyse übereinzustimmen. Die Situation in Uecker-Randow ist eventuell in den Ergebnissen der HE-Methode abgebildet.

Die Strohachfrage seitens externer Abnehmer aus dem Pflanzenbau und Abnehmer aus dem Ausland sind der oben beschriebenen Strohpotenzialermittlung nicht regional berücksichtigt worden, sondern pauschal mit 10 % für jeden Landkreis angesetzt. Im regionalen Kontext könnte dieser Wert zu gering sein, wie aus dem im Fall von Vechta und Roth hervorgeht.

3.5 Fernerkundung

[Autoren: Philipp Adler (DBFZ), Jens Ponitka (DBFZ), Vanessa Zeller (DBFZ), Markus Tum (DLR), Kurt Günther (DLR)]

3.5.1 Einleitung

Hoch aufgelöste statistische Daten über Erträge und Flächen bieten aufgrund der guten Datenverfügbarkeit in Mitteleuropa bereits gute Ansatzmöglichkeiten zur Bestimmung von Biomassepotenzialen aus der Landwirtschaft. Im Rahmen dieses Projektes werden statistische Daten und Humusbilanzierungsmethoden genutzt, um auf Landkreisebene Strohpotenziale zu ermitteln. Die auf Landkreisebene aufgelösten Daten werden jedoch nur im 4-Jahreszyklus erhoben. Durch die Nutzung von fernerkundlichen Datensätzen zur Potenzialermittlung wäre es prinzipiell möglich, diese Analysen an Aktualität und Genauigkeit zu übertreffen und generell auch in statistisch schlecht erfassten Gebieten (außerhalb Europas) Potenziale bestimmbar zu machen.

In diesem Kapitel wird die Modellierung von Strohpotenzialen anhand des dynamischen Modells „BETHY/DLR“ für vier deutsche Landkreise exemplarisch durchgeführt. Dazu wird zunächst die Funktionsweise des Modells beschrieben und die Methodik dargestellt, um von der modellierten Biomasse auf ein Strohpotenzial zu schließen. Abschließend werden die Ergebnisse aus der Fernerkundung mit denen aus der statistischen Analyse verglichen und die Frage diskutiert, was die Vor- und Nachteile dieses neuen methodischen Ansatzes sind und ob er sich eignet, nachhaltige Reststoffpotenziale in hoher Auflösung zu generieren.

3.5.2 Methodik und Datenbasis

Im Folgenden soll beispielhaft die Berechnung des Strohpotenzials für vier Landkreise mit einem auf fernerkundlichen Daten basierenden Modell dargestellt werden. Im Projekt dienen die Landkreise Roth, Sömmerda, Uecker-Randow und Vechta als Modellregionen, da sie sehr unterschiedliche strukturelle Eigenschaften aufweisen (vgl. 3.1.4).

Zur Berechnung wird das dynamische Modell BETHY/DLR (Biosphere Energy Transfer Hydrology Modell) verwendet. Es ist als einziges, derzeit bekanntes, Modell in der Lage, die Agrar-Nettoprimärproduktion (NPP) in einer Auflösung von 1 km x 1 km auf Länderebene (Deutschland und Österreich) mit einem guten Bestimmtheitsmaß zu berechnen. Es wird gegenwärtig genutzt, um Strohpotenziale abzuleiten. Durch folgende Schritte kann ein theoretisches Strohpotenzial (in tC/km²*a) berechnet und im Raster von 1 km x 1 km graphisch dargestellt werden:

1. Modellierung der Nettoprimärproduktion von Ackerbiomasse mit BETHY/DLR (tC/km²*a)
2. Validierung der Summe der modellierten NPP mit statistischen Daten über den Ernteertrag
3. Ableitung von Strohpotenzialen aus validierter NPP
4. Allokation über Normierung und Visualisierung mit GIS.

Modellierung der Nettoprimärproduktion mit BETHY/DLR

Abbildung 28 zeigt den schematischen Aufbau und die zugrundeliegenden Eingangsdaten des Modells BETHY/DLR. Als dynamisches Kohlenstoffmodell simuliert es den Kohlenstoff-Transfer zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre und kann genutzt werden, um die Nettoprimärproduktion sowie die Nettoökosystemproduktion zu berechnen.

Zur Implementierung dienen BETHY/DLR v. a. fernerkundliche Datensätze sowie meteorologische Zeitreihen mit täglicher Auflösung der Temperatur in 2 m über Grund, des Niederschlags, der Windgeschwindigkeit, der Wolkenbedeckung und des Bodenwassers. Diese Datenbasis wird durch die Bodenklassifikation der FAO erweitert. Aus diesen Daten werden alle maßgeblichen biophysikalischen, topographischen und klimatischen zur Parametrisierung der für die Pflanzenentwicklung in einem Untersuchungsgebiet notwendigen Einflussfaktoren extrahiert [83][84]. Die Landbedeckungsklassifikation erfolgt nach Global Land Cover (GLC2000). Die Zeitreihen über den Blattflächenindex werden in der Form von 10-Tageskompositen durch POSTEL (Pôle d'Observation des Surfaces continentales par Télédétection) bereitgestellt.

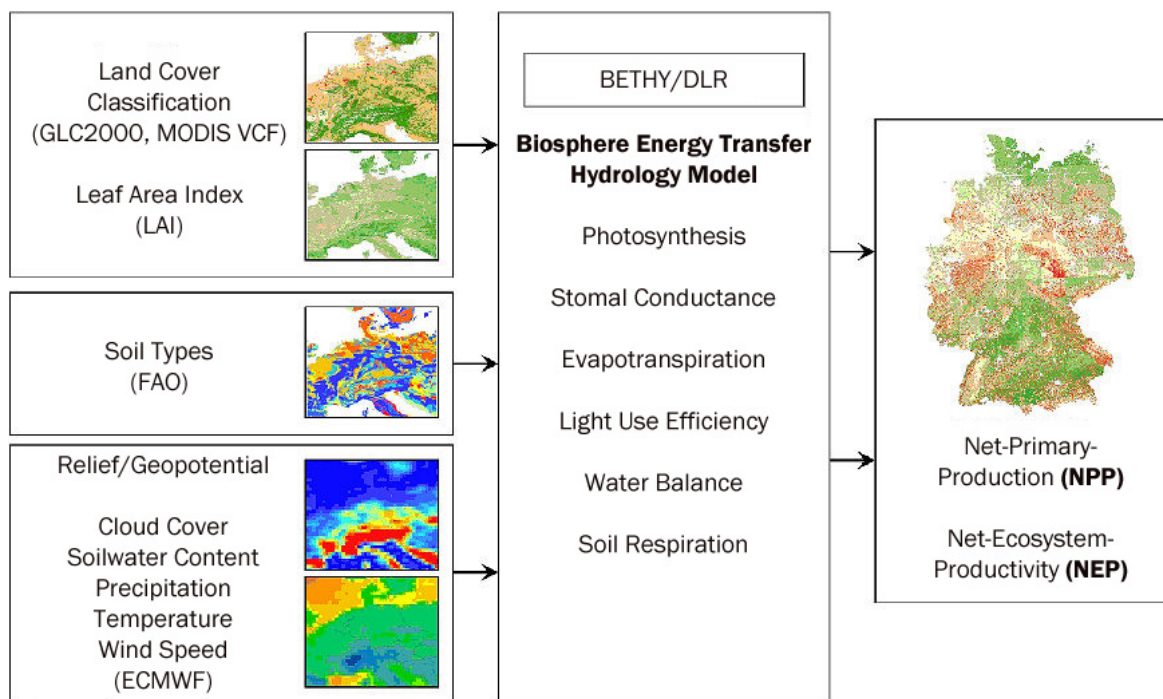


Abbildung 28: Schematischer Aufbau und zugrundeliegende Informationen der Modellierung mit BETHY/DLR

Für die insgesamt 1.909 km² große Fläche der Modelllandkreise liegen die oben beschriebenen Daten für den Zeitraum 2000 – 2007 pro km²-Rasterzelle vor. Mit Hilfe der Landklassifikation werden Ackerflächen ausgewählt, für die die landwirtschaftliche NPP berechnet werden soll. Auf Basis dieser Daten wird die Nettoprimärproduktion pro km² in den vier Landkreisen berechnet. Die für Ackerland modellierte NPP, im Folgenden NPP_{BETHY} genannt, gibt an, wie viel Tonnen Kohlenstoff pro Fläche vorhanden sind.

Validierung

Um Diskrepanzen zwischen Modellierung und Statistik Rechnung zu tragen, werden die modellierten Biomassedaten durch statistische Ertragsdaten validiert [85].

Dazu werden zunächst statistische Erträge (t/ha) auf Landkreisebene mittels Konversionsfaktoren in NPP-Werte (tC/LK*a) transformiert. Dabei wird zunächst von den betrachteten Feldfrüchten und Pflanzenteilen die jeweils anteilige Trockenmasse bestimmt (Faktoren nach [86]). Danach wird der spezifische Nicht-Kohlenstoffanteil von der Trockenmasse abgezogen. Pro Feldfrucht ist so der oberirdische Kohlenstoffzuwachs bestimmbar. Durch die jeweiligen Konversionsfaktoren für oberirdische und unterirdische Biomasse [87][88] kann auf den unterirdischen Kohlenstoffanteil geschlossen werden.

Auf diesem Wege ist aus den statistischen Ertragszahlen ein Wert für den Kohlenstoffzuwachs pro Fläche und Feldfrucht in tC bestimmt worden, der der NPP entspricht. Mit den Werten der feldfruchtspezifischen Anbauflächen multipliziert und pro Landkreis summiert, ergibt sich letztlich ein Wert für die gesamte NPP (NPP_{STAT}) eines Landkreises.

Diese Werte können nun der Validierung der ebenfalls pro Landkreis aufsummierten Modellergebnisse ($\sum NPP_{BETHY}$) dienen, indem das Verhältnis von „statistischer“ (NPP_{STAT}) zu modellierter Nettoprimärproduktion (NPP_{BETHY}) berücksichtigt wird.

Ableitung des Strohpotenzials

Aus der validierten (modellierten) NPP kann über einen zur Transformation der statistischen Daten reziproken Ansatz ein **Strohpotenzial abgeleitet** werden. Bei dieser Berechnung wird das Verhältnis von „statistischer“ (NPP_{STAT}) zu modellierter Nettoprimärproduktion (NPP_{BETHY}) weiter mit einbezogen und bis zur der Allokation auf km²-Ebene berücksichtigt ($1/NPP_{\sum LK} * NPP_{BETHY}$). Im ersten Schritt wird von der Gesamt-NPP eines Landkreises der Nichtstrohanteil (abgeleitet aus der Statistik) subtrahiert. Dieser wird wie oben aus den statistischen Produktionsmengen mittels Konversionsfaktor errechnet (Korn/Stroh- und Rübe/Blatt-Verhältnis [86][89]).

Gl. 3

$$NPP_{Strohpflanzen} = (NPP_{\sum LK} - NPP_{Nichtstroh}) / NPP_{STAT} * NPP_{BETHY}$$

NPP Nettoprimärproduktion
 LK Landkreis
 NPP_{STAT} Statistische NPP
 NPP_{BETHY} modellierte Nettoprimärproduktion

Von der NPP der Strohpflanzen sind dann noch der unterirdische und der Korn-Anteil zu subtrahieren:

Gl. 4

$$NPP_{Stroh} = NPP_{Strohpflanzen} - NPP_{unterird} - NPP_{Korn}$$

NPP Nettoprimärproduktion
 unterird unterirdisch

Im letzten Rechenschritt wird die NPP_{STROH} mit dem Faktor 0,45 multipliziert, um den reinen Kohlenstoffzuwachs pro Fläche (NPP) in Trockenmasse pro Fläche zu überführen (der C-Gehalt von Getreidestroh beträgt ca. 45 % [13]).

Visualisierung mit GIS

Die Gesamtpotenziale können in einem weiteren Rechenschritt von der Landkreisebene mittels einer gewichteten Verteilung weiter aufgelöst werden. Dazu werden die berechneten Potenziale nach folgender Formel auf die 1 km²-Raster heruntergebrochen. Das Potenzial der einzelnen Rasterzelle steht dann im selben Verhältnis zum Gesamtpotenzial wie die Nettoprimärproduktion der Rasterzelle zur Gesamtnettoprimärproduktion der betrachteten Region:

Gl. 5

$$\text{Strohpotenzial}_i = \frac{NPP}{NPP_{\max,i}} * NPP * \text{Ratio}_i$$

i	Landkreis
NPP	modellierte NPP
NPP _{max}	maximale NPP eines Landkreises
Ratio	Verhältnis Strohpotenzial (Summe) zu NPP (Summe) eines Landkreises

Auf diese Weise wird auf Basis der mit BETHY/DLR modellierten NPP jeder Rasterzelle ein Teil des aus der validierten NPP berechneten Strohpotenzials zugewiesen. Die Information der Landnutzung fließt bei der Allokation also nur indirekt über die Modellergebnisse ein: Eine hohe modellierte NPP auf landwirtschaftlich genutzter Fläche führt zu der Zuweisung eines höheren Strohpotenzials. Die tatsächliche Verteilung von Getreideanbauflächen wird bei diesem Schritt nicht einbezogen. In Abbildung 29 sind die verschiedenen Rechenschritte zusammenfassend abgebildet.

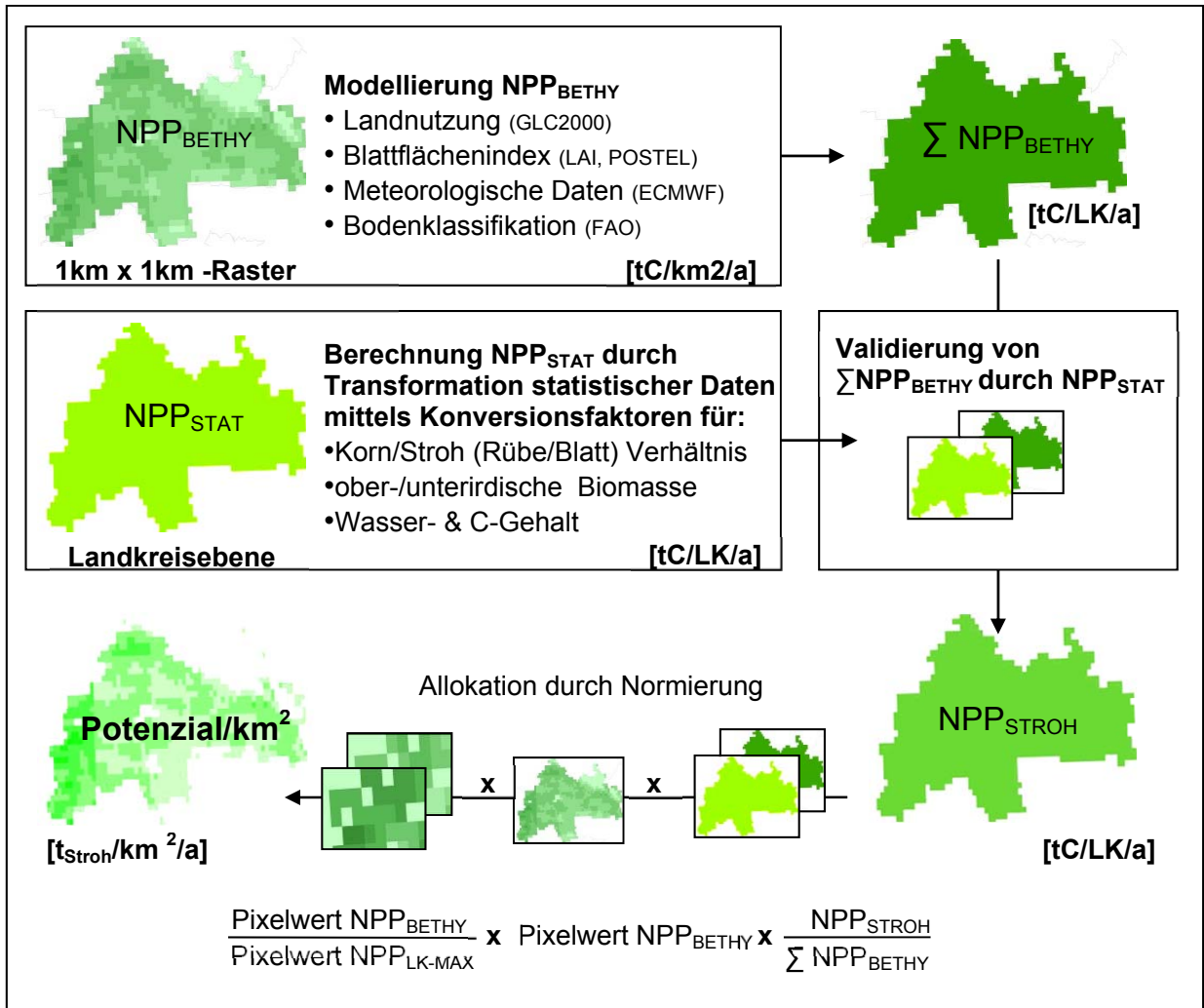


Abbildung 29: Bestimmung des Strohpotenzials aus modellierter Nettoprimärproduktion (Modell: BETHY/DLR, Auflösung 1 km²) und transformierten statistischen Daten (Ertrag und Fläche auf Landkreisebene) (Quelle: eigene Darstellung)

3.5.3 Ergebnisse

Für die Modellregionen ergeben sich mit der beschriebenen Methodik die in Tabelle 13 dargestellten Strohpotenziale in Tonnen pro Landkreis pro Jahr. Die Potenziale liegen im Durchschnitt des betrachteten Zeitraumes 2000 – 2007 zwischen 55.000 t und 80.000 t Stroh pro Landkreis und Jahr. Das höchste durchschnittliche Strohpotenzial und auch der höchste Einzelwert sind im Landkreis Uecker-Randow zu finden. Dieser Landkreis hat im Vergleich zu den anderen Landkreisen die größte Ackerfläche, aber nur die zweitgrößte Getreidefläche nach Sömmerda. Die Strohpotenziale in einem Landkreis variieren in dem betrachteten Zeitraum 2000 – 2007 teilweise sehr stark. Während in den Landkreisen Roth und Sömmerda das Potenzial relativ konstant ist, schwankt es in Uecker-Randow und Vechta sehr stark. Im Landkreis Vechta kommt es zwischen den Jahren 2002 und 2003 fast zu einer Verdreifachung des Strohpotenzials.

Tabelle 13: Theoretische Strohpotenziale in t/LK*a der vier Modellregionen für die Jahre 2000-2007

	Roth (t_{TM})	Sömmerda (t_{TM})	Uecker-Randow (t_{TM})	Vechta (t_{TM})
2000	47.051	65.852	69.247	41.978.
2001	51.993	64.404	42.101	24.307
2002	55.119	65.190	75.298	37.332
2003	72.971	89.649	128.579	107.316
2004	55.962	61.176	80.483	49.853
2005	61.772	87,483	127.626	85.837
2006	44.861	60.043	69.276	58.383
2007	58.061	80.226	47.000	32.899
Durchschnitt	55.974	71.752	79.951	54.738
Stat. Vergleich	48.216	157.537	125.063	101.512

Vergleicht man die modellierten Werte mit den statistischen Durchschnittswerten aus den Bezugsjahren 1999, 2003 und 2007, so zeigt sich, dass die modellierten Werte in drei Fällen unter den statistischen Werten, im Fall von Roth jedoch etwas höher liegen. Anhand dieser geringen Stichprobe bestehend aus vier Landkreisen kann jedoch noch kein allgemeiner Trend abgeleitet werden, wie sich die modellierten Werte zu den statistischen verhalten.

In Abbildung 30 sind die Ergebnisse für die vier Landkreise des aktuellsten Datensatzes (2007) kartographisch dargestellt. Man erkennt sehr deutlich die heterogene Verteilung des auf 1 km² aufgelösten Strohpotenzials. Alle Flächen, die nicht als Ackerland genutzt werden, haben kein Potenzial und sind in der Abbildung grau dargestellt. Am Beispiel Uecker-Randows ist zum Beispiel deutlich zu erkennen, dass der Norden des Landkreises von Waldflächen bedeckt ist und somit kein Strohpotenzial aufweist.

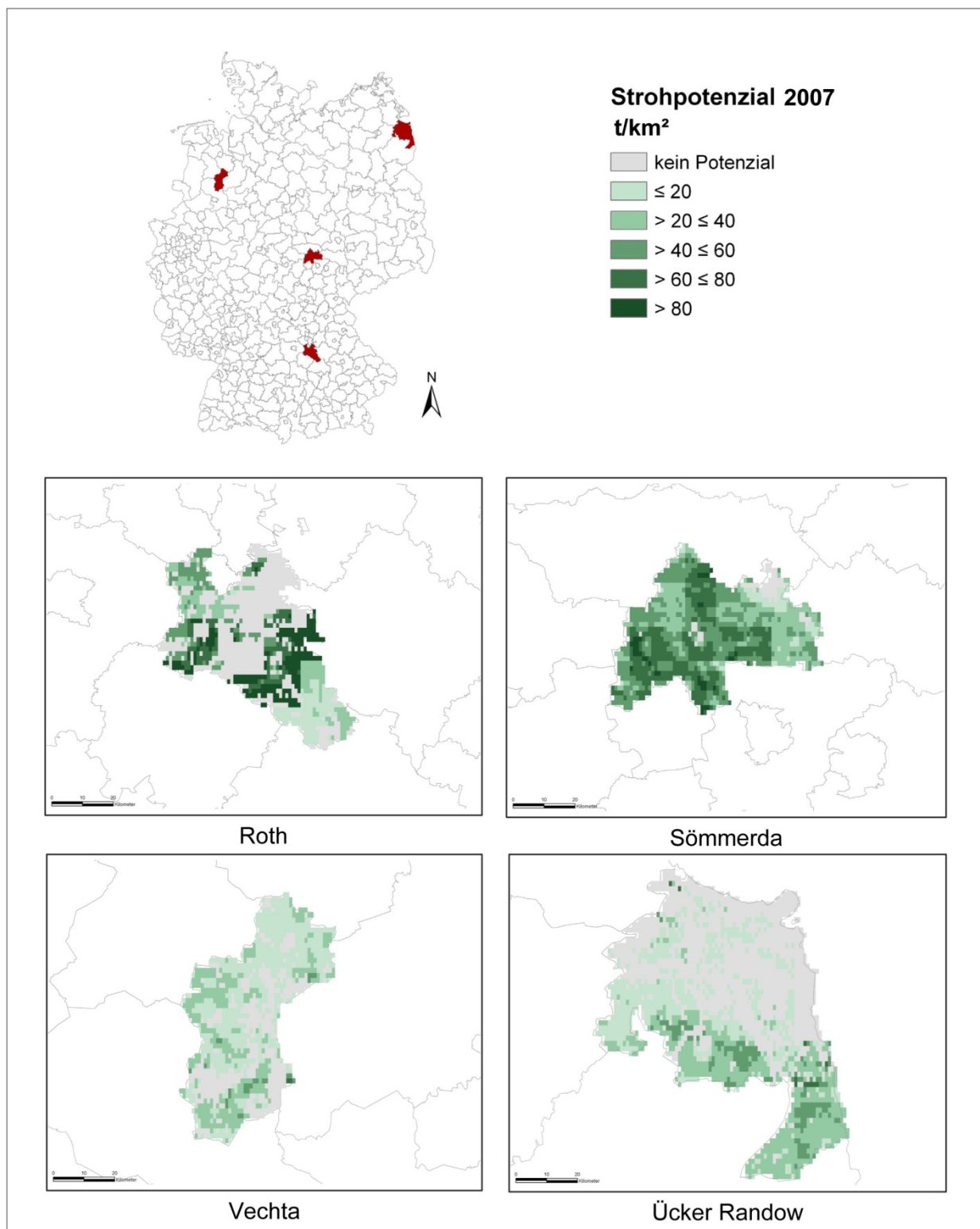


Abbildung 30: Kartographische Darstellung der Strohpotenziale in den vier Modellkreisen für das Jahr 2007

In der nachfolgenden Abbildung (Abbildung 31) sind die Strohpotenziale des Landkreises Uecker-Randows im zeitlichen Verlauf zu sehen. Die Ausdehnung der Ackerfläche ist in dieser Periode nahezu konstant geblieben. Die einzige Abweichung ist für das Jahr 2001 festzustellen. Die starken Schwankungen in den Getreidestrohpotenzialen zwischen den Jahren sind deutlich zu erkennen. Besonders hohe Potenziale sind für die Jahre 2003 und 2005 festzustellen.

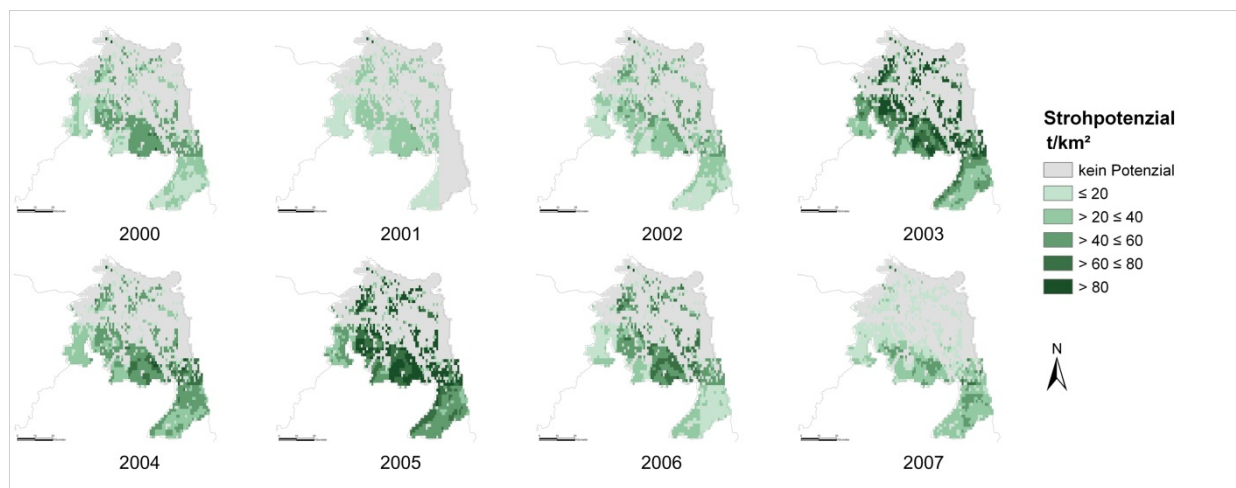


Abbildung 31: Strohpotenziale im Landkreis Uecker-Randow im zeitlichen Verlauf (2000 – 2007)

3.5.4 Diskussion

Durch mittels Fernerkundung gewonnener Daten und deren Modellierung und Allokation kann die regionale Auflösung des Strohpotenzials, im Vergleich zu dem im Projekt gewählten Ansatz der kreisweiten Bilanzierung, bis auf den 1 km²- Maßstab erhöht werden. Während die mittels statistischer Daten gewonnenen Potenziale nur gleichverteilt auf die Ackerfläche bezogen und dargestellt werden können, können mit dieser Methodik unterschiedlich hohe Potenziale pro km² dargestellt werden.

Diese Darstellung ist allerdings mit Unsicherheiten verbunden. Da die im gewählten Modell zugrunde gelegte **Landnutzungsklassifikation** noch nicht ausreicht, die einzelnen Ackerfrüchte zu unterscheiden, ist es nicht gewährleistet, ob sich in einer bestimmten Rasterzelle auch wirklich ein Feld mit Getreide befindet. Vor allem besteht das Problem darin, dass bei 1 km² Auflösung jeder Pixel ein Mischpixel ist. In der Auflösung von 1 km x 1 km (100 ha) wird Ackerland nicht weiter aufgeteilt und nur eine von 23 Klassen der GLC. Da der abschließenden Potenzial-Allokation keine direkte Klassifikation von speziellen Feldfrüchten zugrunde liegt, bleibt die Verortung eine auf statistischen Methoden basierende theoretische Verteilung des Strohpotenzials. Vereinfacht ausgedrückt basiert die Ausweisung eines hohen Strohpotenzials einer Rasterzelle auf der berechneten Nettoprimärproduktion dieser Zelle und den Ertragszahlen der betrachteten Region, nicht auf dem tatsächlichen Vorhandensein von Getreidefeldern im entsprechenden Raster. Dementsprechend ist der Informationsgewinn einer Potenzialkarte zu beurteilen. Ein hohes dargestelltes Strohpotenzial zeigt lediglich, dass die NPP in dieser Zelle hoch modelliert wurde. Somit verursacht die mangelnde Differenzierbarkeit zwischen verschiedenen Kulturen eine große Unsicherheit.

Um dieses Problem zu beheben müssten Landnutzungsprodukte mit einer höheren Auflösung (beispielsweise MERIS GlobCover 300m x 300m) eingebunden werden. Zur eindeutigen Klassifikation von speziellen Feldfrüchten wären hoch aufgelöste Zeitreihen (z. B. 100m x 100m) über den LAI (Leaf area Index) oder NDVI (Normalized Difference Vegetation Index; mittlerer, jährlich genommener Vegetationsindex) und anderen Indizes notwendig, mithilfe derer Aussagen über die Entwicklung der Vegetation getroffen werden können. Weiterhin bleibt das Problem bestehen, dass die spektralen Signaturen unterschiedlicher Vegetationstypen sehr ähnliche Signale produzieren können. Verschiedene Feldfrüchte mit ähnlichen Anbaupraktiken und einer nahezu gleich verlaufende Phänologie sind daher

schwer zu unterscheiden (Beispielsweise Winterweizen und Wintergerste; siehe auch Anhang Experteninterview).

Eine weitere Unsicherheit birgt die **NPP Modellierung**, da bestimmte vereinfachte Annahmen getroffen werden müssen. Aufgrund der nicht ausreichenden Landnutzungsverteilung werden alle Ackerkulturen als eine Pflanze modelliert, obwohl es hier sehr große artspezifische Unterschiede gibt. Die Entwickler von BETHY/DLR weisen in [83] darauf hin, dass die mit BETHY/DLR durchgeführten Modellierungen in Deutschland im Vergleich zu statistischen Werten eine Unterschätzung der NPP darstellen (17 %). Insbesondere in Gebieten für die nur unzureichende Landnutzungsinformationen vorliegen, liegt der modellierte Biomassezuwachs signifikant unter statistischen Werten. Weiterhin wurden Zusammenhänge zwischen der Modellierung des Bodenwasserhaushalts in BETHY/DLR und der Unterschätzung der NPP beobachtet. Schließlich müssen bei der **Transformation von modellierten NPP-Daten zu Strohpotenzialen** vereinfachte Annahmen getroffen werden. Die genutzten Konversionsfaktoren (Korn/Stroh-Verhältnis, ober-/unterirdische Pflanzenmasse, Wasser- und Kohlenstoffgehalte der Trockenmasse) stellen eine Verallgemeinerung über alle Arten dar. Es wird bspw. ein gewichteter Durchschnittswert für das Korn-Stroh-Verhältnis aller strohbereitstellenden Ackerpflanzen verwendet.

Die in diesem Ansatz genutzten satellitenbasierten Landbedeckungsdaten haben eine zu geringe räumliche Auflösung und inhaltliche Differenzierung der Ackerpflanzen, um auf regionaler Ebene detaillierte Aussagen zur Verfügbarkeit von landwirtschaftlichen Reststoffen zu ermöglichen. Insbesondere eine genaue Allokation erscheint derzeit noch nicht praktikabel umsetzbar.

Zur Beantwortung der Frage, welcher Teil des Strohs unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien entnommen werden kann, kann die Fernerkundung mit den gegenwärtigen Methoden keinen Beitrag leisten. Es ist weder möglich ein Monitoring über die stoffliche Nutzung durchzuführen noch Aussagen über den Humusgehalt des Bodens zu treffen. Zudem schränken die zur Validierung der modellierten Ergebnisse notwendigen statistischen Ertragsdaten unter Umständen die Nutzbarkeit der vorgestellten Methodik in Gebieten mit schlechter Datenverfügbarkeit ein.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die räumliche Auflösung von Biomassepotenzialen und auch die Aktualität der Daten mit Hilfe der Fernerkundung bei deutlich verbesserter Landerkennung und optimierten Photosynthesemodellen erhöhen ließen. Gegenwärtig ist die Darstellung jedoch wegen mangelnder Differenzierbarkeit zwischen verschiedenen Kulturen mit großen Unsicherheiten verbunden. Mit statistischen Daten ist die räumliche Auflösung niedriger, allerdings können sie die Realität derzeit genauer abbilden (z. B. können artspezifische Korn-Stroh-Verhältnisse verwendet werden). Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden sind in Tabelle 14 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 14: Vergleich der Möglichkeiten der Strohpotenzialermittlung mittels Fernerkundung und basierend auf statistischen Daten

	Fernerkundung		Statistik	
Datengrundlage,- verarbeitung	-	Nutzt NPP-Modellierung		
(Unsicherheiten in Photosynthesemodellen)	+	Statistisch erhobene Daten		
Räumliche Auflösung	+	Bis auf km ² , allerdings mit unsicherer Flächenbelegung	-	Bis auf Kreisebene
Aktualität	+	Prinzipiell sehr aktuelle Daten verfügbar	-	4 Jahresrhythmus
Differenzierbarkeit der Biomasse	-	fruchtartsspezifisch nicht möglich	+	fruchtartsspezifisch möglich
Beitrag zur Generierung nachhaltiger Potenziale	-	Landoberflächenveränderungen können erfasst werden, aber keine Aussagen zu Bedarf in Tierhaltung, Rückführungsvarianten möglich	+	Daten zu Tierhaltung und Stoffströmen statistisch erfasst

4 Bereitstellungskonzepte

[Autoren: Bernhard Bürzle (DBFZ), Christian Weiser (TLL), Vanessa Zeller (DBFZ)]

4.1 Einleitung

Stroh als Reststoff der Getreideproduktion fällt flächig und in der Landschaft weit verteilt an. Aufgrund seiner relativ geringen Energiedichte (14,05 MJ je kg bei 14 % Wassergehalt) sind die Einzugsgebiete von Strohkonversionsanlagen vergleichsweise groß. Die relative geringe Massendichte des Transportgutes führt außerdem dazu, dass die Kapazitäten der eingesetzten Transportmittel in der Regel nur teilweise ausgelastet sind. Darüber hinaus fällt Stroh nur in einem kurzen Zeitraum im Jahresverlauf an (während der Getreideernte im Spätsommer und Frühherbst). Die Strohkonversionsanlagen haben jedoch einen ganzjährig weitgehend gleichmäßigen Rohstoffbedarf. Daraus folgt die Notwendigkeit zur Zwischenlagerung großer Mengen Stroh über einen definierten Zeitraum des Jahres. Diese Zwischenlagerung hat bei Anlagen mit großem Jahresbedarf, bei denen die Zwischenlagerung dezentral organisiert ist, wiederum mehrere zusätzliche Umschlags- und Transportprozesse zur Folge.

Diese Aspekte können zu relativ hohen Bereitstellungskosten für den Rohstoff Stroh führen, die umso höher sind, je größer der Bedarf einer Anlage ist. Häufig ist die Wirtschaftlichkeit einer Strohkonversionsanlage direkt von den Strohbereitstellungskosten abhängig und bereits kleine Schwankungen dieser Kosten können über positive oder negative Kapitalwerte der Anlageninvestition entscheiden. Diese Zusammenhänge machen eine genaue, auf den jeweiligen Einzelfall angepasste Logistikplanung erforderlich, die z. B. auch die standörtliche Infrastruktur berücksichtigt. Eine solche Einzelfallbetrachtung ist in der vorliegenden Studie nicht vorgesehen. Hier geht es darum, Kosten, die für die Strohbereitstellung entstehen, für Anlagen mit unterschiedlich hohem Strohbedarf bei festgesetzter Strohverfügbarkeit abzuschätzen und Anhaltspunkte für Optimierungsmöglichkeiten in der Logistikkette zu liefern.

Die Bereitstellung von Stroh ist durch Prozesse gekennzeichnet, die den Materialfluss von dem Ort des Biomasseanfalls (Quelle = Getreideanbaufläche) bis zu dem Ort der Biomassenutzung (Senke = Konversionsanlage) realisieren. Die Bereitstellungskette als zeitlich geordnete Abfolge der Prozesse setzt sich demnach aus einzelnen Prozesskettenelementen zusammen und ist in allgemein gültiger Form für die Strohbereitstellung in Abbildung 32 dargestellt.

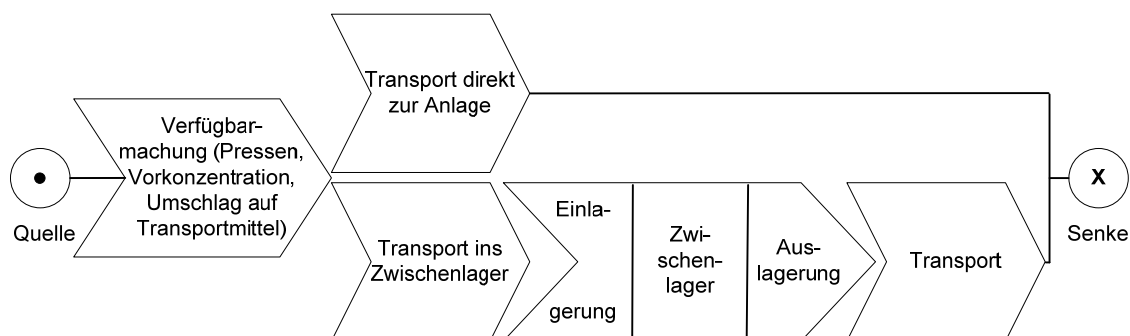


Abbildung 32: Elemente einer Bereitstellungskette

Da es sich bei Stroh um ein Koppelprodukt der landwirtschaftlichen Getreideerzeugung handelt, das unabhängig vom Umfang einer späteren Nutzung bei der Getreideernte auf der Anbaufläche anfällt, wird die Logistikkette beginnend mit der Verfügbarmachung (ohne Berücksichtigung der Ernteprozesse des Korns) bis zur Bereitstellung frei Konversionsanlage betrachtet. Im Folgenden wird erläutert, welche Prozesse in dieser Studie Berücksichtigung finden und auf welchen Annahmen und welcher Datenbasis die Berechnungen beruhen.

4.2 Methodik und Datenbasis

4.2.1 Strohbergung

Die Ernte des Getreides findet abhängig von Fruchtart, Witterung und Region im Zeitfenster von Juni bis September statt. Der Landwirt ist bestrebt sein Korn bei einem hohen Trockensubstanzgehalt (von $\geq 86\%$) zu ernten. Für die Bergung wird das Stroh nach dem Drusch durch den Mährescher oder einen Schwader auf Schwad gelegt. Im Vorgewende werden die Strohhalme zum Teil im Mährescher gehäckselt und ausgeblasen und stehen daher nicht für die Bergung zur Verfügung. Die Schwadabstände werden von der Breite des Schneidwerks oder der Kapazität des Schwaders bestimmt. Für die Bergung essenziell ist die Höhe des Korn- bzw. des Strohertrags, die Stoppelhöhe und der Anteil des nicht zu bergenden Kurzstrohs.

Unter Einsatz eines landwirtschaftlichen Schleppers mit gezogener Ballenpresse wird das Halmgut zu Strohballen verarbeitet – im Speziellen komprimiert und fixiert. Dabei wird das lose Halmgut aufgenommen, verdichtet und bei Erreichen der vorgegebenen Größe abgebunden und danach über den Auswurf auf das Feld oder einem angehängten Sammelwagen abgelegt. Durch den Sammelwagen werden die Ballen zu je drei bis fünf Stück auf dem Feld vorkonzentriert, wodurch die Bergung effizienter durchgeführt werden kann. Eine Vorkonzentration kann auch durch einen Frontlader mit Ballenzange erfolgen. Je nach Ballenpressentyp können Rund- oder Quaderballen mit unterschiedlichen Größen und Pressdichten hergestellt werden. Praxisuntersuchungen haben gezeigt, dass bis zu 75 % des aufgewachsenen Strohs auf diese Weise geborgen werden kann. Danach können zum Beispiel bei Axialmähreschern, wenn der Reinigungsabgang auf den Strohschwad geleitet wird, bis zu 75 % der Nichtkornbestandteile gepresst werden. Ist der Reinigungsabgang allerdings breitverteilt so ist lediglich ein Bergungsanteil von höchstens 60 % möglich. Kombimaschinen erreichen nur marginal höhere Bergungsraten. Kommen klassische Schüttlermaschinen zum Einsatz können ca. 70 % sowie 10 bis 20 % Reinigungsabgang gepresst werden [90]. Tabelle 15 zeigt ausgewählte Balleneigenschaften für Quaderballen [91].

Tabelle 15: Technische Daten von Strohquaderballen

Balleneigenschaft	Einheit	minimal	maximal
Breite	mm	800	1200
Höhe	mm	700	1300
Länge	mm	500	3200
Dichte	kg/m ³	100	220

Findet die Lagerung an einem anderen Ort als dem Feldrand statt, werden entsprechende Transportfahrzeuge für die Beförderung der Strohballen eingesetzt (z. B. Traktor- bzw. LKW-gezogene Gliederzüge). Das Beladen der Transportmittel zum Abtransport der Ballen erfolgt mit un stetigen Flurfördermitteln wie Radladern, die mit entsprechender Greifertechnologie wie Greiferzange oder Ballengabel ausgestattet sind [92]. In Abbildung 33 sind beispielhaft die Ballenherstellung und die anschließende Bergung dargestellt.

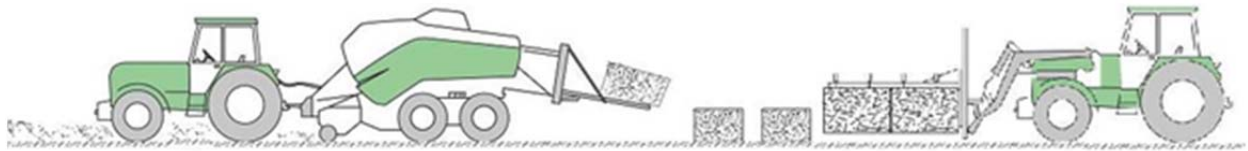


Abbildung 33: Strohbergung

Die chemisch-stofflichen Brennstoffeigenschaften halmgutartiger Biomassen können neben Anbaumaßnahmen wie beispielsweise der Art- und Sortenwahl, dem Düngeregime und der Standortwahl im Wesentlichen durch den Erntezeitpunkt und der Schwadlagerung beeinflusst werden. So kann der Chlorgehalt des Strohs um bis zu ein Drittel im Vergleich zum Ausgangswert gesenkt werden, wenn das Stroh ca. 14 Tage auf dem Feld liegt und mindestens einmal eingeregnet ist [67]. Auch durch die Verschiebung des Erntezeitpunktes kann eine Abnahme des Mineralstoffgehaltes durch die Umsetzung der Nährstoffe in Ertrag und die Einlagerung in die Speicherorgane während der Abreife ausgenutzt werden. In der Praxis sind späte Erntetermine mit Ertragseinbußen (ab Erreichen der Totreife) mit Kornverlusten verbunden und daher für den Landwirt nicht wünschenswert. Ebenso sind lange Feldliegezeiten wegen einer verspäteten Stoppelbearbeitung zur mechanischen Unkrautbekämpfung in der Praxis nicht relevant [67][93].

Im Rahmen dieser Studie wurde die Quaderballenlinie näher untersucht und von der Produktion von Strohballen mit den Maßen 2,2 x 0,9 x 1,2 m ausgegangen. Die Ballen haben eine Pressdichte von 140 kg/m³ und ein Gewicht von 330 kg_{FM}. Für das Stroh ein Trockensubstanzanteil von $\geq 86\%$ in der Frischmasse unterstellt. Eine genaue Beschreibung der ausgewählten Parameter für die Strohbergung mit Quaderballenpresse ist in Kapitel 6 zu finden.

4.2.2 Lagerung

Die Aufgabe des Lagers besteht im Wesentlichen darin, zeitliche Ungleichmäßigkeiten zwischen den Anfall- und Nachfrageströmen der Rohstoffe auszugleichen und die nachgefragte Rohstoffqualität im Hinblick auf den Wassergehalt sicherzustellen. Die Lagerung von Strohballen kann grundsätzlich im Freien bspw. am Feldrand (Feldmiete) oder auf einem anderen dafür geeigneten Lagerplatz (Leichtbauhalle, Scheune) stattfinden.

Im Rahmen dieser Studie wird davon ausgegangen, dass bei Anlagen mit einem jährlichen Strohbedarf von bis zu 2.000 t_{TM} die gesamte Jahresbedarfsmenge zentral an der Konversionsanlage in einem überdachten Lager (Leichtbauhalle) vorgehalten wird. Diese Grenze erscheint angesichts des Platzbedarfs gelagerter Strohmenge realistisch: Bei der Lagerung von 2.000 t_{TM} Stroh, das zu Quaderballen gepresst und in 10 Schichten gelagert ist, wird eine Grundfläche von ca. 3.000 m² benötigt – einschließlich einer Rangierfläche in der Größe von 15 % der vom Stroh selbst benötigten

Grundfläche. Bei Anlagen mit einem jährlichen Strohbedarf von über 2.000 t_{TM} wird hier ein zweistufiges Lagerungskonzept angenommen, mit einem zentralen Lager an der Konversionsanlage, das als Puffer für den kontinuierlichen Anlagenbetrieb über fünf Tage hinweg – auch bei keiner zusätzlichen Anlieferung – fungiert, und mit dezentral im landwirtschaftlichen Raum errichteten Zwischenlagern. Wie bei den Kleinanlagen wird für das Zentrallager von einer Leichtbauhalle ausgegangen, während die Zwischenlager als Feldmiete mit oder ohne Folienabdeckung, Scheunen (Altbau) oder Leichtbauhallen gestaltet sein können. Die unterschiedlichen Lagertypen sind in Tabelle 16 charakterisiert.

Tabelle 16: Charakterisierung der berücksichtigten Lagertypen (nach [92][94])

Lagertyp	Lagerverluste (%)	Lagerkosten (€/t _{TM})
Offene Feldmiete	11	0
Feldmiete mit Folienabdeckung	8	1,99
Scheune (Altbau)	2	5,69
Leichtbauhalle	2	13,89

Die Lagerverluste sind für eine mittlere Lagerdauer von sechs Monaten ermittelt. Gegenüber dem einstufigen Lagerungskonzept treten in der Prozesskette mit zweistufigem Lagerungskonzept zusätzliche Transportschritte sowie Umschlagsprozesse bei der Einlagerung und Auslagerung des Strohs am Zwischenlager auf.

4.2.3 Maschinen für die Vorkonzentration und den Umschlag

Für die Vorkonzentration der Strohballen auf der Feldfläche zu je 3 Ballen, für den Umschlag von Strohballen von der Feldfläche auf ein Transportmedium, vom Transportmedium ins Zwischenlager sowie aus dem Zwischenlager auf ein Transportmedium werden Standardtraktor mit Frontlader, Teleskoplader und Radlader eingesetzt (Tabelle 17). Bei den Umschlagsprozessen am Zentrallager kleinerer und mittelgroßer Konversionsanlagen werden entweder Teleskop- oder Radlader genutzt. Alle drei Maschinen(kombinationen) lagern gleichzeitig zwei Ballen je Umschlagsvorgang (durchschnittliche Dauer: 1 min) um.

Tabelle 17: Beim Umschlag eingesetzte Maschinen und ihre Charakterisierung [95]

Maschine	Spezifikation	Lebensdauer (h)	Auslastung (h/a)	Fixkosten (€/h)	Variable Kosten* (€/h)
Standardtraktor	Allrad; 140 kW	10 000	1 500	12,20	32,88
Frontlader	-	2 500	280	3,58	1,20
Teleskoplader	80 kW; Nennhubkraft 3 t; Nennhubhöhe 8 m	10 000	2 000	9,15	25,70
Radlader	67 kW	10 000	2 000	9,85	25,44

*inklusive Lohnkosten

Bei Anlagen mit einem großen Jahresbedarf an Stroh kommt außerdem der Einsatz eines Portalkrans in Frage. Für die Kostenkalkulation im Rahmen dieses Projekts wurden für den Portalkran jährliche Fixkosten von 89.015 EUR sowie variable Kosten von 72,44 EUR je Betriebsstunde angesetzt; je Umschlagsvorgang (durchschnittliche Dauer: 1,5 min) kann der Kran gleichzeitig 8 Quaderballen greifen und umlagern. Der Einsatz eines Portalkrans mit diesen Parametern ist bei Anlagen mit einem Jahresbedarf von mindestens 37.000 t_{TM} wirtschaftlich vorteilhaft gegenüber der Verwendung von Teleskop- oder Radladern.

Da der Portalkran nicht wie die in Tabelle 17 aufgeführten Umschlagsmaschinen beliebig auch an anderen Orten eingesetzt werden kann, ist die Zahl der jährlichen Auslastungsstunden und damit die Höhe der auf die Einsatzstunden umgelegten Fixkosten abhängig von der jährlich am Zentrallager umgesetzten Strohballenzahl und damit von der Anlagengröße – unter der Annahme, dass die jährlichen Investitions- und sonstigen Fixkosten des Portalkrans gleich bleiben.

Bei der Berechnung der Umschlagskosten werden neben den Kosten für die hier beschriebenen Umschlagsmaschinen auch die Kosten berücksichtigt werden, die auf Grund der Wartezeit für die zu be- oder entladenden Transportfahrzeuge entstehen. In dem Sonderfall, dass ein von einem Standardtraktor gezogener Ballensammelwagen zum Einsatz kommt, der die Schritte der Vorkonzentration, des Umschlags vom Feld auf das Transportmittel, des Transports zum Zwischenlager und des Umschlags in das Zwischenlager integriert (Charakterisierung entsprechend Tabelle 18), treten bis einschließlich der Einlagerung in Zwischenlager keine gesonderten Umschlags- und Transportprozesse auf.

Tabelle 18: Charakterisierung Ballenladewagen

Maschine	Spezifikation	Auslastung (h/a)	Fixkosten (€/h)	Variable Kosten* (€/h)
Ballenladewagen	Ladepazität 18 Ballen (2,2 m x 1,2 m x 0,9 m)	280	44,32	1,90

4.2.4 Maschinen für den Transport

Der Transport der Strohballen wird bei durchschnittlichen Transportdistanzen bis 10 km mittels Standardtraktor und zwei 2-achsigen Plattformanhängern (Ladefläche je Anhänger: 7,8 m x 2,5 m) realisiert. Bei größeren Transportdistanzen kommen dagegen LKW mit Plattform und einem 2-achsigen Plattformanhänger im Gliederzug (Ladefläche von LKW-Plattform und Anhänger jeweils: 7,8 m x 2,5 m) oder LKW-Zugmaschinen und einem längeren, 3-achsigen Plattformanhänger (Ladefläche: 13,6 m x 2,5 m) zum Einsatz (vgl. Tabelle 19).

Um die nach der in Deutschland gültigen Rechtslage vorgegebene Maximalhöhe des jeweiligen Transportgespanns im beladenen Zustand einzuhalten, können die Ballen bei 0,9 m Ballenhöhe in bis zu drei Lagen transportiert werden. Bei allen drei genannten Transportmedien entspricht dies einer maximalen Beladung mit 36 Quaderballen (bei einem Ballenmaß von 0,22 m x 0,12 m x 0,9 m). Diese Ladepazität gilt für alle Transporte, die zur Konversionsanlage führen.

Bei Transporten mit Standardtraktor und Plattformanhänger im landwirtschaftlichen Bereich kann eine zusätzliche Ballenschicht geladen werden. Für Ballentransporte vom Feld zu den Zwischenlagern entspricht die Ladekapazität daher 48 Ballen.

Tabelle 19: Beim Transport eingesetzte Maschinen und ihre Charakterisierung [95]

Maschine	Spezifikation	Auslastung (h/a)	Fixkosten (€/h)	Variable Kosten* (€/h)
Standardtraktor	Allrad; 120 kW	1 500	12,20	32,88
Plattformanhänger (2 Achsen)	2 konventionell Dreiseitenkippanhänger – Ladefläche 2,50 x 5 m	500	2,78	1,60
LKW mit Plattform und 1 Plattformanhänger (2 Achsen)	300 kW	2 000	10,75	46,94
LKW-Zugmaschine für Sattelaufleger und 1 Plattformanhänger (3 Achsen)	300 kW	2 000	11,79	49,04

4.2.5 Berechnung des Stroheinzugsgebietes und der Transportentfernung

Das Stroheinzugsgebiet der Konversionsanlage und die damit direkt korrelierte mittlere Transportentfernung wird nach einem Modell von Seiffert (2010) [96] in Abhängigkeit von der mittleren Strohverfügbarkeit je Flächeneinheit auf Landschaftsebene und dem jährlichen Strohbedarf der Anlage einschließlich Lagerverlusten errechnet (vgl. Abbildung 34). Für die Menge des durchschnittlich bergbaren Getreidestrohs wurde im Rahmen dieser Studie $3 t_{FM}/ha$ angesetzt (vgl. 6.2). Für die Strohverfügbarkeit je Flächeneinheit auf Landschaftsebene wurden die Ergebnisse aus der Analyse des nachhaltigen Strohpotenzials nach VDLUFA (oberer Wert) herangezogen (vgl. 3.2.1) und mit der Landkreisfläche verschnitten. Der Mittelwert aus mehreren Landkreisen mit mittlerem Strohpotenzial ist als Eingangswert für die Berechnung des Stroheinzugsgebiets verwendet worden (ca. $0,27 t_{TM}/ha$).

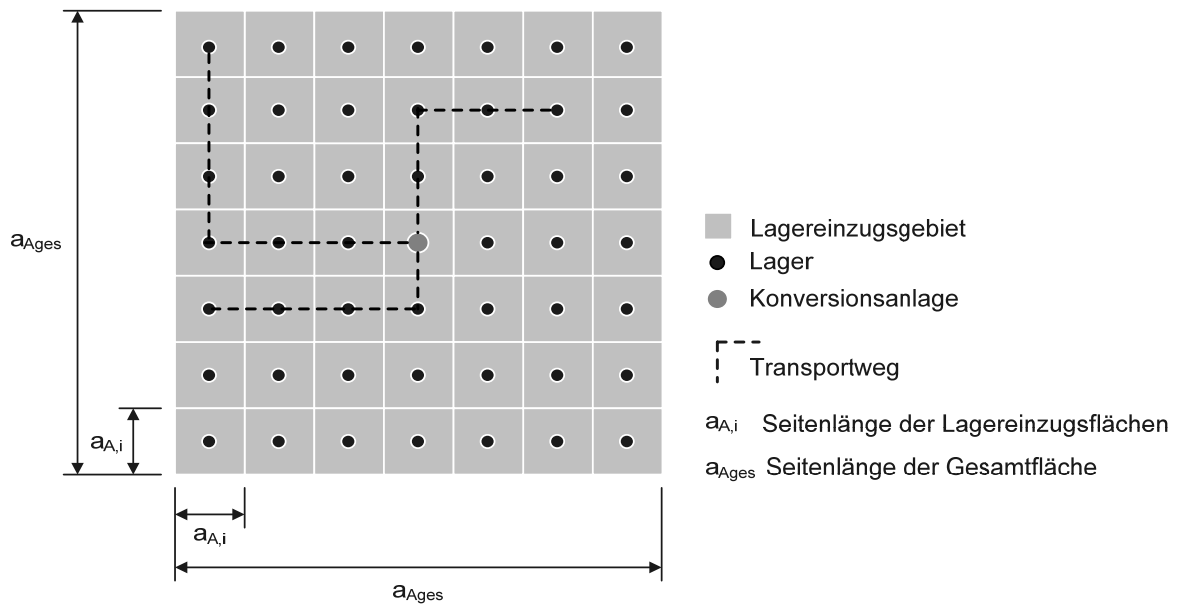


Abbildung 34: Schema der räumlichen Struktur des Stroheinzugsgebiets einer Konversionsanlage [96]

Nach diesem Modell sind die Getreideanbauflächen und Zwischenlager gleichmäßig im Einzugsgebiet der Konversionsanlage verteilt; das Einzugsgebiet sowohl der Zwischenlager als auch der Konversionsanlage ist quadratisch. Die Transportwege verlaufen in rechten Winkeln. In Abhängigkeit vom Gesamt-Strohbedarf der Anlage einschließlich Lagerverlusten B_{ges} und von der Strohverfügbarkeit auf Landschaftsebene V_L ergibt sich das Einzugsgebiet der Konversionsanlage A_{ges} aus Gl. 6:

$$A_{ges} = \frac{B_{ges}}{P_L} \tag{Gl. 6}$$

- A_{ges} Einzugsgebiet der Konversionsanlage in km^2
- B_{ges} Gesamt-Strohbedarf einschließlich Lagerverlusten in t (atro) je a
- P_L Strohverfügbarkeit auf Landschaftsebene in t (atro) je km^2

B_{ges} wird dabei wie folgt berechnet (Gl. 7):

$$B_{ges} = B + \sum_l L_l V_l B \tag{Gl. 7}$$

- B_{ges} Gesamt-Strohbedarf einschließlich Lagerverlusten (= Strohverbrauch) in t (atro) je a
- B Strohbedarf der Anlage in t (atro) je a
- L Anteil eines Lagertyps an B_{ges}
- V Spezifischer Lagerverlust eines Lagertyps entsprechend Tabelle 16
- l Lagertyp entsprechend Tabelle 16

Gl. 2 liefert die im Ergebnisteil (Tabelle 20) aufgeführten Werte zum Strohverbrauch: Die durchschnittliche Transportdistanz s vom Zentrallager (ZL) bis zur Konversionsanlage (KVA), entspricht der Quadratwurzel aus A_{ges} – einschließlich eines Leerfahrten-Anteils von 50 %.

Es wird angenommen, dass das Einzugsgebiet eines Zwischenlagers 9 Schläge zu je 20 ha umfasst und dass das Zwischenlager im Zentrum dieses Einzugsgebietes liegt. Das Einzugsgebiet eines Lagers A_{Lager} resultiert demnach aus Gl. 8. Da die Strohverfügbarkeit als konstant betrachtet wird, beträgt A_{Lager} über alle Anlagen- und Kettenkonzepte hinweg jeweils 17,33 km²:

Gl. 8

$$A_{Lager} = 9 \frac{A_{ges} A_{Schlag} P_{Schlag}}{B_{ges}}$$

A_{Lager} Einzugsgebiet je Zwischenlager in km²

A_{ges} Einzugsgebiet der Konversionsanlage in km²

A_{Schlag} Fläche eines Schlags in km²

P_{Schlag} Technisches Strohpotenzial auf je Einheit Getreideanbaufläche in t (atro) je km²

B_{ges} Gesamt-Strohbedarf einschließlich Lagerverlusten in t (atro) je a

Die durchschnittliche Transportentfernung s_{S-ZL} von den Schlägen zum jeweiligen Zwischenlager wird als Quadratwurzel von A_{Lager} errechnet und besteht zu 50% aus Leerfahrten. Sie beträgt 4,16 km. Die einfache Entfernung zwischen zwei benachbarten Zwischenlagern entspricht der Distanz, die für das Umsetzen der an den Lagern benötigten Umschlagsmaschinen überwunden werden muss, us_{L-L} . Sie wird ermittelt indem die Quadratwurzel von A_{Lager} mit dem Faktor 1,5 multipliziert wird. Sie beträgt 6,24 km.

Sowohl A_{Lager} , s_{S-ZL} als auch us_{L-L} sind nur für mittelgroße und große Anlagen (Strohbedarf > 2 000) relevant, da nur hier die Zwischenlagerung in die Bereitstellungskette integriert ist. Die einfache Entfernung zwischen zwei benachbarten Schlägen us_{S-S} muss für das Umsetzen der für das Vorkonzentrieren und den ersten Umschlagsprozess auf der Feldfläche benötigten Maschinen zurückgelegt werden. Sie wird über folgende Gleichung (Gl. 9) ermittelt und hat den Betrag 1,39 km:

Gl. 9

$$us_{S-S} = \sqrt{\frac{A_{ges} A_{Schlag} P_{Schlag}}{B_{ges}}}$$

us_{S-S} Umsetzdistanz von Schlag zu Schlag

A_{ges} Einzugsgebiet der Konversionsanlage in km²

A_{Schlag} Fläche eines Schlags in km²

P_{Schlag} Technisches Strohpotenzial auf je Einheit Getreideanbaufläche in t (atro) je km²

B_{ges} Gesamt-Strohbedarf einschließlich Lagerverlusten in t (atro) je a

4.2.6 Varianten der Bereitstellungsketten

In dieser Studie wurden für jede Anlagengröße eine Basisvariante und eine kostenoptimierte Variante der Bereitstellungskette entwickelt. Die **Basisvariante** repräsentiert jeweils den aus derzeitiger Sicht wahrscheinlichsten Weg für die Strohbereitstellung. Bei der **optimierten Variante** wird jeweils

angenommen, dass für jeden einzelnen Prozessschritt jeweils ausschließlich die Maschinen(kombination) mit den geringsten Kosten zum Einsatz kommt.

Für die im landwirtschaftlichen Betrieb stattfindenden Prozesse (Strohbergung) wurde in der Basis- und der optimierten Variante jeweils eine bestimmte Prozesskette als typisch definiert (vgl. 6.2). Für die anschließenden Transport-, Lager- und Umschlagprozesse wurde eine Kombination von Prozessen und Maschinen in den zwei Varianten angenommen, denn bei Einzugsgebieten von bis zu 10.000 km² ist es wahrscheinlich, dass unterschiedliche Bereitstellungsketten zum Einsatz kommen. Die gewählten Anteile für einzelne Maschinen(kombinationen) am jeweiligen Prozessschritt basieren auf Schätzungen und Beobachtungen. Für den Zeitbedarf für die Arbeiterledigung liegt ein räumliches Modell von Seiffert (2010) [92] zur Ermittlung von Einzugsgebieten und zur Berechnung von Transportdistanzen, Daten des KTBL [91] über Maschinenleistungen sowie Schätzungen und Einzelfallberechnungen zugrunde.

In Abbildung 35 ist eine Übersicht über die verschiedenen Prozesskettenelemente zu sehen, die in der Basis- und optimierten Variante kombiniert wurden.

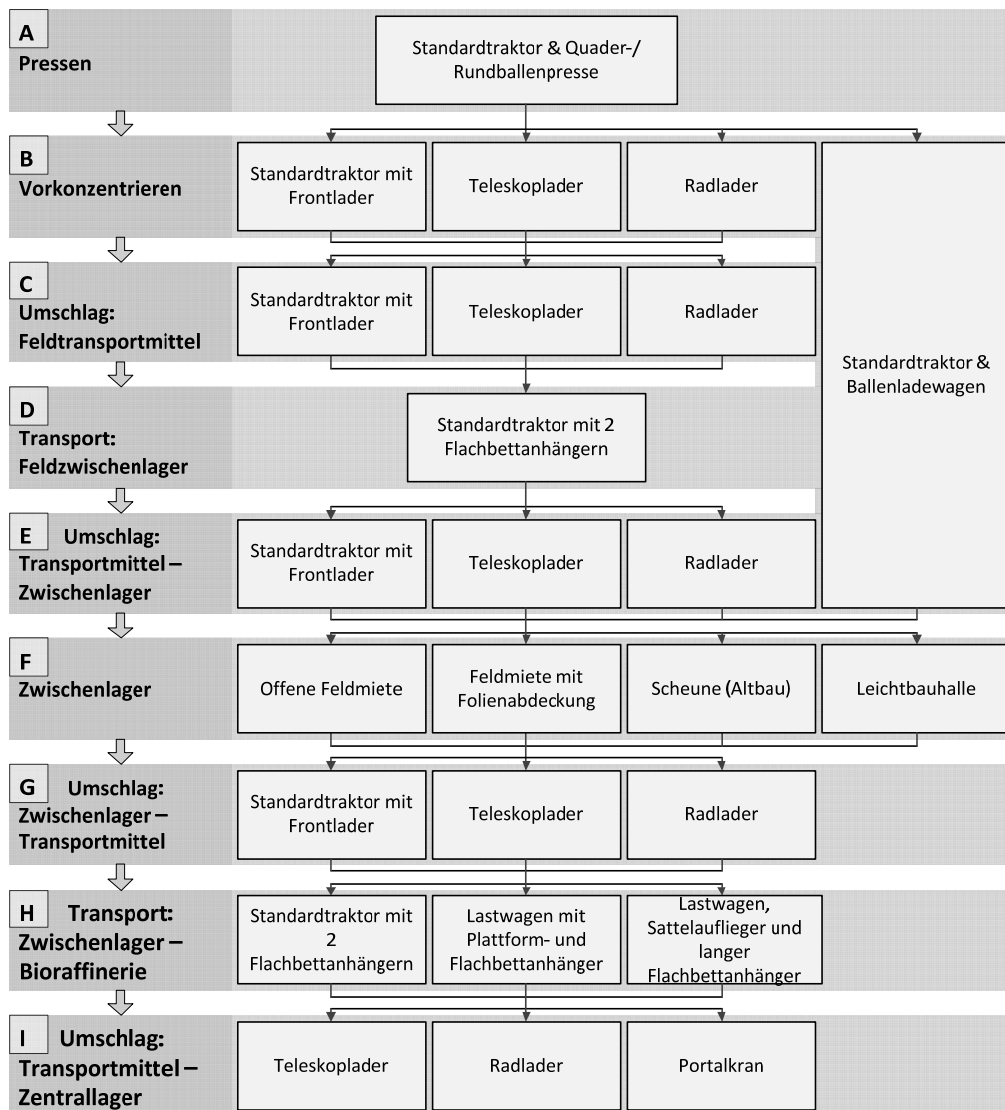


Abbildung 35: Übersicht über die verschiedenen Prozesskettenelemente

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Bereitstellungsketten

Für jedes Anlagenkonzept, welches im Rahmen dieses Projektes entwickelt worden ist, wurde auch ein Bereitstellungskonzept definiert, jeweils in der Basis- und optimierten Variante. Die Spezifizierung von Logistikketten aus der landwirtschaftlichen Sicht werden im Kapitel 5 im Zusammenhang mit der ökonomischen Berechnung vorgestellt.

Für die Prozessschritte außerhalb des landwirtschaftlichen Betriebes wurde für jeden Abschnitt (z. B. Umschlag Feldtransportmittel) eine anteilige Kombination der Prozesskettenelemente definiert. Ein Beispiel, wie eine Bereitstellungskette zusammengesetzt sein kann zeigt Abbildung 36 für das Anlagenkonzept zum Heizkraftwerk. Die Abbildung zeigt die eingesetzten Maschinenkombinationen mit dem jeweiligen Anteil (a) am Prozessschritt und den Zeitbedarf (t) für die Arbeitserledigung in Stunden (h) pro Tonnen Trockenmasse.

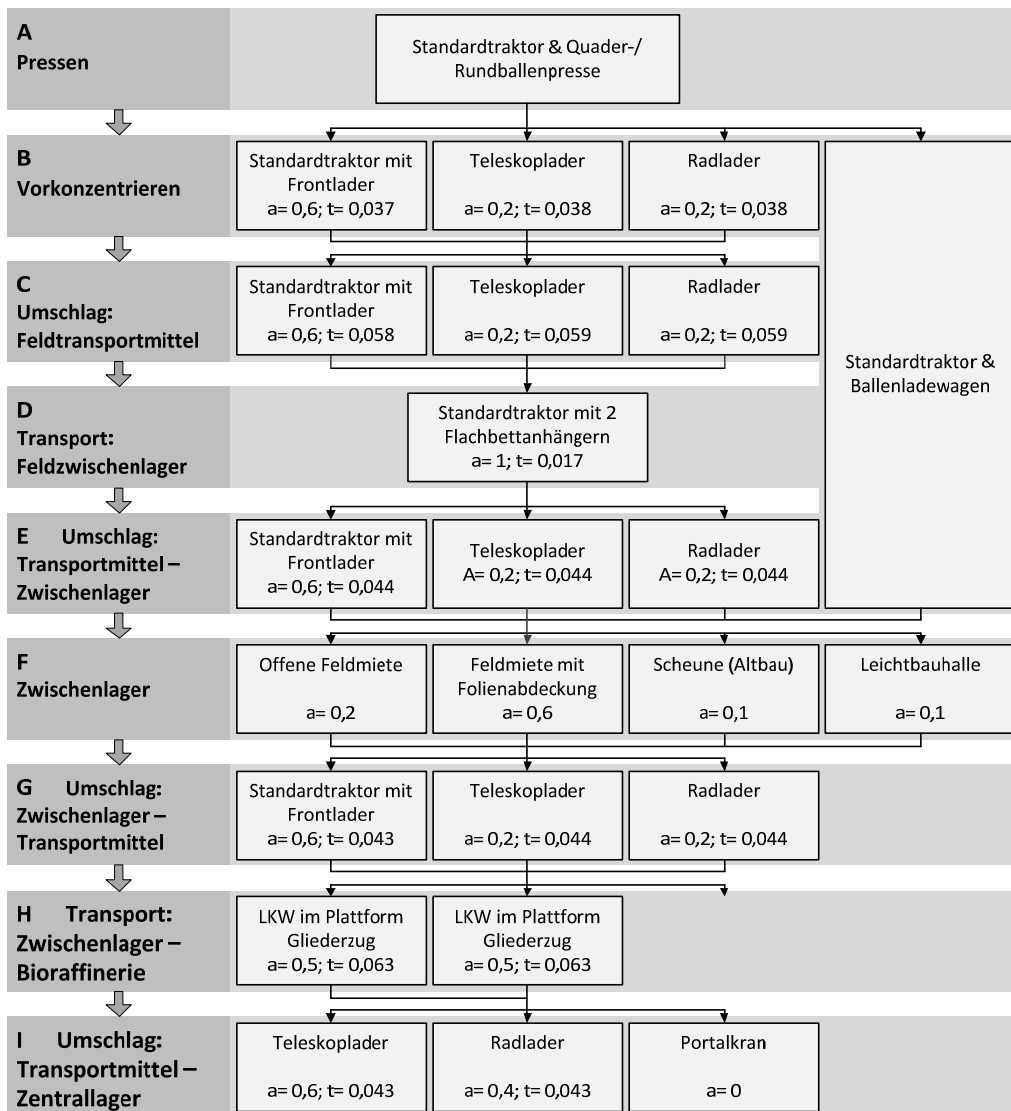


Abbildung 36: Zusammensetzung der Bereitstellungskette am Beispiel des Anlagenkonzeptes zum Heizkraftwerk

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Bereitstellungskonzepte sind im Anhang ausführlich dargestellt (Tabelle A 5-

Tabelle A 16).

4.3.2 Einzugsgebiet und mittlere Transportentfernung

Der jährliche Strohverbrauch einer Anlage errechnet sich durch den Anlagenbedarf zuzüglich der Lagerverluste. Der kalkulierte Bedarf für die im folgenden Kapitel vorgestellten Anlagenkonzepte ist in Tabelle 20 zu sehen. In Abhängigkeit der Anlagengröße variiert der jährliche Strohverbrauch in der Basisvariante zwischen 245 t_{TM} für das Heizwerk bis hin zu 280.435 t_{TM} für die Ethanolanlage. Bei Konversionsanlagen mit einem jährlichen Strohbedarf über 2.000 t_{TM} weisen die kostenoptimierten Logistikketten jeweils höhere Gesamtstrohverbräuche und damit größere Einzugsgebiete und größere durchschnittliche Transportdistanzen auf. Dies ist damit begründet, dass bei diesen Varianten ausschließlich nicht abgedeckte Zwischenlager genutzt werden, was zu höheren Lagerverlusten und damit zu einem höheren Strohverbrauch führt.

Tabelle 20: Strohbedarf und -verbrauch für die verschiedenen Anlagenkonzepte *(Bedarf + Lagerverluste)

Anlagenkonzept	Strohbedarf (t_{TM}/a)	Varianten	Jährlicher Strohverbrauch* (t_{TM}/a)	
			Basis-Variante	Kostenoptimierte Variante
Heizwerk	228	Basis _{Klein} + Optimiert _{Klein}	245	245
Biogasanlage	2.168	Basis _{Klein} + Optimiert _{Klein}	2.740	2.833
Heizkraftwerk	13.199	Basis _{Mittel} + Optimiert _{Mittel}	14.347	14.830
Pelletierwerk	34.400	Basis _{Groß} + Optimiert _{Groß}	37.391	38.652
Bio-SNG-Anlage	48.390	Basis _{Groß} + Optimiert _{Groß}	52.592	54.371
Pyrolyseanlage	172.000	Basis _{Groß} + Optimiert _{Groß}	18.6957	193.258
Ethanolanlage	258.000	Basis _{Groß} + Optimiert _{Groß}	280.435	289.888

Die Ergebnisse aus der Berechnung der Einzugsgebiete und Transportdistanzen für die verschiedenen Anlagenkonzepte sind als Basisvariante und als optimierte Variante in Tabelle 21 dargestellt. Die Einzugsgebiete reichen von 8,6 km² beim kleinsten Bereitstellungskonzept bis zu über 10.000 km² bei der Ethanolanlage. Die Transportentfernungen stellen durchschnittliche Transportdistanzen zur KVA einschließlich 50 % Leerfahrten dar. Bei Anlagen mit einem Jahresbedarf bis 2.000 t Trockenmasse findet der Transport zwischen Feld und KVA statt; bei größeren Anlagen ist Distanz zwischen Feld, Zwischenlager und KVA beschrieben.

Tabelle 21: Einzugsgebiete und Transportdistanzen zur Konversionsanlage (KVA)

Anlagenkonzept	Einzugsgebiet A_{ges} (km ²)		Transportdistanz (km)	
	Basis	optimiert	Basis	optimiert
Heizwerk	8,6	8,6	2,9	2,9
Biogasanlage	101	105	8,4	8,6
Heizkraftwerk	531	549	22,6	23
Pelletierwerk	1.385	1.432	37,0	37,6
Bio-SNG-Anlage	1.948	1.948	43,9	44,7
Pyrolyseanlage	6.924	7.158	83,1	84,5
Ethanolanlage	10.386	10.737	101,8	103,5

4.4 Diskussion

In dem vorliegenden Kapitel wurden als Basis für die nachfolgende Analyse der Bereitstellungs- bzw. Gesamtgestehungskosten und THG-Bilanzierung die Strohbereitstellungskonzepte definiert. Für Anlagen mit unterschiedlich hohem Strohbedarf wurden bei festgesetzter Strohverfügbarkeit die Transportdistanzen und die Maschinenkombination für einen Basis- und optimierten Fall zusammengestellt bzw. berechnet.

Die Kostenoptimierung der Varianten hat gezeigt, dass sich bezüglich der Transportdistanzen und Strohverbräuche nur marginale Änderungen ergeben, insofern, dass sich Verbräuche und Distanzen leicht erhöht haben. In welcher Größenordnung sich die Kosten für die Strohbergung und für die gesamte Bereitstellungskette bewegen, ist im Kapitel 6 und 7.3.1 dargestellt. Dort ist auch die Beschreibung der Anhaltspunkte für Optimierungsmöglichkeiten in der Logistikkette zu finden.

In Bezug auf die Logistik ist eine genaue, auf den jeweiligen Einzelfall angepasste Planung erforderlich, die z. B. auch die standörtliche Infrastruktur berücksichtigt. Zum Beispiel ist in der Praxis die tatsächlich realisierbare Größe des Zentrallagers von den standörtlichen räumlichen, wirtschaftlichen und rechtlichen Gegebenheiten abhängig; insbesondere müssen Grundstückspreise, Restriktionen hinsichtlich Gebäudegestaltung und Anlieferungszeiten sowie verfügbare Infrastruktur berücksichtigt werden.

5 Anlagenkonzepte

[Autoren: Claudia Kirsten, Nadja Weller, Marian Schenker, Harald Wedwitschka, Jan Postel, Stefan Rönsch, Arne Gröngröft, Franziska Müller-Langer (alle DBFZ)]

5.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die Anlagenkonzepte vorgestellt, die im Rahmen des Projektes entwickelt worden sind und welche die Grundlage für die folgende ökonomische und ökologische Analyse bilden. Bei der Auswahl von Konzepten wurde ein Technologiemix aus Wärme-, Kraft-Wärme-Kopplung-(KWK) und Kraftstoffpfaden angestrebt, da es in allem Bereichen aussichtsreiche Ansätze zur energetischen Nutzung von Stroh gibt. Ein Zielkriterium bezüglich der Auswahl der Konzepte war die Berücksichtigung eines sehr großen Anlagenspektrums, um zentrale sowie dezentrale Ansätze zur energetischen Strohnutzung in die Analyse aufzunehmen. In den verschiedenen Fachbereichen des DBFZs ist eine Vorauswahl an Konzepten getroffen worden. Ein Kriterium für die Konzeption von Anlagenkonzepten war ein 100 % er Einsatz von Stroh bzw. eine maximale Zumischung von Stroh. Des Weiteren sollten typische Anlagengrößen für Konzepte ausgewählt werden, die heute marktverfügbar sind bzw. für noch nicht realisierte Konzepte sollte eine generelle Orientierung an vorhandenen Pilot- oder Demonstrationsanlagen erfolgen. Die folgende Auswahl an Anlagenkonzepten ist im Rahmen des Projektes getroffen worden (genannt wird die Eingangsleistung):

- Pelletskessel (40 kW)
- Heizwerk (400 kW)
- Heizkraftwerk (11,2 MW)
- Biogas (1,25 MW)
- Bio-SNG (30 MW)
- Bioethanol (156 MW)
- FT-Diesel (2.000 MW)

Da für die Anlagenkonzepte Pelletskessel und Bio-SNG (Synthetic Natural Gas) der Einsatz von Strohpellets vorgesehen ist, wurde zudem ein separates Modul für eine Strohpelletierung entwickelt. Die Methodik und Datenbasis sowie der Ergebnisteil, in welchem die Anlagenkonzepte erläutert werden, werden im Folgenden dargestellt.

5.2 Methodik und Datenbasis

5.2.1 Anlagenkonzepte zur Wärmebereitstellung

Anlagen für den Brennstoff Stroh sind teilweise kommerziell erhältlich. Die anlagenspezifischen Kenndaten für die Konzepte zur Wärmebereitstellung beruhen daher auf Prüfberichten oder auf Herstellerinformationen. Die anlagenspezifischen Kennzahlen für die **Pelletsfeuerung** sind dem Prüfbericht für eine Feuerungsanlage entnommen, die nach Herstellerangaben auch für den Einsatz von Agropellets geeignet ist [97][98]. Die Daten für die Referenzanlage zur **Strohfeuerung** basieren auf einer kommerziell erhältlichen Feuerungsanlage eines dänischen Herstellers. Die für die Berechnung notwendigen anlagenspezifischen Kenndaten wurden aus dem vom Hersteller zur Verfügung gestellten Datenblatt entnommen [99]. Das Anlagenkonzept zur **Strohpelletierung** orientiert sich an Anlagen, die

heute auf der Basis von Holz oder anderen Biomassen betrieben werden (z. B. einer typischen Jahresleistung einer Pelltierlinie bei der Holzpelletierung).

5.2.2 Anlagenkonzepte zur Strombereitstellung

Die Daten für das Anlagenkonzept **Strohheizkraftwerk** stammen von einer dänischen Anlage, die am Standort Rudkøbing steht. Die erforderlichen spezifischen Prozessdaten dieses Strohheizkraftwerkes wurden weitestgehend aus der Literatur entnommen [100][101][102].

Da für **Biogasanlagen** auf Basis von Stroh keine Anlagendaten existieren, wurde eine Modellanlage konzipiert. Aufgrund der notwendigen Strohkonditionierung, der sehr weiten Verbreitung von „klassischen Nassvergärungsanlagen“ nach dem Rührkesselprinzip und der damit verbundenen möglichen Nutzung von Stroh auch in bereits bestehenden und technisch geeigneten Anlagen, wurde ein Rührkesselfermenter als Basis für eine Modellanlage herangezogen. Diese Leistungsgröße der Biogasanlage stellt eine Standardgröße für derzeit auf dem Markt angebotene Biogasanlagen dar. Bezüglich des wichtigen Parameters Methanertrag wurde auf Literaturwerte zurückgegriffen, die in Abhängigkeit des Zerkleinerungsgrades im Mittel zwischen 240 und 250 Normliter pro Kilogramm organischer Trockensubstanz (IN/kg_{oTS}) liegen. Durch das Zerkleinern des Strohs bspw. mit einer Strohmühle auf ca. 20 mm, wird für die Modellanlage ein Methanertrag von 220 IN/kg_{oTS} zugrunde gelegt.

5.2.3 Anlagenkonzepte zur Kraftstoffbereitstellung

Die analysierte Referenzanlage zur **Bio-SNG** Produktion basiert aus technologischer Sicht auf der am Standort Güssing installierten Demonstrationsanlage. Die Technologie wurde auf eine kommerzielle Anlagengröße und an einen kommerziellen Anlagenbetrieb übertragen. Die Analyse wurde mit Hilfe eines auf der Basis der Software MATLAB® Simulink entwickelten Fließschemasimulationsprogramms durchgeführt.

Um die Stoff- und Energiebilanzen für eine **Ethanolanlage** abzuschätzen, wurde eine Konzeptstudie einer Anlage erstellt und eine Prozesssimulation durchgeführt. Die Prozessdaten beruhen auf Literaturwerten und eigenen Analysen. Das Referenzkonzept wurde so dimensioniert, dass sich eine Ethanolproduktion von 38.000 t/a und somit der Produktionskapazität einer kleinen Ethanolanlage auf Zucker- oder Stärkebasis ergibt. Aufgrund der Herausforderungen bei der Strohlogistik und der noch jungen Technologie, erscheint dies derzeit als realistische Dimension für einen Einstieg in die industrielle Produktion von Ethanol aus Stroh.

Als Anlagenkonzept zur **BtL-Produktion** (Biomass to liquid) wurde das vom KIT entwickelte bioliq®-Konzept vorgestellt, welches den Einsatz von Stroh vorsieht. Als Modellanlage dient ein skaliertes Modell aus Veröffentlichungen des KIT sowie aus dem EU-Vorhaben RENEW entsprechend adaptiert auf die Produktion von FT-Diesel (Fischer Tropsch).

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Anlagenkonzepte zur Wärmebereitstellung

Anlagenkonzept Pelletierung

Für den Einsatz von Stroh in einer Verbrennungsanlage kleiner Leistung sollte der Brennstoff in genormter Form vorliegen, da nach der 1. BImSchV, neben den regelmäßig zu messenden Grenzwerten Prüfstandsmessungen für die Zulassung der jeweiligen Kesselanlage gefordert sind. Diese sind jedoch nur mit einem genormten Brennstoff möglich. Des Weiteren werden normierte Brennstoffeigenschaften auch von den Kesselherstellern zur Verminderung der technischen Komplexität einer Anlage sowie zur sicheren Einhaltung der festgelegten Grenzwerte gefordert. Somit sollte Stroh für den Einsatz im Leistungsbereich von 30-50 kW in pelletierter Form vorliegen.

Für den Einsatz von Strohpellets in Kleinfeuerungsanlagen von 30-50 kW wird eine Pelletieranlage mit einer Produktionskapazität von 20.000 – 40.000 t/a in Betracht gezogen werden, da dies der typischen Jahresleistung einer Pelletierlinie bei der Holzpelletierung entspricht. Neben den kleinen bis mittleren Pelletwerken mit nur einer Produktionsschiene, könnten auch Großproduzenten von Holzpellets diese Jahresdurchsätze realisieren, indem sie eine der Pelletpressen für die Strohpelletierung nutzen. Als Basis für eine Referenzanlage bildet eine Pelletpresse mit einem Durchsatz von etwa 40.000 t/a. Hierbei handelt es sich um eine Ringmatrizenpresse mit einer elektrischen Anschlussleistung von 330 kW.

Zunächst muss der Strohballen mittels Ballenauflöser in einen kontinuierlichen Materialfluss überführt werden. Danach erfolgt eine grobe Häckslung mit anschließender Feinzerkleinerung mit Hilfe von Schneidmühlen. Der Zerkleinerungsgrad ist zum einen abhängig vom gewählten Pelletdurchmesser - für 6 mm Pellets wird das Material üblicherweise < 4 mm zerkleinert [103]. Zum anderen ist die entstehende Korngrößenverteilung für optimale formschlüssige Bindungen in Pellets verantwortlich. Ein weiterer entscheidender Parameter ist der Wassergehalt der Strohfasern. Zur optimalen Einstellung wird das Stroh in einem Mischer durch Zugabe von Wasser oder Dampf auf einen Wassergehalt von etwa 14 Ma.-% konditioniert. Im Anschluss daran gelangt das vorbehandelte Material in die Pelletpressen. Entscheidend ist hierbei das optimale Pressverhältnis (Durchmesser der Matrizenbohrungen zu Länge des Presskanals), welches für halmgutartige Biomassen größer als für die Pelletierung von Holz sein sollte, um entsprechende Pelletqualitäten zu erreichen. Der produktionsbedingte Feinanteil wird abgesiebt und zurückgeführt. Nach der Pelletierung können die erzeugten Pellets Temperaturen von 80 – 130 °C aufweisen [103],[13]. Durch die anschließende Kühlung, zumeist nach dem Gegenstromprinzip, wird die Form- und Lagerstabilität der Strohpellets noch erhöht. Nach der Kühlung werden die fertigen Strohpellets entweder automatisch in Säcken von 15 – 25 kg, Big Bags von etwa 650 kg verpackt oder in Silos bzw. Hallen gelagert und stehen dem Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen zur Verfügung. Der schematische Aufbau der beschriebenen Strohpelletieranlage ist mit den wesentlichen Stoff- und Energieströme in Abbildung 37 dargestellt.

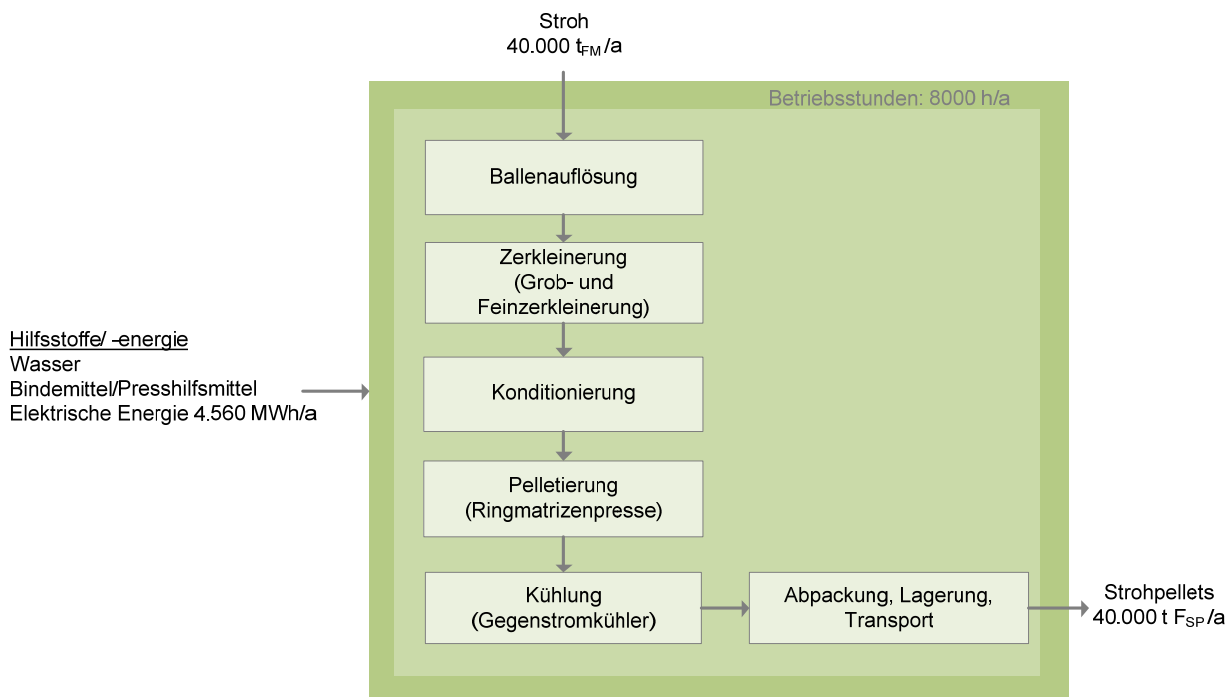


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Strohpelletieranlage (FSP=Frishsubstanz Pellets)

Anlagenkonzept Pelletskessel

Anlagen dieser Leistungsklasse haben eine minimale Größe von 30 kW_{FWL}, da aufgrund der zum Teil schwierigen Brennstoffeigenschaften technische Einbauten berücksichtigt werden müssen, die in kleineren Leistungsgrößen wirtschaftlich nicht darstellbar sind. Typische Anwendungsgebiete sind der Einsatz in Mehrfamilienhäusern oder landwirtschaftlichen Gebäudekomplexen zur Deckung des Wärmebedarfs. Hierbei sollten die Vollbenutzungsstunden der Anlage im monovalenten Betrieb 2.500 h/a jedoch nicht unterschreiten. Die ausgewählte Referenzanlage kann für diese Anlagengröße als typisch angenommen werden, wobei die anlagenspezifischen Kennzahlen dem Prüfbericht einer Pelletfeuerung entnommen wurden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei dieser Prüfung aufgrund fehlender Pelletnormen für Strohpellets normierte Holzpellets verwendet wurden [97]. Die Anlage ist jedoch nach Herstellerangaben auch für den Einsatz von Agropellets geeignet [98].

Bei der betrachteten Referenzanlage handelt es sich um einen Kessel mit einer Leistung von 40 kW_{FWL}, der laut Herstellerangaben für den Einsatz von Holzpellets, Hackgut, Miscanthuspellets und Briketts sowie Strohpellets und Energiekorn geeignet ist. Der Brennstoff wird aus einem entsprechend großen Vorratsbehälter bzw. -bunker mittels Raumaustragsschnecke über eine Brandschutzklappe und Einschubschnecke der Brennkammer des Kessels zugeführt. In der ausschamottierten Brennkammer erfolgt der Ausbrand des Brennstoffes und der Verbrennungsgase unter getrennter Primär- und Sekundärluftzugabe. Die Primärluft wird dabei über die Rostbohrungen und die Sekundärluft durch radiale Öffnungen am Brennkammeraustritt zugeführt. Um eine Verschlackung des Brennstoffes zu verhindern, wird dieser über einen beweglichen Stufenrost kontinuierlich bis zum Aschekasten bewegt. Die heißen Abgase treten oberhalb der Brennkammer in den dreizügigen Rohrwärmeübertrager ein, indem die Erwärmung des Kesselwassers erfolgt.

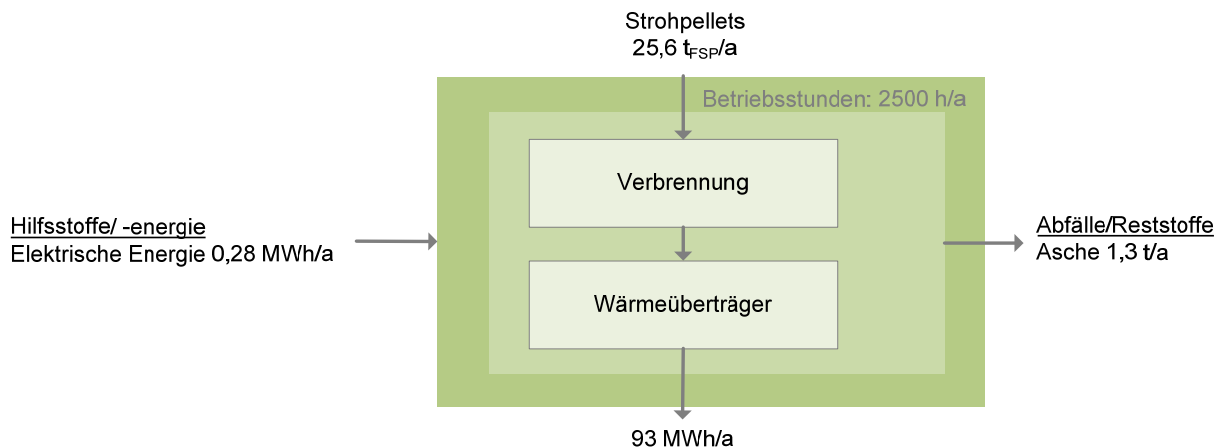


Abbildung 38: Schematische Darstellung des Pelletskessels

Anlagenkonzept Heizwerk (400 kW_{FWL})

Die energetische Nutzung von Stroh zur Erzeugung von Wärmeenergie durch eine Feuerungsanlage mittlerer Leistung stellt ein weiteres Konversionskonzept für den Brennstoff Stroh dar. Die typische Anwendung dieser Anlagengröße liegt in der Beheizung von kleinen Wohngebieten, kommunalen Einrichtungen, in der Landwirtschaft oder aber in der Nutzung der Prozesswärme. Oft wird diese Anlagengröße zur Deckung der Wärmegrundlast in einem Heizwerk vorgesehen und daher bivalent betrieben. Die analysierte Referenzanlage basiert auf einer kommerziell erhältlichen Feuerungsanlage eines dänischen Herstellers. Die Nennleistung dieser Anlage beträgt 400 kW. Die daraus resultierenden Massen- und Energiemengen wurden unter Annahme eines üblichen Nutzungskonzeptes dieser Anlage im bivalenten Betrieb in einem Heizwerk bei einer Vollbenutzungsstundenzahl von 2.500 h/a ermittelt. Dieser Anwendungsfall ist charakteristisch für die Nutzung der entstehenden Wärmeenergie in einem Nahwärmenetz zur Beheizung eines nahegelegenen Wohngebietes.

Die Brennstoffförderung der Strohballen zur Feuerungsanlage erfolgt über ein Förderband mit anschließender Ballenzerkleinerung. Das zerkleinerte Stroh wird zur Abtrennung der feinen Strohpartikel pneumatisch durch einen Zyklon transportiert. Die Brennstoffdosierung der Strohhäcksel in den Brennraum des Kessels erfolgt mittels einer Stokerschnecke. Danach wird das Strohhäcksel unter Zugabe von Verbrennungsluft oxidiert. Das durch die exotherme Reaktion gebildete heiße Abgas erhitzt das in den Wärmeübertrager strömende Kesselwasser. Die dadurch gewonnene Wärmeenergie kann somit in ein angeschlossenes Nahwärmenetz übertragen und dem Verbraucher zur Verfügung gestellt werden. Zur Einhaltung der vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte wird das entstandene Abgas durch einen Zyklon und anschließend durch einen nachgeschalteten Schlauchfilter gereinigt und somit ein Großteil der bei der Verbrennung gebildeten Staubpartikel abgeschieden werden ($< 50 \text{ mg/m}^3$ (i.N., 11 Vol.-% O₂)). Die im Brennraum entstandene Asche wird automatisch über eine Förderschnecke in einen Aschenbehälter gefördert. Die wesentlichen Stoff- und Energieströme für das vorgestellte Anlagenkonzept sind in Abbildung 39 dargestellt.

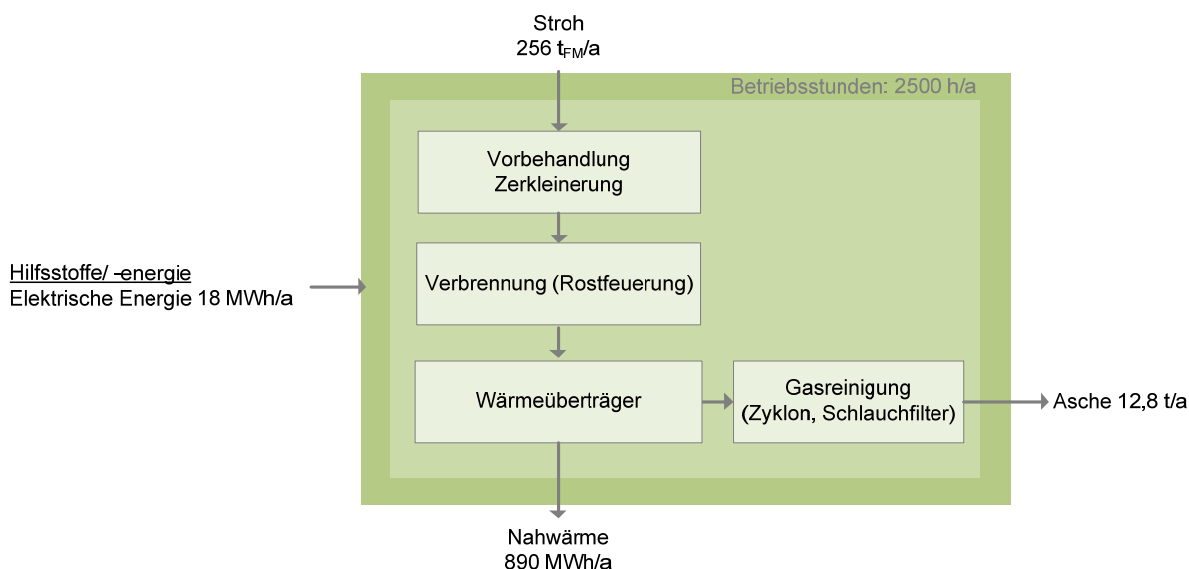


Abbildung 39: Verfahrensschema Strohfeuerungsanlage

5.3.2 Anlagenkonzepte zur Strom- bzw. KWK-Bereitstellung

Anlagenkonzept Heizkraftwerk

Eine weitere Möglichkeit der energetischen Nutzung von Stroh ist die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme in einem Heizkraftwerk (HKW). Der Vorteil der Kraft-Wärme-Kopplung ist die höhere Brennstoffausnutzung, da nicht wie bei alleiniger Stromerzeugung die überschüssige Wärme an die Umgebung abgegeben wird, sondern zu Heizzwecken bzw. als Prozesswärme genutzt werden kann. Dies kann sich besonders positiv auf die ökologische aber ökonomische Bilanz einer solchen Technologie im Vergleich zu der getrennten Erzeugung von Wärme oder Strom in herkömmlichen Anlagenkonzepten auswirken. Deshalb wurde die KWK-Kopplung durch die Verbrennung von Stroh in einem Heizkraftwerk als ein weiterer Konversionspfad für den biogenen Festbrennstoff Stroh betrachtet. Die Daten zur Methodik und Datenbasis sowie eine Kurzbeschreibung der ausgewählten Referenzanlage sind im folgenden Abschnitt aufgeführt.

Die analysierte Referenzanlage steht am Standort Rudkøbing in Dänemark. Diese Anlage wurde bereits im Jahr 1990 installiert und wird seitdem kontinuierlich betrieben. Die Feuerungswärmeleistung dieser Anlage beträgt 11,2 MW. Jedoch muss dazu gesagt werden, dass die verwendete Datenbasis nur eine Momentaufnahme darstellt, da dynamische Parameter, wie z. B. Brennstoffqualität, Anlagenstandzeit und vor allem ein veränderlicher Wärmebedarf, einen direkten Einfluss auf die angegebenen Prozessgrößen haben.

Die einzelnen Prozessschritte der analysierten Referenzanlage sind in Abbildung 40 schematisch dargestellt. Im ersten Abschnitt erfolgt die Brennstoffbeschickung durch ein automatisches Kransystem und anschließender Zerkleinerung der Quaderballen in einem Ballenauflöser. Die Strohhacksel werden danach über einen pneumatisch betriebenen Kolben in den Brennraum des Kessels gefördert. Dort wird das Stroh auf einem wassergekühlten Schüttelrost, welcher modular aufgebaut ist, verbrannt. Der dadurch entstehende Abgasvolumenstrom erhitzt nach dem Durchströmen der Nachbrennkammer das in

den Dampferzeugerrohren fließende Kesselspeisewasser. Der entstandene Dampf wird auf eine Temperatur von $T = 450\text{ °C}$ und einem Druck von ca. 60 bar zwischenüberhitzt und gelangt dann in die Turbine, wo er entspannt wird. Dadurch wird in dem nachgeschalteten Generator Strom erzeugt der in das Stromnetz eingespeist werden kann. Zusätzlich dazu wird bei der nötigen Kondensation des Dampfes Energie frei, welche in Form von Heizwärme genutzt werden kann.

Das gereinigte Abgas wird nach Passieren eines Gewebefilters über einen Kamin an die Atmosphäre abgeführt. Die Staubkonzentration in Reingas beträgt in etwa 50 mg/m^3 (i.N., 11 Vol.-% O_2). Die bei der Verbrennung des Stroh gebildete Schlacke wird durch die Rostbewegung im Kessel abgeschieden, in einem wassergekühlten Behälter aufgefangen und anschließend in einem Container gesammelt. Diese Rostasche kann ggf. als Düngemittel in der Landwirtschaft genutzt werden.

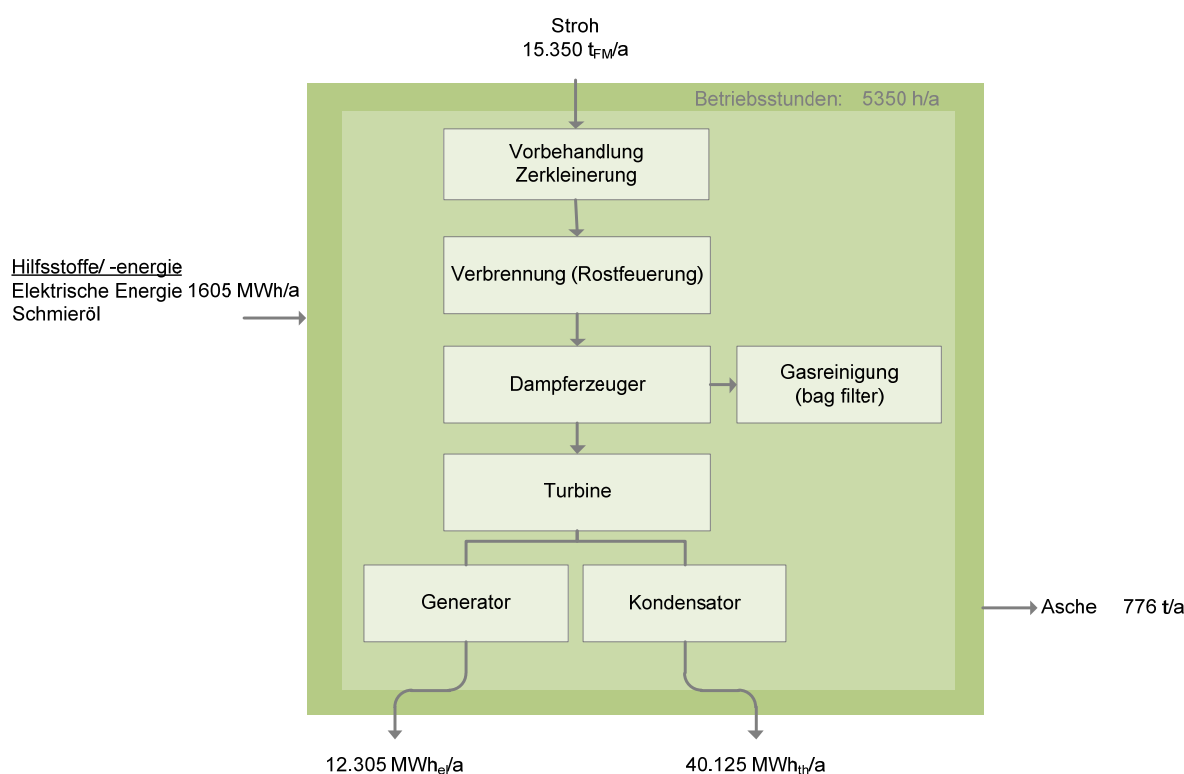


Abbildung 40: Verfahrensschema Strohheizkraftwerk

Anlagenkonzept Biogas

Das Schema der konzipierten Anlage ist in Abbildung 41 dargestellt und gibt einen Überblick über den Prozessablauf. Die Substrate entstammen unterschiedlichen Quellen und müssen verschiedenen Aufbereitungsverfahren unterzogen werden. Die Rindergülle kann in bestehenden Lagerbehältern des viehhaltenden Betriebes zwischengelagert werden und bedarf keiner gesonderten Aufbereitung im Vorfeld der Vergärung. Das Stroh wird auf dem Feld zu Ballen gepresst und so zur Biogasanlage transportiert. In dieser Art kann es, vor Witterungseinflüssen geschützt, zwischengelagert werden. Klee gras wird als frische Pflanze geerntet und muss siliert werden, um es ganzjährig nutzen zu können. Aufgrund des für die Silierung sehr geringen TS-Gehaltes des Klees (16 %), sollen Stroh häcksel eingearbeitet werden. Um das Stroh als Häckselgut nutzen zu können, werden die Strohballen mittels Radlader o. ä. in einen Ballenauflöser gegeben, vorzerkleinert und anschließend per Förderschnecke in eine Stroh mühle transportiert. Dort erfolgt das weitere Häckseln und Aufspleißen auf ca. 20 mm

Häcksellänge. Durch das Zumischen und Mitsilieren des Strohs sollen Sickersäfte gebunden und das Stroh durch Einweichen/Wässern weiter aufgeschlossen werden. Gegebenenfalls muss dann der Zuckergehalt noch mit Hilfe von Melasse erhöht und die Silierung mit weiteren Maßnahmen optimiert werden. Der Silierverlauf mit Strohanteilen ist derzeit sicherlich noch Gegenstand der Forschung, sollte aber für die gewählte Referenzanlage des Jahres 2020 gut beherrschbar sein. Die Klee gras–Stroh–Silage wird über einen Feststoffdosierer in den Vorlagebehälter gefördert und dort mit Gülle angemischt. Anschließend wird das konditionierte Substratgemisch über eine Pumpe in den Hauptfermenter gefördert.

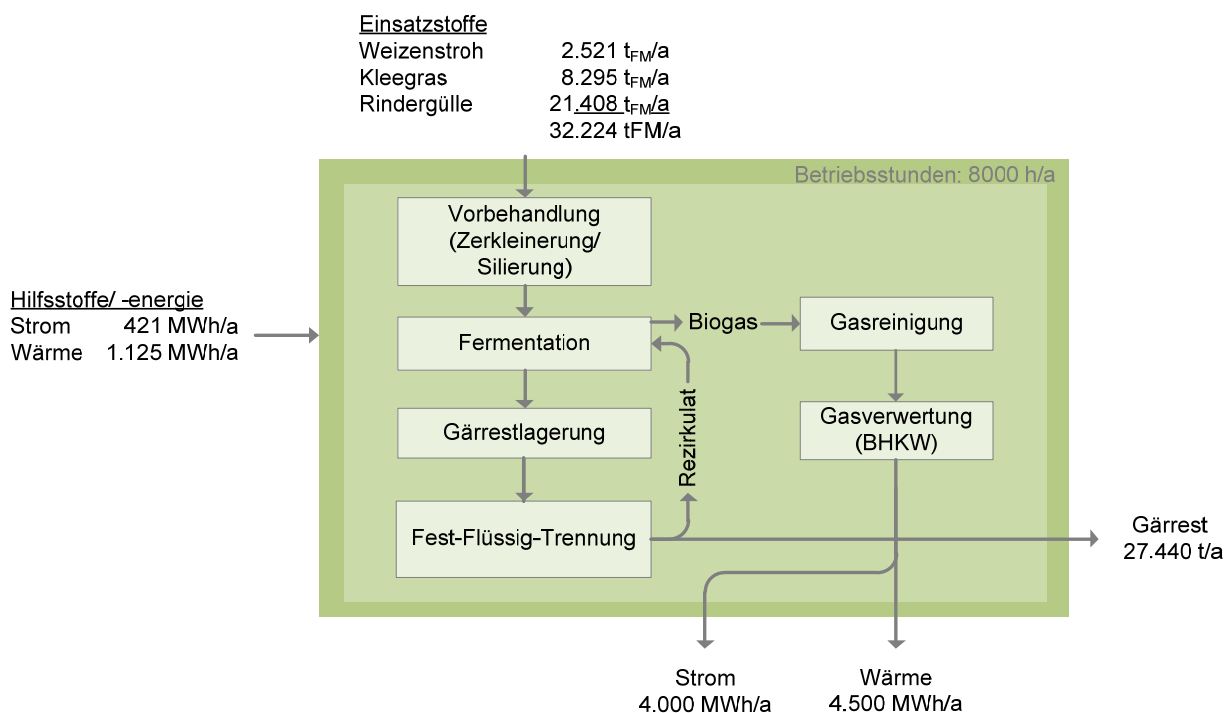


Abbildung 41: Verfahrensschema Biogasgewinnung

Die Vergärung findet im mesophilen Temperaturbereich statt und ist zweistufig ausgeführt, um Kurzschlussströmungen zu vermeiden. Nach dem Austritt des vergorenen Substrates aus dem Nachgärer, gelangt dies in das Gärrestlager. Dort erfolgt über einen Pressschneckenseparator die Fest-Flüssig-Trennung eines Teils des Gärrestes. Das flüssige Rezirkulat wird dann dem Anmischbehälter bzw. den Fermentern zugeführt. Der verbleibende Gärrest wird als Dünger und Humusbildner auf die betriebseigenen Flächen ausgebracht. Das in den Fermentern gewonnene Biogas wird einer Gasreinigung (Entschwefelung und Trocknung) unterzogen und im Blockheizkraftwerk (BHKW) verbrannt. Über den Generator des BHKW wird Strom erzeugt und in das öffentliche Netz eingespeist. Die Abwärme des BHKW wird z.T. zur Beheizung des Prozesses verwendet. Der Großteil der Wärme steht für anderweitige Beheizungszwecke zur Verfügung.

5.3.3 Anlagenkonzepte zur Kraftstoffbereitstellung

Bio-SNG

Die analysierte Referenzanlage basiert aus technologischer Sicht auf der am Standort Güssing installierten Demonstrationsanlage. Die Technologie wurde jedoch auf eine kommerzielle Anlagengröße

($30 \text{ MW}_{\text{FWL}}$; etwa $18 \text{ MW}_{\text{SNG}}$) übertragen und an einen kommerziellen Anlagenbetrieb, wie unter anderem durch die Integration eines Brennstofftrockners, angepasst. Die Analyse wurde mit Hilfe eines auf der Basis der Software MATLAB® Simulink entwickelten Fließschemasimulationsprogramms durchgeführt. Das Programm bildet die thermodynamischen Berechnungsgleichungen der Prozesskomponenten der Referenzanlage ab und bietet auf diese Weise die Möglichkeit, alle wesentlichen Stoff- und Energieströme entlang der Prozesskette zu bilanzieren. Als Ergebnis dieser rechnergestützten Bilanzierung liegen dementsprechend Stoffströme, Stoffzusammensetzungen, Zustandsgrößen, Energieströme und deren entsprechende Temperaturniveaus an beliebigen Prozessstellen vor.

Bei der Modellanlage (siehe Abbildung 42) werden biogene Festbrennstoffe getrocknet, pelletiert und einem Zweibettwirbelschichtvergaser zugeführt. In diesem wird der Brennstoff unter der Zugabe von Wasserdampf als Vergasungsmittel bei etwa $850 \text{ }^\circ\text{C}$ atmosphärisch vergast. Die zur Vergasung notwendige Wärme wird dem Prozess durch zwischen dem Vergasungsreaktor und einer Brennkammer zirkulierendes Bettmaterial zugeführt. Das Bettmaterial wird in der Brennkammer durch die Verbrennung von zurückgeführtem Rohgas, unvergastem Koks und einer aus der Teerwäsche stammenden Teer-Rapsmethylester-Schlämme erhitzt. Um die Vergasung halmgutartiger Biomassen mit vergleichsweise niedrigen Ascheschmelztemperaturen wie Stroh zu ermöglichen, werden der Vergasung Additive zugeführt.

Nach der Vergasung wird das Rohgas gekühlt, mit einem precoatisierten Gewebefilter entstaubt und anschließend von Teeren befreit. Dabei werden die Teere mit Hilfe von gekühltem RME (Rapsmethylester) aus dem Gas gewaschen. Um die Katalysatoren der Methansynthese insbesondere vor Schwefelverbindungen zu schützen, wird das Gas nach der Teerwäsche und einer Gaskompression durch ein Aktivkohle- und ein Zinkoxidbett geleitet. Die Methansynthese erfolgt bei einem Druck von etwa 4 bar in einem Wirbelschichtreaktor, der durch ein Thermoöl gekühlt wird. Nach der Methanisierung wird das Gas getrocknet, von Kohlendioxid befreit und bis zum Einspeisedruck des Gasnetzes komprimiert. Die Gastrocknung erfolgt durch eine intensive Gaskühlung und Triethylenglykol. Zur Kohlendioxidentfernung kommt eine Aminwäsche zum Einsatz.

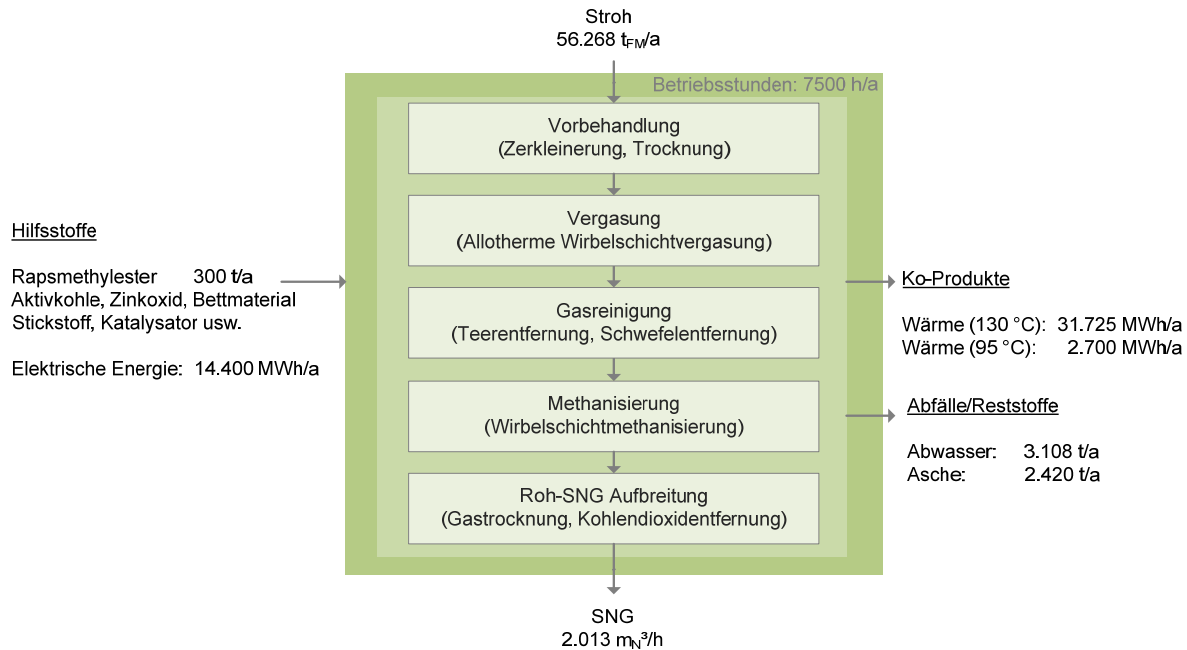


Abbildung 42: Verfahrensschema Bio-SNG

Ethanol

Technologien zur Produktion von Ethanol aus Stroh befinden sich in der Entwicklung sind noch nicht als wirtschaftlich betriebene Anlagen realisiert worden. Um dennoch Stoff- und Energiebilanzen für eine entsprechende Anlage abzuschätzen, wurde eine Konzeptstudie einer Anlage erstellt und eine Prozesssimulation durchgeführt. Die Prozessdaten beruhen auf Literaturwerten und eigenen Analysen. Das Referenzkonzept wurde so dimensioniert, dass sich ein Rohstoffeinsatz von 300.000 t/a Stroh ergibt. Das entspricht einer Ethanolproduktion von 38.000 t/a und somit der Produktionskapazität einer kleinen Ethanolanlage auf Zucker- oder Stärkebasis. Aufgrund der Herausforderungen bei der Strohlogistik und der noch jungen Technologie, erscheint dies derzeit als realistische Dimension für einen Einstieg in die industrielle Produktion von Ethanol aus Stroh.

Das Verfahrensschema zur Ethanolproduktion ist in Abbildung 43 dargestellt. Als erster Schritt wird das Stroh in einem Häcksler zerkleinert und mit Wasser eingeweicht. Die Suspension wird anschließend durch ein System aus Feststoffpumpen und Druckschleusen in einen Vorbehandlungsreaktor überführt. Dort wird durch Dampf mit Temperaturen von 180 bis 200 °C die widerstandsfähige Verbindung zwischen den Bestandteilen Zellulose, Hemizellulose und Lignin aufgebrochen. Dabei werden die Makromoleküle der Hemizellulose in einzelne Pentosemoleküle (C5-Zucker) zerlegt. Durch den Einsatz von Enzymen (Cellulasen) wird anschließend die Cellulose-Fraktion zu Glucosemonomeren (C6-Zucker) abgebaut. Anschließend werden die verbleibenden Feststoffe, welche im Wesentlichen das Lignin enthalten, durch Bandpressen abgetrennt.

Die Flüssigphase enthält die Glucose sowie die Pentosen, welche der alkoholischen Vergärung durch Hefen (*Saccharomyces cerevisiae*) zugeführt werden. Da die derzeit eingesetzten, robusten Brauereihefen nicht in der Lage sind Pentosen umzusetzen, kann nur die Glucose aus der Zellulose vergoren werden. An der Züchtung und Entwicklung von marktreifen, pentosevergärenden Hefen wird verstärkt gearbeitet. Nach der Fermentation wird ein Alkoholgehalt von etwa 5 – 8 % erreicht.

Um den Alkohol abzutrennen werden mehrere Destillationskolonnen eingesetzt. Diese werden auf unterschiedlichen Druckniveaus zwischen etwa 0,5 und 2 bar betrieben um eine möglichst effiziente Wärmenutzung zu gewährleisten. Durch die Destillation und die anschließende Entwässerung durch Molekularsiebe wird der Alkohol auf 99,5 % aufkonzentriert. Die übrigbleibende Schlempe hat einen Trockensubstanzgehalt von ca. 10 % und enthält die schwerflüchtigen organischen und anorganischen Verbindungen sowie Feststoffe aus dem Rohstoff und der Hefe. Durch eine mechanische Trennung mit einem Dekanter werden die Feststoffe aus der Schlempe abgetrennt und anschließend getrocknet. Aufgrund ihres Proteingehaltes ist ein Einsatz als Futtermittel denkbar. Von dem großen Massenstrom der Flüssigschlempe wird etwa die Hälfte in den Prozess zurückgeführt. Die andere Hälfte wird in anaeroben Fermentern behandelt, um die organischen Bestandteile zu Biogas abzubauen.

Die Energieversorgung der Prozesse mit Dampf- und Strom wird durch die Verbrennung des Ligninkuchens sowie von Teilen des Biogases aus der Schlempe sichergestellt. Überschüssiges Biogas ist für die Einspeisung ins Gasnetz vorgesehen.

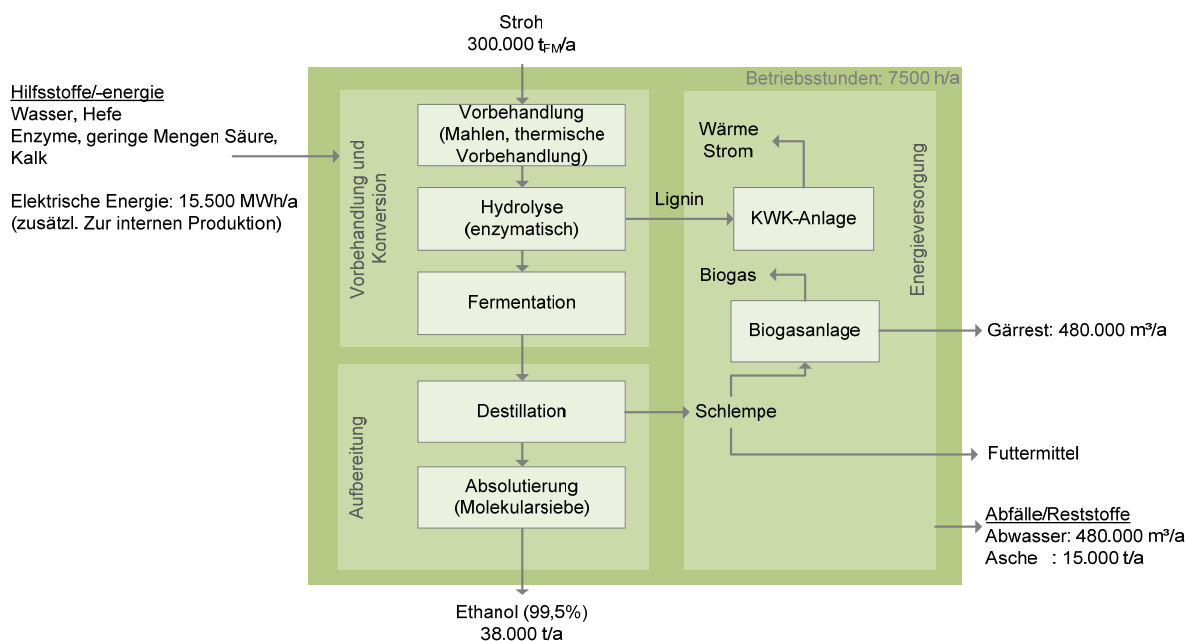


Abbildung 43: Verfahrensschema Ethanolproduktion

FT-Diesel

Von der Vielzahl von verfahrenstechnischen Ansätzen zur BtL-Produktion verfolgt gegenwärtig in Europa maßgeblich das KIT mit seinem bioliq®-Konzept den Einsatz von Stroh als Rohstoff. Daher wird dieses Konzept als Beispiel vorgestellt. Als Modellanlage dient ein skaliertes Modell aus Veröffentlichungen des KIT sowie aus dem EU-Vorhaben RENEW entsprechend adaptiert auf die Produktion von FT-Diesel. Dabei wurde ein Rohstoffeinsatz von ca. 4 Mio. t/a Stroh angenommen.

Das Konzept ist in Abbildung 44 dargestellt. In den dezentralen Pyrolyseanlagen erfolgt nach Trocknung und Feinzerkleinerung des Strohs die Flashpyrolyse (drucklos bei ca. 500 °C), wobei Doppelschnecken die Partikel und heißen Sand wie eine Pfropfenströmung durch den Reaktor bewegen. Anschließend wird als eine Mischung aus Pyrolysekoks und -kondensat ein Pyrolyseslurry (Suspension)

hergestellt. Die Bereitstellung der Prozessenergie erfolgt aus anfallendem Pyrolysegas und Pyrolyseslurry als Brennstoff für Kraftwerk und Dampferzeuger.

Nach Transport des Pyrolyseslurries zur zentralen Anlage und Vorwärmung erfolgt die Vergasung der Suspension in einem Flugstromvergaser bei 80 bar und etwa 1.200 °C mit Sauerstoff als Vergasungsmittel. Das gebildete Produktgas ist praktisch teerfrei und enthält nur sehr wenig Methan. Aus Asche wird eine abtropfende Schlackeschicht gebildet, welche die Vergaserinnenwand vor Korrosion schützt. Anschließend erfolgt die Abkühlung des Produktgases unter Erzeugung von Prozessdampf.

Die Aufbereitung zu Synthesegas erfolgt mehrstufig über Wasserwäscher und der ersten Stufe einer zweistufigen Rectisol-Wäsche, nach deren Durchlaufen eine Teilung des Gasstroms erfolgt. Während ein Teil direkt der Synthese zugeführt wird, durchläuft der andere Teil die Wasser-Gas-Shift-Reaktoren zur Wasserstoffbereitstellung für die Gaskonditionierung mit anschließender CO₂-Abtrennung in der zweiten Rectisol-Stufe. Die FT-Synthese findet in einem Suspensionsreaktor an Co-Katalysatoren statt, wobei frei werdende Wärme sowie nicht umgesetztes Synthesegas im Prozess energetisch in einer GuD-KWK-Anlage (Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk) genutzt werden.

Nach einer Trennung der Syntheseprodukte werden die Wachsfraktionen über Hydrocracking mittels Wasserstoff zu Diesel umgewandelt; Naphtha fällt als Koppelprodukt an. Zur Erhöhung der Kraftstoffausbeute ist ein autothermer Reformer für die Umsetzung von niederen Kohlenwasserstoffe (≤ C₅) aus der Synthese kommend zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid mit anschließender Wasserstoffabtrennung mittels Druckwechseladsorption vorgesehen. Zur Gewinnung des Vergasungsmittels Sauerstoff kommt eine Luftzerlegungsanlage zum Einsatz.

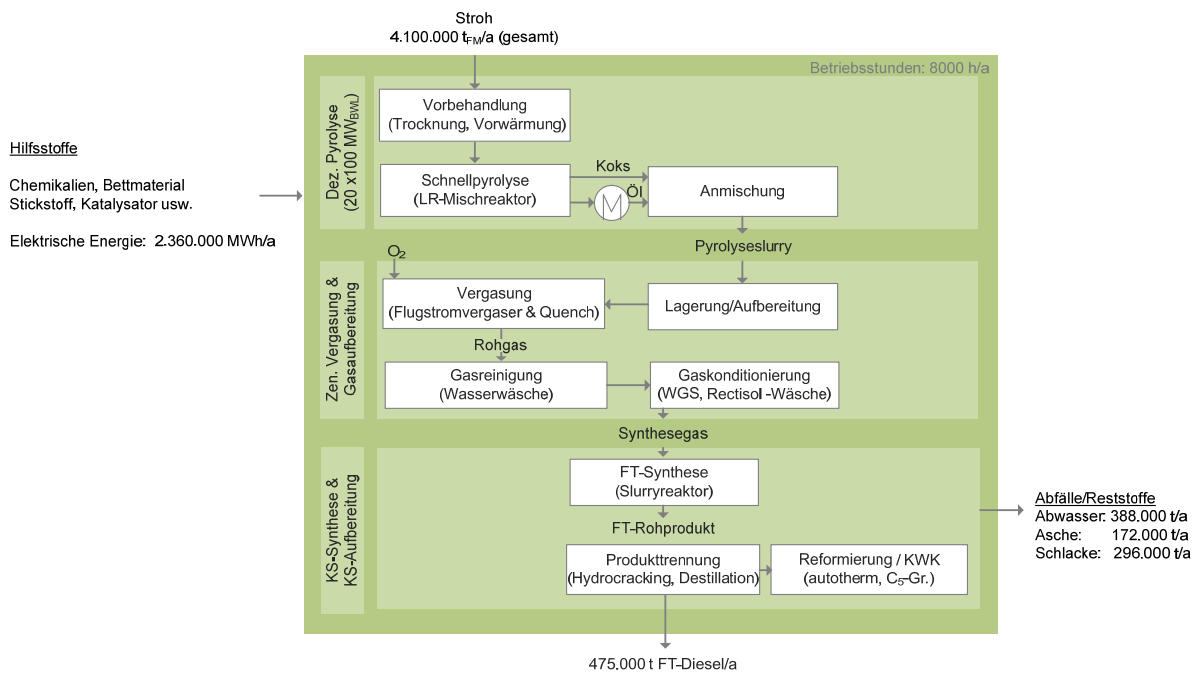


Abbildung 44: Verfahrensschema FT-Diesel Produktion

6 Technisch-ökonomische Analyse der Strohbergung

[Autor: Christian Weiser, TLL]

6.1 Einleitung

Stroh fällt als Nebenernteprodukt bei der Getreideernte an. Die möglichen Logistikketten zur Strohbereitstellung sind im Kapitel 4 beschrieben. In diesem Kapitel erfolgt die die Ermittlung der Kosten der Strohbergung bis zum landwirtschaftlichen Lager. Die Kostenanalyse für die Bereitstellung des Strohs bis zur Konversionsanlage ist im folgenden Kapitel beschrieben. Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Kosten der Strohbergung für eine Basisvariante mit einem Modell der TLL [104] und für eine optimierte Variante, angelehnt an dieses Modell, dargestellt. Die Ergebnisse werden hinsichtlich der Einflussfaktoren Betriebsgröße, Technik und Transportentfernung bewertet und darauf aufbauend Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt. Ein Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Nebenprodukten bzw. Reststoffen schließt die Betrachtung ab.

6.2 Methodik und Datenbasis

Die Berechnung der Kosten zur Strohbergung ist von den örtlichen Gegebenheiten (Ertrag, Schlaggröße), Technik (Anschaffungskosten, Leistung, Lebensdauer, Bergbarkeit, Schwadabstände), Nährstoffpreisen und den Betriebsmittelkosten abhängig. Die wichtigsten Parameter, welche den Berechnungen zu Grunde liegen, sind in Tabelle 22 dargestellt.

Bei der Bergung wird für das Stroh ein Trockensubstanzanteil von $\geq 86\%$ in der Frischmasse unterstellt. Für die Bergung auf einem 20 ha Schlag wird das Stroh nach dem Drusch durch den Mähdrescher in Abständen von 7 m auf Schwad gelegt. Ein wichtiger Parameter zur Berechnung der Bergungskosten ist die Menge des tatsächlich press- und bergbaren Strohs. Dieser Wert wird bestimmt durch den durchschnittlich nach Fruchtarten gewichtetem Kornertrag und den fruchtartspezifischen Korn-Stroh-Verhältnissen. Dieser Wert beträgt für den betrachteten Zeitraum (1999, 2003 und 2007) und die betrachteten Getreidearten 48 dt/ha. Die Menge des bergbaren Strohs vom aufgewachsenen Stroh beträgt nach Abzug der Stoppelhöhe und dem Anteil des nicht zu bergenden Kurzstrohs 30 dt/ha. In beiden berechneten Varianten wird dieser Strohertrag angesetzt. Unter Einsatz eines landwirtschaftlichen Schleppers (140 kW) mit gezogener Quaderballenpresse werden Strohballen mit den Maßen 2,2 x 0,9 x 1,2 m hergestellt. Die Ballen haben eine Pressdichte von 140 kg/m³ und ein Gewicht von 330 kg_{FM}. Die Leistung der Presse beläuft sich auf 30 – 40 ha/Einsatztag bzw. >1 000 ha/Kampagne.

Tabelle 22: Parameter, Preise und Leistungen für die Strohhäufung mit Quaderballenpresse (alle Preisangaben sind Nettobeträge ohne MwSt.) [104]

Position	Betrag	Bemerkungen
Schlepperleistung (Umschlag) (kW)	67	
Schlepperleistung (Presse) (kW)	140	
Pressdichte (kg /m ³)	140	Trockensubstanzanteil 85 %
Lebensleistung Presse (Ballen)	60.000	
Ballengröße B x H x L (m)	1,2 x 0,9 x 2,2	Breite x Höhe x Länge
Bindegarnverbrauch (kg/B.)	0,4	kg / Ballen
Ballenanzahl je Anhänger (Stck.)	10	20 Stck. / TE (Doppelzug)
Preis Bindegarn (€/kg)	1,8	
Preis Dieselkraftstoff (€/l)	0,8	
Bruttolohn (€/h)	9,1	Endgeldtarifvertrag
technologische Lohnnebenkosten (%)	50	
Zuschlag Allgemeinkosten (%)	40	
Zinssatz (%)	4%	
Reinnährstoffpreis N (€/kg)	0,9	0,5 kg/dt Stroh –FM
Reinnährstoffpreis P (€/kg)	1,7	0,13 kg/dt Stroh –FM
Reinnährstoffpreis K (€/kg)	0,7	1,41 kg/dt Stroh – FM
Reinnährstoffpreis Mg (€/kg)	0,7	0,12 kg/dt Stroh – FM
Schlaggröße (ha)	20	

Basisvariante

Die Strohballe werden nach dem Pressen auf einen an die Presse angehängten Ballensammelwagen abgelegt. Durch diesen wird das Stroh zu je zwei Ballen auf dem Feld vorkonzentriert. Diese Art der Ablage verringert die Ballenzwischenfahrzeiten und wirkt sich positiv auf die Leistung des Beladens auf dem Feld aus.

Für den Umschlag auf dem Feld und den Transport zum Lager bzw. zum Feldrand wird ein 67 kW Schlepper mit Frontlader und Ballenzange mit einkalkuliert. Zwei konventionelle Anhänger mit einer Länge von 5 m und einer Breite von 2,5 m bilden die Transporteinheit (TE). Damit können pro TE 20 Ballen bewegt werden. Die Lagerung findet am Feldrand bzw. an einem Zwischenlager statt. Die mittlere Transportentfernung bis zu diesem Punkt beträgt 5 km. Zum Umschlag am Feldrandzwischenlager bzw. zum Aufbau einer Feldmiete kommt ein Teleskoplader 67 kW zum Einsatz. Durch die Anzahl der Maschinen bzw. Transporteinheiten ist bei der Basisvariante mit einem Personalbedarf von 4 Arbeitskräften zu rechnen. Das für diese Variante angewendete Modell baut auf praxisnahen Verfahrensparametern, Betriebsmittelpreisen und Leistungen auf. Diese Daten stammen z.T. aus eigenen

Erhebungen der TLL. Für die Technik werden Kostenelemente des KTBL (AfA, Instandhaltung und Betriebsmittelverbrauch) angewendet [104][105][106][107].

Optimierte Variante

Die 2. Variante zeigt eine technisch optimierte Möglichkeit. Durch die Nutzung eines Ballenladewagens werden die Prozesse des Umschlages auf dem Feld und am Lager/Feldrand optimiert. Der Ballenladewagen kann im Gegensatz zu einem Ballensammelwagen Strohballen auf dem Feld automatisch aufnehmen, transportieren und mittels Kippvorrichtung als fertige Miete abladen. Dadurch können drei Arbeitskräfte eingespart werden. Ein vollbeladener Ballenladewagen benötigt laut Herstellerangaben mindestens einen 88-110 kW Schlepper. Alle anderen landwirtschaftlichen Geräte und Maschinen werden jedoch überflüssig. Der Anschaffungspreis beträgt je nach Modell 70.000 – 90.000 €. Neben Prüfberichten [108] und Herstellerangaben von Ballenladewagen liegen den Autoren wegen der geringen Verbreitung dieser Technik nicht ausreichend Praxisdaten vor, um eine Berechnung nach dem Modell [104] vorzunehmen. Es fehlen Daten zur Kampagne- und Lebensleistung sowie zu entstehenden Reparaturkosten dieser Geräte. Daher kann die optimierte Variante nur auf Basis einer Schätzung dargestellt werden.

Nährstoffausgleich

Mit der Abfuhr von Nebenernteprodukten wie Getreidestroh wird potenzieller Humusersatz abgefahren. Damit stehen die in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Vorteile der OBS vorerst nicht zur Verfügung. Zur monetären Bewertung dieses „Verlustes“ werden die im Getreidestroh enthaltenen Nährstoffe und die positive Wirkung, welche von der Wirkung als Humusersatz ausgehen kann, getrennt betrachtet.

Der monetäre Bruttowert der im Stroh abgefahrenen Nährstoffe (N) ist abhängig vom Reinnährstoffpreis (P), den fruchtartspezifischen Nährstoffgehalten (I) und der Menge des bergbaren Strohs (M_{Stroh}). Die Nährstoffgehalte sind in Tabelle 22 dargestellt. Da sich die Gehalte je nach Fruchtart vor allem bei Kalium und Magnesium unterscheiden, wurden zur Berechnung in unten stehender Gleichung die in Tabelle 22 dargestellten Mittelwerte für die betrachteten Getreidestroharten verwendet.

$$N = M_{\text{Stroh}} * I_{(N,P,K,Mg)} * P_{(N,P,K,Mg)} \quad \text{Gl. 10}$$

Humusersatzmaßnahmen

In [109] wird eine Reihe von Möglichkeiten zur Bewertung des monetären Wertes organischer Dünger für den ökologischen Landbau gegenübergestellt. Einerseits kann durch eine monetäre Bewertung des Ertrags durch Strohdüngung im Vergleich zu anderen Varianten eine Wertermittlung vorgenommen werden. Andererseits kann eine finanzielle Bewertung der positiven Effekte der OBS indirekt über notwendige Humusersatzmaßnahmen erfolgen. Liegt beim Verkauf von Getreidestroh ein negativer Humussaldo vor, werden zum Ausgleich der Bilanz Ersatzmaßnahmen wie die Umstellung der Fruchtfolge oder zusätzliche organische Dünger monetär bewertet.

Zur Verdeutlichung der Problematik werden ein Ansatz und eine Beispielrechnung von [110] verwendet. Für die Berechnung des Humusersatzwertes wird ein Betrieb mit 100 Milchkühen, 235 ha Ackerfläche und 15 ha Grünland skizziert. Der Betrieb verkauft 200 t Getreidestroh. Bei der Erstellung der betrieblichen Humusbilanz geht dieser Verkauf mit 16.000 kg Humus C (bei 80 kg Humus C/t Stroh)

negativ in die Bilanzierung ein. Die Kompensation dieses Defizits soll durch Anbau von zweijährigem Ackergras anstelle von Silomais, Anbau von Zwischenfrüchten und Kompostanwendung geschehen. Die damit einhergehenden Veränderungen in der Humusbilanz bei verstärktem Ackergrasanbau sind in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Erhöhung des Strohverkaufes und Humusbilanzausgleich durch Ackergrasanbau [110]

Kenngroße	Ausgangslage			Zusätzlicher Strohverkauf		
	ha	Häq.	Häq.	ha	Häq.	Häq.
Silomais	40	- 560	- 22.400	24,9	- 560	- 13.894
Zwischenfruchtanbau	40	240	9.600	24,9	240	5.974
Ackergras (2 jährig)				23,3	500	11.629
Grünland	15			15		
Getreide	135	- 280	- 37.800	131,1	- 280	- 36.717
Raps	60	- 280	- 16.800	60	- 280	- 16.800
Strohdüngung (dt)	6.925	8	55.400	4.732	8	37.853
Strohverkauf (dt)	2.885			4.885		
Gülledüngung (t)	2.000	6	12.000	2.000	6	12.000
Saldo Humuswirkung			0			0

Eine zweite Variante, die Humusbilanz im genannten Betrieb ausgeglichen zu gestalten, ist der vermehrte Zwischenfruchtanbau. Die humusmehrende Wirkung von Stroh ist jedoch im Vergleich zur Zwischenfrucht inkl. oberirdischen Aufwuchses von 20 t_{FM}/ha um 100 Häq. geringer. Daher sind für einen Ausgleich 57 ha der Ackerfläche mit Zwischenfrüchten zu bestellen. Kosten die dafür in Ansatz gebracht werden sind die Verfahrenskosten für den Senfzwischenfruchtanbau in Höhe von 120 €/ha.

Die dritte Möglichkeit, den nötigen Humusersatzes zu gewährleisten, ist die Anwendung von Fertigkompost. Bei einem TS – Anteil von 50 % und einer Humusreproduktion von 58 kg Humus C je t Kompost FM werden zum Ausgleich für das abgefahrene Stroh 280 t Kompost benötigt. Für die Berechnung der Kosten wird eine Applikation von 20 t FM auf 14 ha angenommen. Als Preis wird eine Spanne von 10 – 20 €/t FM unterstellt. Die Kosten zur Kompostanlieferung werden ebenfalls mit eingerechnet. Berücksichtigt wird, dass aus dem Kompost etwa 15 % des Stickstoffs und jeweils 100 % des Phosphors und Kaliums langfristig pflanzenverfügbar sind.

6.3 Ergebnisse

Die Summe aus den Verfahrenskosten für das Pressen, den Umschlag und den Transport zum Feldrand bzw. Feldrandlager betragen für die Basisvariante ~34 €/t_{FM} und ~28 €/t_{FM} für die optimierte Variante. Kommen die Nährstoffkosten von ~17 €/t_{FM} hinzu, ergeben sich Werte von 51 €/t_{FM} und 45 €/t_{FM}. Die Zusammensetzung dieser Kosten ist in Tabelle 24 dargestellt. Sehr hoch sind die Kosten für das Pressen. Sie betragen in beiden Varianten 19,80 €/t bzw. 6,60 €/Ballen.

Die Kosten für das Pressen verteilen sich wie folgt: 60 % Presse, 24 % Schlepper und 16 % Fahrer. Der Aufwand für Schlepper und Fahrer enthält Rüst- und Wegzeiten, jedoch keine witterungsbedingten Regiezeiten. Der Anschaffungspreis für die Quaderballenpresse beträgt 139.000 €. Die Presse hat eine Lebensleistung von 60.000 Ballen. Daraus resultiert eine Abschreibung von 1,60 €/Ballen. Der Bindegarnverbrauch geht mit 0,47 €/Ballen in die Rechnung ein.

Die Umschlags- und Transportkosten betragen in der Basisvariante 14,60 €/t und 7,90 €/t in der optimierten Variante. Der Aufwand für das Be- und Entladen sowie den Transport zum Feldrand ist in der Standardvariante durch die Bindung von zwei Umschlagslinien bei einer Entfernung von 5 km hoch.

Tabelle 24: Verfahrenskosten und Arbeitsaufwand der Strohbergung mit Quaderballenpresse

Position	Basisvariante	Optimierte Variante
Strohertrag (dt/ha)	3	3
Transportentfernung (km)	5	5
Pressen, inkl. Rüst- und Wegezeiten (Akh/ha)	0,4	0,4
Umschlag/Transport inkl. Rüstzeiten (Akh/ha)	0,99	nb.
Arbeitskräfte für Umschlag/Transport	4	1
Verfahrenskosten Pressen (€/t br.)	19,80	19,80
Verfahrenskosten Umschlag und Transport (€/ t br.)	14,60	7,90
Materialwert Stroh (€/t br.)	17,40	17,40
Summe (€/t)	51,80	45,10

Die Kosten beinhalten einen Allgemeinkostenzuschlag und Kosten für Schlepper mit Frontlader und Ballenzange sowie Teleskoplader. Der Hauptanteil der Kosten (> 50 %) resultiert aus den Aufwendungen für das Personal. Für die optimierte Variante werden 7,90 €/t Umschlag- und Transportaufwand veranschlagt. Die Nährstoffkosten betragen 17,40 €/t, wenn die im Stroh gebundenen Nährstoffe komplett angerechnet werden. Die Humusersatzkosten können unter Berücksichtigung der oben beschriebenen betrieblichen Rahmenbedingungen und je nach der Wahl der Humusersatzmaßnahme für eine Tonne Stroh zwischen 15,50 – 40 € liegen.

Beim Humusersatz durch die Substitution von Maissilage durch Ackergrassilage ist im angegebenen Beispiel mit einem Gewinnrückgang von 3.105 € zu rechnen (Tabelle 25). Verantwortlich sind die höheren Stückkosten von Grassilage gegenüber Maissilage. Dieser Gewinnrückgang entspricht den Kosten für einen zu leistenden Humusersatz. Umgerechnet auf die Tonne Stroh entspricht das einem Humuswert von 15,50 €/t Getreidestroh [110].

Tabelle 25: Mindeststrohpreis bei Humusbilanzausgleich des Strohverkaufs durch Ackergrasanbau [110].

Kenngröße	Ausgangslage	Variante 2
Gewinnbeitrag Getreide, Raps, WZF (€/Betrieb)	26.400,00	27.595,00
Gewinnbeitrag Milchvieh (€/Betrieb)	- 12.400,00	- 16.700,00
Gewinneinbußen		3.105,00
zusätzliche Humusersatzkosten (€/t Stroh)		15,50

Wenn der Humusbilanzausgleich mit Fertigkompost (TS 50 %) durchgeführt wird, sind abhängig vom Komposteinkaufspreis die Strohkosten jeweils mit 25,30 – 39,10 €/t hinzuzurechnen. Wie in Tabelle 26 dargestellt, sind Kompostpreis, Transportentfernung und Nährstoffpreis die entscheidenden Einflussgrößen. Wenn der Humusersatz durch Zwischenfruchtanbau sichergestellt wird, ist mit 34,20 €/t Stroh an zusätzlichen Kosten zu rechnen [110].

Tabelle 26: Mindeststrohpreis bei Humusbilanzausgleich des Strohverkaufs durch Kompostdüngung [110]

	Marktpreis Kompost (€ je t Kompost FM)		
	10,00	15,00	20
Kosten Kompost (€/ha)	200,00	300,00	400
Transport zum Feldrand (30 km) (€/ha)	240,00		
Kosten der Ausbringung (€/ha)	64,00		
Nährstoffwert (€/ha)	-130,00		
Einsparung der Mineraldüngerapplikation (€/ha)	-7,00		
Bereinigte Kosten (€/ha)	368,00	468,00	568,00
Kompostausbringung (€/t Kompost FM)	18,40	23,37	28,37
Zusätzlich Humusersatzkosten (€/dt Stroh)	2,53	3,22	3,91

6.4 Diskussion

Bei der Bewertung der Strohbereitstellungskosten sind die konkreten betrieblichen Verhältnisse entscheidend. Die ermittelten Preise gelten daher nur für die unterstellten Parameter. In der Praxis können die Kosten stark schwanken. Dies zeigt auch ein Literaturvergleich in Abbildung 45 von aktuell verfügbaren und oben angestellten Berechnungen zur Strohbereitstellung. Den genannten Quellen liegen teilweise abweichende Annahmen zu Ertrag, Schlaggröße und Technik sowie zeitlich bedingt andere Betriebsmittel- und Nährstoffpreise zugrunde.

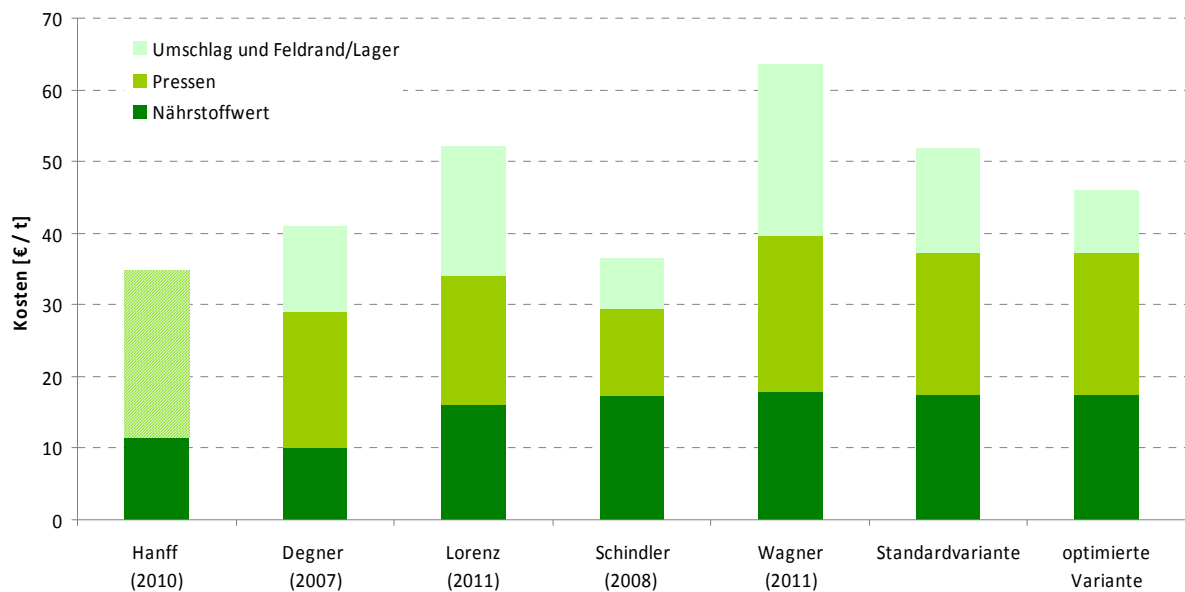


Abbildung 45: Berechnung der Bergungskosten bzw. Preiskalkulationen verschiedener Autoren [110] [105][111][112][113]

Wird unterstellt, dass große Betriebe gleichzeitig auch größere Schläge und kleinere Betriebe dementsprechend kleinere Schläge bewirtschaften, hat der Faktor Betriebsgröße einen deutlichen Einfluss auf die Kosten der Strohbergung.

Für alle Schläge < 20 ha steigen die Kosten für eine Tonne Stroh an, je kleiner der Schlag wird. Aus Abbildung 46 geht hervor, dass der Zeitbedarf beim Strohpressen mit einer Quaderballenpresse um das Doppelte bei einem 2 ha Schlag und um das Dreifache bei einem 1 ha Schlag im Vergleich zu Schlägen > 10 ha ansteigt. Des Weiteren erhöhen sich die Maschinenkosten pro Tonne Stroh ab Schlägen < 20 ha. Diese Unterschiede sind durch den Einfluss des Vorgewendes sowie durch Rüst- und Wegzeiten begründet.

Weiterhin hat die Betriebsgröße maßgeblichen Einfluss auf die verwendete Technik. Das beginnt schon beim Einsatz des Mähdeschers. Durch die Wahl eines Mähdeschers mit großem Schneidwerk in größeren Betrieben können die Schwadabstände bis zu 11 m betragen. Damit verbessert sich die Flächenleistung der Presse. Kleinere Betriebe müssen eher abwägen, welche Technik zur Verfügung steht und welche Maßnahmen durchgeführt werden können. Werden z. B. in der Basisvariante die 2 Umschlagslinien wegen fehlenden Personals oder nicht vorhandener Technik nicht genutzt, entstehen unnötige Wartezeiten an den Umschlagmaschinen und damit höhere Kosten. Die optimierte Variante zeigt gerade in diesem Prozessschritt durch die Integration des Ballenladewagens Einsparpotentiale auf. Diese resultieren im Wesentlichen aus den geringeren Personalkosten. Genau wie die Investition in einen Ballenladewagen ist auch die Anschaffung einer Quaderballenpresse für kleinere Betriebe alleine nicht sinnvoll oder oft nicht möglich.

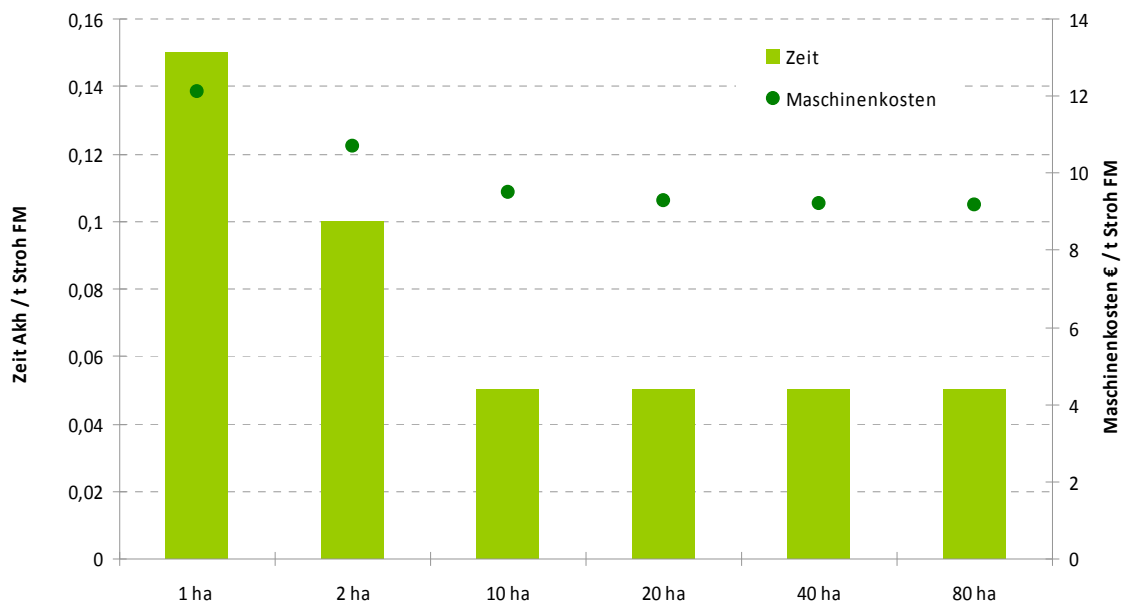


Abbildung 46: Beziehung zwischen Zeitbedarf beim Strohpressen mit Quaderballenpresse und Schlaggröße und Maschinenkosten (Abschreibung, Zinsansatz, Versicherung, Reparaturen und Betriebsstoffe) und Schlaggröße bei einem Strohertrag von 4 t und einem Schwadabstand von 7m [107]

Durch eine in der Anschaffung deutlich günstigere Rundballenpresse können die Kosten für das Pressen in der Standardvariante um 1 €/t im Vergleich zu Quaderballen gesenkt werden. Der Umschlag und Transport zum Feldrand/Lager würden in einer Rundballenlinie aufgrund der geringeren Dichte und Ausnutzung der Transportkapazitäten ca. 9 €/t teurer werden. Andererseits können durch eine Quaderballenpresse mit einer noch höheren Pressdichte die Umschlags-, Transport- und Lagerkosten optimiert werden. Da in Deutschland überwiegend Quaderballenpressen mit den Kanalmaßen 70 x 120 bis 90 x 120 cm eingesetzt werden ist bei derzeitiger Technik keine weitere Optimierung durch andere Ballengrößen zu erwarten.

Kann der bergbare Strohertrag z. B. durch die Technik von 3 t/ha um 50 % erhöht werden, nehmen die spezifischen Kosten für das Pressen um 2 €/t ab. Damit wären gleichermaßen eine Zunahme der Umschlagsleistung und geringere Kosten von 0,5 €/t verbunden. Durch die Verwendung von abgeschriebenen Gebrauchsmaschinen zum Transport können die Kosten ebenfalls sinken.

Wenn die Transportentfernung zum Feldrand/Lager kleiner wird, sind in der Standardvariante bis zu 20 % weniger Kosten für Transport und Umschlag zu veranschlagen. Es kann in diesem Fall auf eine zweite Umschlagslinie verzichtet werden und die benötigten Arbeitskräfte werden auf zwei reduziert.

Die Einsparung des Strohhackers oder zusätzliche mineralische Stickstoffgaben zur Beschleunigung der Strohhrotte bleiben bei der durchgeführten Berechnung unberücksichtigt. Weiterhin wurden bei der Berechnung des Nährstoffwertes keine N-Verluste berücksichtigt. Werden diese mitkalkuliert (40 % N - Verlust), betragen die Nettonährstoffkosten des Strohs 15,60 €/ t_{FM}. Nicht betrachtet wird der Einfluss der Motivation und Erfahrung der eingesetzten Arbeitskräfte. In diesem Punkt könnten große Potenziale infolge geringerer technologischer Lohnnebenkosten liegen.

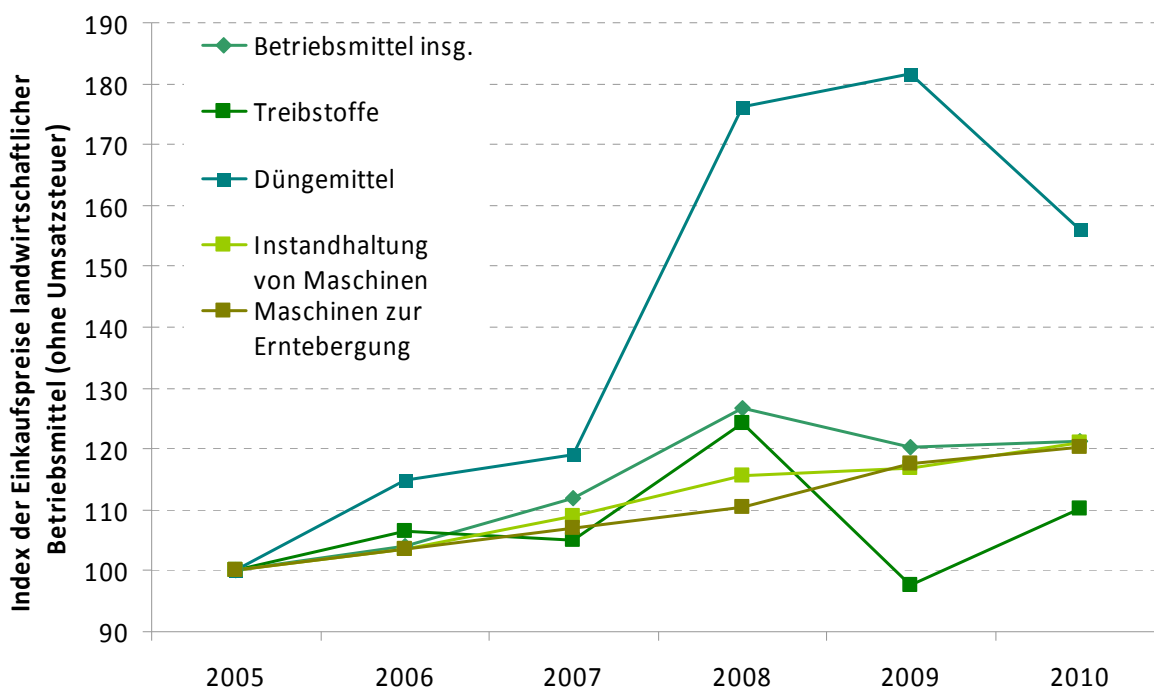


Abbildung 47: Index der Einkaufspreise für landwirtschaftliche Betriebsmittel (ohne Umsatzsteuer) 2005 - 2010 [114]

Die bisherigen Ausführungen sowie die Kosten der optimierten Varianten zeigen, dass große Einsparpotenziale vor allem in größeren Betrieben mit großen Schlägen zu erwarten sind. Nur in diesem Bereich lohnt auch der Einsatz entsprechender Technik wie Ballenladewagen und größerer Schneidwerke.

Werden die einzelnen Kostenpositionen der Berechnungen zu Strohbereitstellungskosten aus Abbildung 45 und die Entwicklung der Preisindizes der landwirtschaftlichen Betriebsmittel der letzten Jahre betrachtet, kann festgestellt werden, dass die technologischen Kosten (Lohn- und Maschinenkosten) nur geringen Veränderungen ausgesetzt sind. Die Preise für Mineraldünger schwanken jedoch in kürzester Zeit stark und sind in den letzten Jahren, wie in Abbildung 47 dargestellt, drastisch gestiegen. Im Detail ist eine Steigerung bei den Stickstoff- und Phosphatdüngern von 2000 bis 2009 um das Dreifache und bei Kalidünger um das Zweieinhalb-fache zu verzeichnen [114]. Wegen der energieaufwendigen Herstellung von Stickstoffdüngern und den endlichen Phosphorreserven ist nicht davon auszugehen, dass die Preise langfristig sinken.

Bezüglich der Bestimmung des Humuswertes des Getreidestrohs hat sich gezeigt, dass im dargestellten Beispiel der Humusersatz des abgefahrenen Strohs durch den Anbau von Ackergras am günstigsten ist. Die tatsächlichen Möglichkeiten und Kosten sind jedoch betriebspezifisch zu prüfen.

Im Vergleich zu anderen Reststoffen bzw. Nebenernteprodukten hat Stroh den Vorteil, dass es nach der Ernte mit einem Wassergehalt von ~ 14 % anfällt und damit nahezu trocken ist. Das Rübenblatt im Vergleich enthält bei der Ernte ~ 82 % Wasser. Im Gegensatz zu Rübenblatt und Kartoffelkraut existiert bei Stroh mit der Ballenlinie außerdem eine technologische Kette zur Bereitstellung dieses Substrates.

Die Kette zur Gülle- und Festmistausbringung ist zwar ebenfalls etabliert, hier wirken sich jedoch der hohe Wassergehalt und der geringere Energiegehalt dieser Substrate auf die Transportwürdigkeit aus (vgl. Tabelle 27).

Tabelle 27: Vergleich organischer Dünger und Nebenernteprodukte [115][91]

Substrat	Biogasertrag (m ³ /t _{FM})	Methangehalt (%)	Heizwert (MJ/t _{FM})	Dichte (t/m ³)	Energiedichte (MJ/m ³)
Rindergülle	25	60	538	1	538
Schweinegülle	28	65	653	1	653
Rindermist	45	40	646	1	646
Schweinemist	60	60	1.292	1	1.292
Rübenblatt	70	54	1.357	1	1.357
Hühnermist	80	60	1.723	1	1.723
Getreidestroh	-	-	14.300	0,14	2.002

Durch die Bergung von Getreidestroh zum Verkauf außerhalb des Betriebes kann sich abhängig von der Witterung der zeitliche Druck für die Nachbestellung der Schläge erhöhen. Dieser Aspekt wurde nicht berücksichtigt.

7 Technisch-ökonomische Analyse der Gesamtkonzepte

[Autoren: Kay Schaubach (DBFZ), Martin Zeymer (DBFZ)]

7.1 Einleitung

Eines der wichtigsten Bewertungskriterien für den Einsatz des Reststoffes Stroh zur Energieversorgung ist die Kostenbetrachtung der einzelnen Anlagenkonzepte. Im Rahmen des Projektes werden hierfür die Gestehungskosten des jeweiligen Hauptproduktes errechnet und verschiedenen Referenzen gegenübergestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die vorgenommenen Berechnungen auf innovativen Konzepten beruhen, denen aufgrund fehlender Erfahrungswerte teilweise theoretische Annahmen zugrunde gelegt werden mussten. Besonders bei den zukünftigen Kraftstoffpfaden bestehen hier große Unsicherheiten. Die dargestellten Zahlen geben daher lediglich eine Größenordnung an, in der sich die jeweiligen Gestehungskosten bewegen können. Sensitivitätsanalysen untersuchen die Auswirkungen von Änderungen wichtiger Parameter wie Volllaststunden, Rohstoffkosten und Investitionssummen, um hier zum einen mögliche Spannbreiten aufzuzeigen, zum anderen, um die empfindlichsten Parameter zu identifizieren.

Die wirtschaftliche Machbarkeit einer einzelnen Anlage hängt von den Gegebenheiten des Standortes sowie von den zukünftigen Rahmenbedingungen ab, wie zum Beispiel erzielbare Marktpreise, Förderungen oder rechtliche Bestimmungen. Diese Faktoren sind nicht in den Gestehungskosten abgebildet. Für die einzelnen Konzepte erfolgen qualitative Beschreibungen der jeweiligen Markteinschätzung. In den KWK-Konzepten wird Strom bereitgestellt, der nach EEG eingespeist werden kann. Daher wird für diese Anlagen eine Vergütung nach EEG in die Berechnung einbezogen. Liegen die Gestehungskosten unter dem jeweiligen Vergütungssatzes des EEG, ist das ein Indiz für die Wirtschaftlichkeit dieses Anlagenkonzepts.

Die sich anschließende Berechnung der Treibhausgas-Vermeidungskosten fügt diesen betriebswirtschaftlichen Betrachtungen eine volkswirtschaftliche Dimension hinzu. Anhand der Treibhausgas-Vermeidungskosten (THG-Vermeidungskosten) kann ausgesagt werden, mit welcher Strohverwertung sich die Treibhausgase volkswirtschaftlich am vorteilhaftesten vermeiden lassen. Auch hier ist die Wahl der Referenz (die durch die Stroh-Anlage substituierte Energieerzeugung) entscheidend, da sowohl die Gestehungskosten als auch die THG-Emissionen der substituierten Referenz die Vermeidungskosten stark beeinflussen.

7.2 Methodik und Datenbasis

7.2.1 Annuitätenmethode zur Anlagenwirtschaftlichkeitsberechnung

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit erfolgt auf Basis der Annuitätenmethode in Anlehnung an die Richtlinie VDI 6025. Unter Berücksichtigung von Ersatzbeschaffungen und Kostensteigerungen werden bei diesem Verfahren einmalige und laufende Zahlungen über einen vorgegebenen Betrachtungszeitraum in gleichmäßige jährliche Einnahmen und in gleichmäßige jährlichen Kosten überführt. Die Differenz ergibt die Annuität. Die Annuität ist somit ein jährlicher Gewinn bzw. bei negativem Vorzeichen ein jährlicher Verlust in €/a. Für eine thematisch relevante Darstellung der betrachteten Anlagen im Vergleich zu anderen Energiesystemen werden die spezifischen Produktionskosten, oder auch Gestehungskosten genannt, bestimmt. Sie ergeben sich aus dem Verhältnis der Summe der jährlichen

Kosten in €/a zu der jährlich bereitgestellten Energiemenge in Kilowattstunden (kWh/a). Eine Übersicht zur dargestellten Methodik zeigt Abbildung 48.

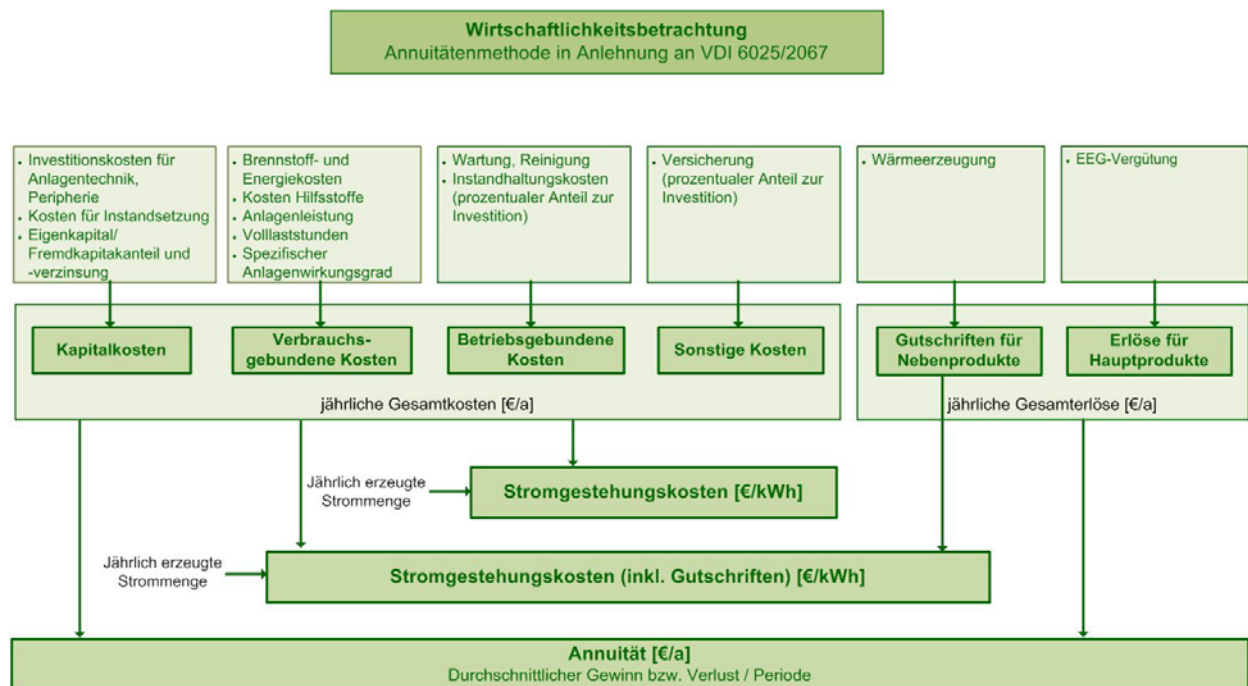


Abbildung 48: Übersicht zur Methodik der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Bioenergieanlagen

Die für die Berechnungen benötigten anlagenspezifischen Parameter und Kostenansätze basieren auf Angeboten, Veröffentlichungen und Erfahrungswerten. Für Anlagen oder Anlagenteile, für die keine Erfahrungswerte vorliegen, wurden Prozesssimulationen durchgeführt, welche die Energie- und Stoffströme abbilden. Die angesetzten Kosten (kapitalgebundene, betriebsgebundene und verbrauchsgebundene Kosten) spiegeln durchschnittliche Werte wider. Dabei gilt zu beachten, dass diese Kosten für den individuellen Anwendungsfall in der Praxis von den hier repräsentierten Modellfällen abweichen können, da oftmals spezifische Standortbedingungen vorliegen und real gezahlte Preise für z. B. Substrate häufig einer großen Spannweite unterliegen.

Die Kostenberechnungen beziehen sich auf das Jahr 2010. Eine Anpassung der Kosten auf das Jahr 2020 aufgrund z. B. möglicher Skalen- und Mengeneffekte oder sich ändernder Rohstoffmärkte erfolgte nicht. Die Referenzwerte, mit denen die Kosten verglichen werden, variieren bezüglich der zugrunde gelegten Annahmen (zum Beispiel für Volllaststunden und Rohstoffpreise). Daher sind die fossilen Referenzen ebenso wie die Kostenberechnungen der Strohkonzepte lediglich als Indikatoren für die Größenordnungen zu verstehen.

Die Sensitivitätsanalysen variieren einzelne Parameter und zeigen die Auswirkungen auf die Gestehungskosten auf. Mögliche indirekte Auswirkungen auf andere Parameter (z. B. Verringerung des Wartungsaufwandes durch Verringerung der Volllaststunden) fließen in die Berechnungen nicht mit ein.

7.2.2 Treibhausgasvermeidungskosten

Die Berechnung der THG-Vermeidungskosten ist in Gl. 11 dargestellt. Hierbei geht es um die Aussage, welche Mehrkosten die regenerative Energiebereitstellung gegenüber der fossilen Referenz aufweist und welche THG-Einsparungen diesen Mehrkosten gegenüberstehen. Die Mehrkosten der betrachteten

Modellanlage werden so den THG-Einsparungen gegenübergestellt. Im Rahmen dieser Studie erfolgte der Vergleich mit mehreren Referenzen, da nicht immer eindeutig zuzuweisen ist, welche Energiebereitstellung durch die Modellanlage möglicherweise ersetzt wird. Die Gegenüberstellung der THG-Vermeidungskosten der einzelnen Modellanlagen erlaubt eine Aussage über die volkswirtschaftlich günstigste Alternative der THG-Vermeidung. Dies ist ein weiteres Kriterium zur Bewertung der Energiebereitstellung aus Biomasse.

Eine betriebswirtschaftliche Aussage durch die Treibhausgasvermeidungskosten kann bei konkreten Anlagenplanungen über den Vergleich mit den Kosten für Emissionsberechtigungen getroffen werden. Nähern sich bei einem direkten Vergleich zweier Anlagen diese den THG-Vermeidungskosten an, liegen auch die Gestehungskosten der verglichenen Anlagen in der gleichen Größenordnung. Die Höhe der Kosten für Emissionsberechtigungen für eine konkrete Anlage richtet sich nach ausgegebenen Berechtigungen, eventuellen Überschüssen oder Fehlmengen sowie nach den erwarteten Preisen für die Berechtigungen. Der Durchschnittspreis der in Deutschland ausgegebenen Emissionsberechtigungen in den ersten drei Quartalen 2011 betrug 14,56 €/t CO₂ [116] und liegt derzeit bei 6,68 €/t CO₂ (EEX, Stand 17.01.2012) [117].

Gl. 11: Berechnung der Treibhausgasvermeidungskosten

$$C_{THG} = \frac{C_{EE} - C_{Fo}}{e_{Fo} - e_{EE}} = \frac{\Delta C}{\Delta e}$$

C_{THG} :	Treibhausgasvermeidungskosten
C_{EE} :	Gestehungskosten Erneuerbare-Energien-Anlage
C_{Fo} :	Gestehungskosten fossile Referenz
e_{Fo} :	Treibhausgasemissionen fossile Referenz
e_{EE} :	Treibhausgasemissionen Erneuerbare-Energien-Anlage

7.2.3 Referenzsysteme

Die Gestehungskosten der Modellanlagen wurden je einer fossilen und einer biogenen Referenz gegenübergestellt, welche die Modellanlage am wahrscheinlichsten ersetzen würde. Die dafür benötigten Werte stammen, wo angemessen, aus der Leitstudie 2010 des BMU [118], insb. den Datenanhang II [119]. Dieser konstatiert mehrere Preispfade, von denen Preispfad A „deutlich“ in diese Studie einfluss. Die Wahl dieses Pfades mit den höchsten Preissteigerungen soll der Volatilität sowohl der fossilen als auch der biogenen Rohstoffpreise Rechnung tragen.

Die Referenzwerte basieren auf Annahmen, die von denen in diesem Projekt an einigen Stellen abweichen, was bei der Interpretation beachtet werden muss. Besonders die Unterschiede der angesetzten Volllaststundenzahl der einzelnen Anlagen sind hier von Bedeutung, da diese einen sehr großen Einfluss auf die Gestehungskosten haben. Weiterhin gibt es Unterschiede im angesetzten Zinssatz, der jedoch nach den Sensitivitätsanalysen nur einen begrenzten Einfluss auf die Gestehungskosten hat, sowie bei den Gutschriften für Wärme. Die Leitstudie setzt hier 3,7 im Gegensatz zu 3,0 ct/kWh an.

Unter den Begriff „Biomasse“, der in Verbindung mit den Feuerungstechniken genannt wird, subsummiert die Leitstudie biogene Festbrennstoffe, speziell „Pellets, Hackschnitzel, Stroh, etc.“ [118].

Da Stroh, wie diese Studie darlegt, noch nicht umfangreich genutzt wird, kann für die entsprechenden Referenzen der überwiegende Einsatz von Holz als Brennstoff ausgegangen werden.

Nicht in der Leitstudie enthalten sind die genauen Einzelpositionen v.a. der Investition. Dies ist besonders für die Bewertung der Pellet- und Strohfeuerung wichtig, da hier zusätzlich eingerechnete Investitionen wie zum Beispiel der Umbau der Kellerräume und des Schornsteins großen Einfluss auf die Investitionssummen haben (siehe Abschnitte Pelletsfeuerung und Strohfeuerung 400 kW). Die Leitstudie verwendet den Begriff „Investitionskosten“ synonym zu „Kapitalkosten“. Die Berechnungen im Rahmen dieses Projektes differenzieren im Gegensatz dazu zwischen den Begriffen. Investitionskosten umfassen die durch die Errichtung der Anlage verursachten Kosten. Sie sind Teil der Kapitalkosten, welche zusätzlich Instandhaltungskosten und Ersatzinvestitionen während des Betrachtungszeitraumes sowie die Kapitalverzinsung beinhalten. Im Folgenden werden daher die Begriffe nicht synonym verwendet. Die spezifischen Investitionskosten geben die Investitionskosten pro installierter Leistungseinheit an (z.B. €/kW). Auch diese Kosten beziehen sich auf die Investitionskosten im engeren Sinne, nicht auf die Kapitalkosten.

Die Stromgestehungskosten der fossilen Referenzen des Stroh-HKW sowie der Biogasanlage beinhalten keine Kosten für CO₂-Emissionen. Diese werden lediglich in den Grafiken mit dargestellt. Das Braunkohlekraftwerk mit Dampfturbine wurde für die Biogasanlage als Referenz gewählt, da beide nach derzeitigen Fahrweisen Grundlaststrom erzeugen. Die Wahl der fossilen Referenz für das Stroh-HKW fiel auf ein Erdgas-GuD, welches eine hocheffiziente heutige Technologie darstellt, die sowohl Wärme als auch Strom bereitstellt, vorwiegend zur Deckung der Mittellast eingesetzt wird und wahrscheinlich stärker zum Einsatz käme, wenn nicht die erneuerbaren Energien im Fokus stünden (Second-Best-Alternative bzw. Grenzbetrachtung).

Bei der Bio-SNG-Anlage wurden nicht die Gestehungskosten von fossilem Erdgas zum Vergleich herangezogen, sondern dessen Grenzübergangspreis. Dieser Ansatz bezieht die Verfügbarkeit des Erdgases in Deutschland mit ein, was die Vergleichbarkeit mit Bio-SNG verbessert. Nach § 20a der Gasnetzentgeltverordnung (GasNEV) erhalten Transportkunden (Biomethan-Einspeiser) ein pauschales Entgelt von 0,7 ct/kWh für vermiedene Netzkosten. In den Gestehungskosten des Bio-SNG fallen diese nicht an, da Bio-SNG produktionsnah verbraucht wird und damit die physikalische Transportentfernung zum Verbraucher vernachlässigbar ist. Daher erfolgt eine Erhöhung des Grenzübergangspreises von Erdgas, um diese Besonderheit in die Kalkulation einzubeziehen. Die biogene Bio-SNG-Referenzanlage wurde in einer früheren Studie des DBFZ betrachtet [120], womit eine sehr gute Vergleichbarkeit aufgrund sehr ähnlicher Annahmen gegeben ist.

Die biogene Referenz für Fischer-Tropsch-Diesel entstammt der dena-Studie „Biomass to Liquid – BtL Realisierungsstudie“ [121], die als Substrat einen Mix aus Hölzern, Reststroh, tierische Biomasse und Energiepflanzen unterstellt. Wesentliche Unterschiede zur hier betrachteten Anlage ist das zentrale Konzept, die geringere Verarbeitungskapazität von 1 Mio. t Frischmasse pro Jahr sowie die niedrigere Volllaststundenzahl von 7000 h/a.

Der Hafen von Rotterdam ist der größte Hafen Europas mit einem jährlichen Güterumschlag von über 400 Mio. t, davon rund 177 Mio. t Rohöl und flüssige Mineralölprodukte (Stand 2010) [122]. Am Spotmarkt in Rotterdam werden wesentliche Mengen der in Europa benötigten Erdölprodukte gehandelt und sind damit wichtig für die Preisbildung. Über den Hafen von Rotterdam läuft ebenso der größte

Import an Bioethanol in die EU [123]. Die Preise verstehen sich „Free On Board“ (FOB), das heißt, der Käufer muss für sämtlichen weitere (Transport-)Kosten seiner gekauften Ware vom Hafen aus aufkommen. Dies ist mit den in dieser Studie berechneten Gestehungskosten deckungsgleich, da auch diese ab Werk gelten. Aufgrund der Bedeutung der Preise des Spotmarktes Rotterdam wurden die hier ausgehandelten Preise für Diesel, Superbenzin und Ethanol als Referenzen herangezogen.

7.3 Ergebnisse

Die folgenden Kapitel stellen im ersten Schritt ergänzend zu den technischen Konzepten in Kapitel 5 die kostenrelevanten Annahmen dar. Im Anschluss erfolgt die grafische und textliche Auswertung der Kostenberechnung pro Anlagenkonzept.

7.3.1 Strohbergungskosten und -bereitstellungskosten

Neben den technologischen Besonderheiten der Strohkonversion und den damit verbundenen Mehrkosten spielen die Aufwendungen für die Strohbereitung (zum Beispiel Bergung, Transport) eine herausragende Rolle bei den Kostenbetrachtungen. Daher wurde im Projekt eine Methode entwickelt, nach der die verschiedenen Logistikkonzepte für verschiedene Rohstoffbedarfe detailliert berechnet werden konnten. Hierbei handelt es sich um eine Vollkostenrechnung, die unter anderem den Nährstoffentzug in Höhe von circa 17 €/t Frischmasse sowie sämtliche Logistikkosten einbezieht.

Die Bereitstellungskosten (frei Anlage) sind in Tabelle 28 zusammengefasst. Neben der Basisvariante, die die mittleren Kosten für jede Konversionsanlage darstellt, wird auch eine optimierte Kostenrechnung gezeigt, die vom konsequenten Einsatz der jeweils günstigsten Variante der einzelnen Prozessschritte ausgeht.

Tabelle 28: Strohbereitstellungskosten für die verschiedenen Anlagenkonzepte (FM: Frischmasse, Bezugsjahr 2010)

Konzept	Bereitstellungskosten frei Anlage (Basis) (€/t _{FM})	Bereitstellungskosten frei Anlage (optimiert) (€/t _{FM})
Strohfeuerung (400 kW)	63,07	55,14
Biogas (500 kW _{el})	75,97	65,72
Stroh-HKW (2,3 MW _{el})	78,66	68,37
Pelletierwerk	81,87	71,59
Bio-SNG Anlage (30 MW)	82,37	72,08
20 Pyrolyseanlagen, anschließende FT-Diesel-Produktion (20x100 MW)	88,99	78,62
Ethanol Anlage (156 MW)	92,48	82,07

Die folgende Grafik (Abbildung 49) zeigt die Strohbereitungskosten sowohl in der Basis- als auch in der logistikoptimierten Variante im Vergleich für die einzelnen Konversionspfade.

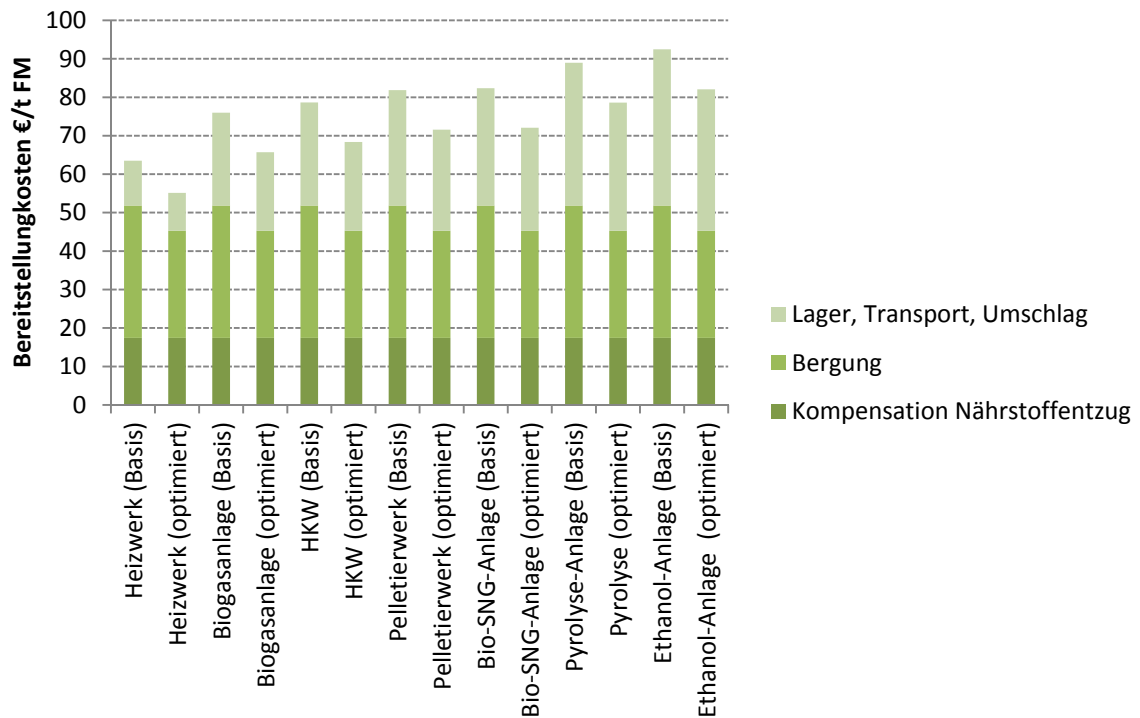


Abbildung 49: Strohbereitstellungskosten der einzelnen Konversionspfade für die Logistikoptionen Basis und optimiert (Bezugsjahr 2010)

7.3.2 Wärmebereitstellung

In Tabelle 29 sind die wichtigsten Parameter für die Berechnung der Gestehungskosten dargestellt, die die Grundlage der Kostenberechnung der Wärmepfade bilden.

Tabelle 29: Parameter der Gestehungskostenberechnung – Wärmekonzepte (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Parameter	Pelletsfeuerung 40 kW (kommerzielle Nutzung)	Strohfeuerung 400 kW
Vollbenutzungsstunden pro Jahr	2.500 h/a	2.500 h/a
Kapitalgebundene Kosten		
Investitionssumme I_0	20.630 €	284.482 €
Kalkulatorischer Mischzinssatz	8 %p.a.	8 %p.a.
Instandsetzung	$(2,8 \% \cdot I_0)/a$	$(2,4 \% \cdot I_0)/a$
Betrachtungszeitraum	20 a	20 a
Verbrauchsgebundene Kosten		
Bereitstellungskosten Strohpellet	219 €/t	
Bereitstellungskosten Strohballen		63 €/t
Strompreis (Eigenbedarf)	14 ct/kWh	13 ct/kWh
Entsorgung Rostasche	80 €/t	80 €/t
Entsorgung Flugasche		150 €/t
Betriebsgebundene Kosten		
Personalbedarf [MA]	0,10	0,25
Spezifische Personalkosten [€/MA*a]	30.000 €/MA*a	40.000 €/MA*a
Wartung und Reinigung	$(2,0 \% \cdot I_0)/a$	$(2,0 \% \cdot I_0)/a$
Verwaltung	$(0,75 \% \cdot I_0)/a$	$(0,75 \% \cdot I_0)/a$
Versicherung	$(1,0 \% \cdot I_0)/a$	$(1,0 \% \cdot I_0)/a$
Unvorhergesehenes	$(0,5 \% \cdot I_0)/a$	$(0,5 \% \cdot I_0)/a$

Pelletierung

Als erste Anlage wurde die Pelletproduktion betrachtet, deren Ergebnisse in die Kalkulation der Pelletsfeuerung einfließen. Die Berechnung der Produktionskosten basiert auf den Zahlen herkömmlicher Pelletieranlagen für Holzhackschnitzel [103] sowie auf Untersuchungen zur Strohpelletierung [124]. Anpassungen bei der Pelletierung von Stroh bestehen vor allem durch die Einsparung der Wärmeversorgung zur Trocknung sowie die Steigerung der verbrauchsgebundenen Kosten durch den Einsatz von Wasser zur Strohkonditionierung und der zusätzlichen Nutzung von Weizenstärke als Bindemittel. Ebenso sind durch den verstärkten Abrieb durch das Stroh bestimmte Anlagenteile öfter zu ersetzen [124].

Die Produktionskosten belaufen sich auf ca. 169,3 €/t (Basisvariante) bzw. 157,5 €/t (optimiert). Für den Endkundenpreis (netto) erfolgen Aufschläge für Gewinn, Transport, Wiegen und Einblaspauschalen

sowie weitere Distributionskosten in Höhe von insgesamt rund 50 €/t¹. Daraus resultieren Preise von ca. 207 bis 219 €/t. Die Endverbraucherpreise (netto) für Pellets aus Holz ergaben 2010 einen Durchschnitt von rund 205 €/t (gemittelte Werte auf Basis von C.A.R.M.E.N [125] und DEPV [126]).

Pelletsfeuerung

Die Wirtschaftlichkeit von Pelletsfeuerungen ist von der Vielzahl an Faktoren der jeweiligen Investitionssituation abhängig. So müssen z. B. Privatpersonen sowohl bei der Investition, als auch bei allen weiteren Kosten die Mehrwertsteuer entrichten, sparen auf der anderen Seite z. B. Personal-Verwaltungs- und Versicherungskosten. In diesem Fall wird von einer kommerziell betriebenen Anlage ausgegangen. Weiterhin arbeiten Pelletsfeuerungen in einem sehr breiten Leistungsspektrum mit sehr guten Teillastwirkungsgraden, sodass bei einer Neuinvestition ein Warmwasserspeicher kleiner dimensioniert werden kann. Je nach Auslegung empfiehlt sich eine Kombination mit einer Solarthermieanlage, um den reinen Brauchwasserbedarf im Sommer zu decken. Bei Passiv- bzw. Niedrig-Energie-Häusern ermöglicht ein Speicher den Einsatz eines Pelletkessels, falls selbst die kleinste wählbare Leistungsgröße für eine Direktversorgung überdimensioniert ist [127].

Desweiteren ist bei bestehenden Anlagen, die lediglich ausgetauscht werden müssen, eventuell ein Lagerraum vorhanden, sodass an dieser Stelle keine größeren Investitionen nötig sind.

Der Einbau von Pellet-Zentralheizungen wird auf Grundlage der „Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmebereich“ vom 9. Juni 2010 des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Die Umsetzung erfolgt über das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) sowie durch die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW). Ebenso können über den Einbau einer Pelletheizung die Anforderungen der ENEC kostengünstig erfüllt werden [127]. Ein einmaliger Investitionszuschuss in Höhe von 2.500 € wurde in die Berechnung einbezogen. Sein Einfluss auf die Gestehungskosten ist als Gutschrift in der Abbildung 50 erkennbar.

Die hier durchgeführten Berechnungen gehen vom Austausch eines Ölkessels aus, sodass die Infrastruktur sowie ein Warmwasserspeicher vorhanden sind, der weiterhin in Nutzung bleibt. Ein Pelletlager wird zusätzlich angeschafft.

Die Wärmegestehungskosten der Pelletsfeuerung belaufen sich unter den gewählten Annahmen auf ca. 14,6 ct/kWh (logistik-optimiert 14,2 ct/kWh). Ölfeuerungen im Leistungsbereich von 25 bis 50 kW weisen laut Leitstudie 2010 Gestehungskosten von etwa 10,5 ct/kWh auf [119]. Zu bemerken sind hier jedoch die unterschiedlichen Grundannahmen, vor allem die abweichende Volllaststundenzahl. Während die Strohpelletsfeuerung mit 2.500 h/a angesetzt wurde, geht die Leitstudie von 1.500 h/a aus. Bei einer Angleichung auf 2.500 h würden die Gestehungskosten der Ölfeuerung noch niedriger liegen. Gleiches gilt für die biogene Referenz in Form einer Biomassefeuerung im Leistungsbereich von 25 bis 50 kW, die ebenfalls der Leitstudie entnommen wurde. Die angegebenen Wärmegestehungskosten von 10,7 ct/kWh basieren ebenfalls auf einer Volllaststundenzahl von 1.500 h/a und sind mit denen der Ölfeuerung vergleichbar [119]. Auch diese würden bei einer Angleichung auf 2.500 h/a niedriger liegen. Andererseits ist aus der Leitstudie nicht klar ersichtlich, ob Kosten für Installation, Pelletlager sowie

¹ DBFZ-Erfahrungswert. Es existiert eine Bandbreite abhängig von Abnehmergröße, Bereitstellungsart (Big Bag oder Schüttgut), Distributionskette sowie Region

Personal mit einberechnet wurden, wie es bei der hier betrachteten Pelletsfeuerung erfolgt ist. Ein wesentlicher Punkt besteht im Unterschied der angesetzten Rohstoffkosten: die Leitstudie rechnet mit 2 ct/kWh, während für Strohpellets sich hier ein Wert von rund 5 ct/kWh ergibt. Somit weist die Strohpelletsfeuerung sowohl gegenüber der fossilen, als auch der biogenen Referenz deutlich höhere Wärmegestehungskosten auf. Abbildung 50 zeigt die Zusammensetzung der Gestehungskosten der Pelletsfeuerung sowie die Gestehungskosten der Referenzen.

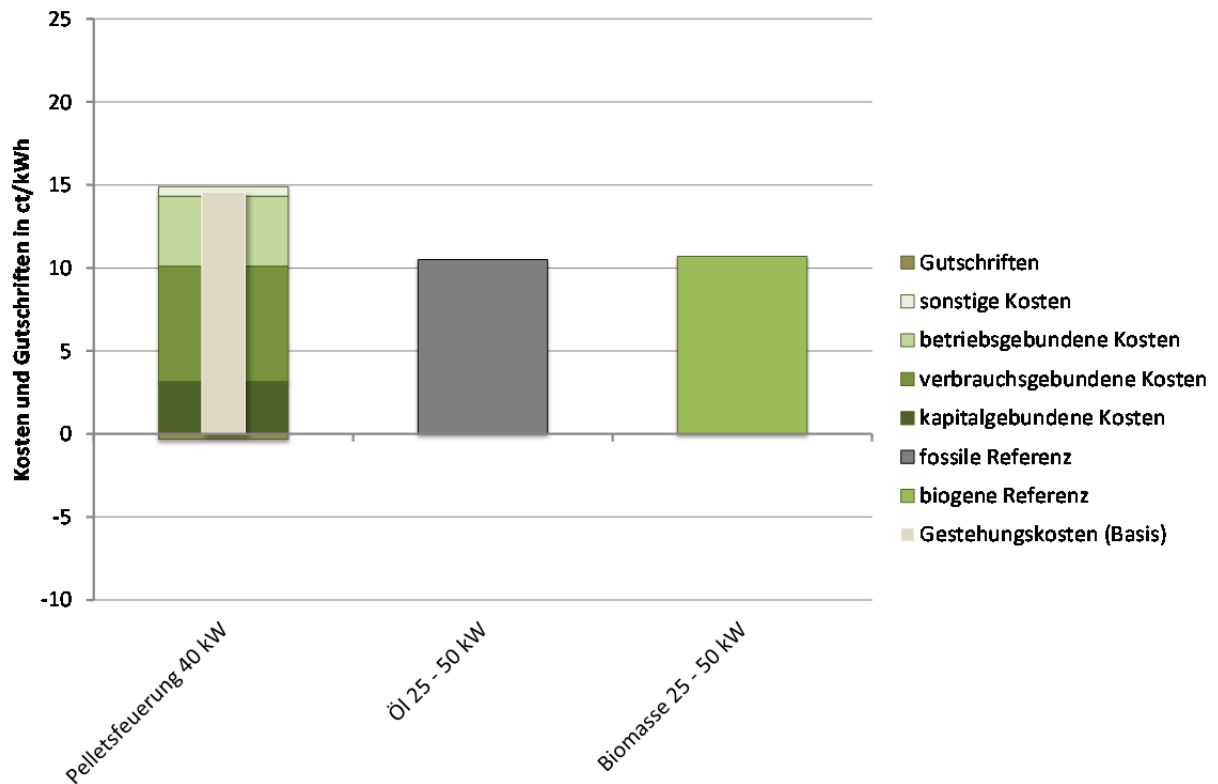


Abbildung 50: Gestehungskosten der Pelletsfeuerung 40 kW, der fossilen sowie der biogenen Referenz (Eingesetzte Biomasse bei Anlage Biomasse 25 - 50 kW: Holz; Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Aus Abbildung 50 ist ersichtlich, dass die verbrauchsgebundenen Kosten den Hauptbestandteil der Gestehungskosten ausmachen. Diese werden durch die Rohstoffkosten (Strohpellets) bestimmt. Die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 51 ergibt jedoch, dass die Gestehungskosten nicht am stärksten auf eine Änderung der Rohstoffkosten reagieren, sondern auf die der Jahresvolllaststunden. Diese lassen sich für die gewählte Beispielanlage kaum mehr steigern, da diese zur Warmwasser- und Raumwärmebereitstellung eingesetzt werden, deren Bedarf begrenzt ist. Die angesetzten 2.500 Volllaststunden pro Jahr liegen bereits an der Obergrenze der Durchschnittswerte [128,129]. Bei einer Absenkung auf 1.500 h/a steigen die Gestehungskosten der Pelletsfeuerung auf über 19 ct/kWh.

Vor allem in den ersten Jahren der Etablierung von Stroh als Energieträger ist mit größeren Schwankungen der Rohstoffkosten zu rechnen. Die geringsten Auswirkungen hat die Änderung des Zinssatzes. Dieser ist mit 8 % konservativ gerechnet. Über KfW-Kredite sind Sätze ab 3,45 % effektiven Jahreszins möglich (Programm „Wohnraum modernisieren“, Stand August 2011, www.kfw.de/), welche die Gestehungskosten aber nur marginal senken können.

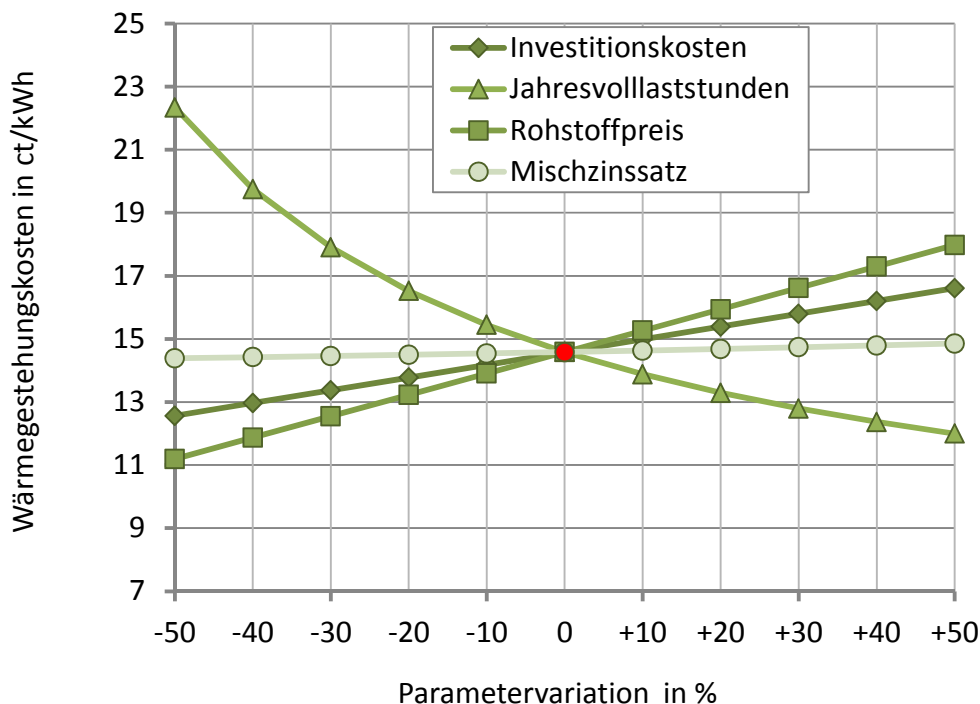


Abbildung 51: Sensitivitätsanalyse der Pelletsfeuerung (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Strohfeuerung 400 kW

Ähnlich wie bei der Pelletsfeuerung hängen wesentliche wirtschaftliche Parameter von der Investitionssituation ab. Es wird in diesem Fall von einer Ersatzinvestition ausgegangen, sodass die notwendige Infrastruktur sowie das Grundstück bereits vorhanden sind und nicht in diese investiert werden muss. Zusätzliche Kosten entstehen durch die Errichtung eines Lagers für die Strohballen. Da die Ernte nur einmal jährlich erfolgt, muss die Lagerhalle für den Brennstoffbedarf eines Jahres dimensioniert sein. Aus den verschiedenen Lagermöglichkeiten fiel die Wahl auf einfache landwirtschaftliche Bergehallen in Rundholzverbinderbauweise [130]. Es wird davon ausgegangen, dass die Fläche hierfür vorhanden ist. In die Rechnung flossen ebenfalls Kosten für den Umbau des Heizhauses, die eventuell nötige Anpassungen des Schornsteins sowie eine Pauschale von 10 % der bisher kalkulierten Investitionssumme für sonstige (unerwartete) Ausgaben ein. Dies muss beim Vergleich mit Kostenrechnungen anderer Anlagen beachtet werden. Die Investitionssumme in die Strohfeuerungsanlage mit Installation jedoch ohne Lager und Nebenarbeiten liegen mit rund 200.000 € etwa 30 % unter den hier angesetzten Vollkosten.

Für die Berechnung der Betriebs- und sonstigen Kosten ist u. a. das Betreibermodell entscheidend. Ist die Anlage nicht in einem größeren Unternehmen, wie z. B. Stadtwerke, angesiedelt, fallen höhere Kosten für Verwaltung und Personal an. Einkalkuliert wurde hier 25 % einer Vollzeitstelle für die technische Betreuung der Anlage, was einen größeren Betreiber voraussetzt. In der ersten Zeit des Anlagenbetriebes ist eventuell ein höherer Personalaufwand zur Einstellung und Optimierung der Anlage nötig, da mit der Strohverbrennung noch keine Erfahrungswerte vorliegen. Aus dem gleichen Grund wurde die Volllaststundenzahl mit niedrigen 2.500 h/a angesetzt. Bei Heizwerken sind 3.500 bis 5.000 h/a üblich [130]. Da Heizwerke in der Regel die Grundlast abdecken, ist ein Spitzenlastkessel nötig. Im hier

gewählten Modell der Ersatzinvestition erfolgt der Austausch einer Ölfeuerung, die aus mehreren Kesseln (Kaskade) besteht. Einer dieser Kessel bleibt als Spitzenlastkessel in Betrieb.

Im Ergebnis stehen rund 9 ct/kWh Gesteungskosten für die Basisvariante der Logistikkette (vgl. Abbildung 52). Durch ihre Optimierung lassen sich die Gesteungskosten leicht auf rund 8,7 ct/kWh senken. Die fossile sowie die biogene Referenz liegen bei 3,9 respektive 6,5 ct/kWh [119]. Gravierendster Unterschied bei den Annahmen sind die angesetzten Volllaststundenzahlen (1.500 resp. 1 752 h/a), die wahrscheinlich der großen Leistungsspanne geschuldet sind, die die angegebenen Referenzwerte „Biomasse 50 – 500 kW“ und „Öl 100 – 500 kW“ umfassen. Die kleineren Anlagen sind hier wahrscheinlich mit niedrigeren Volllaststunden eingeflossen. Bei einer Angleichung an die Werte der Strohfeuerung würden sich die Gesteungskosten der Referenzen weiter absenken.

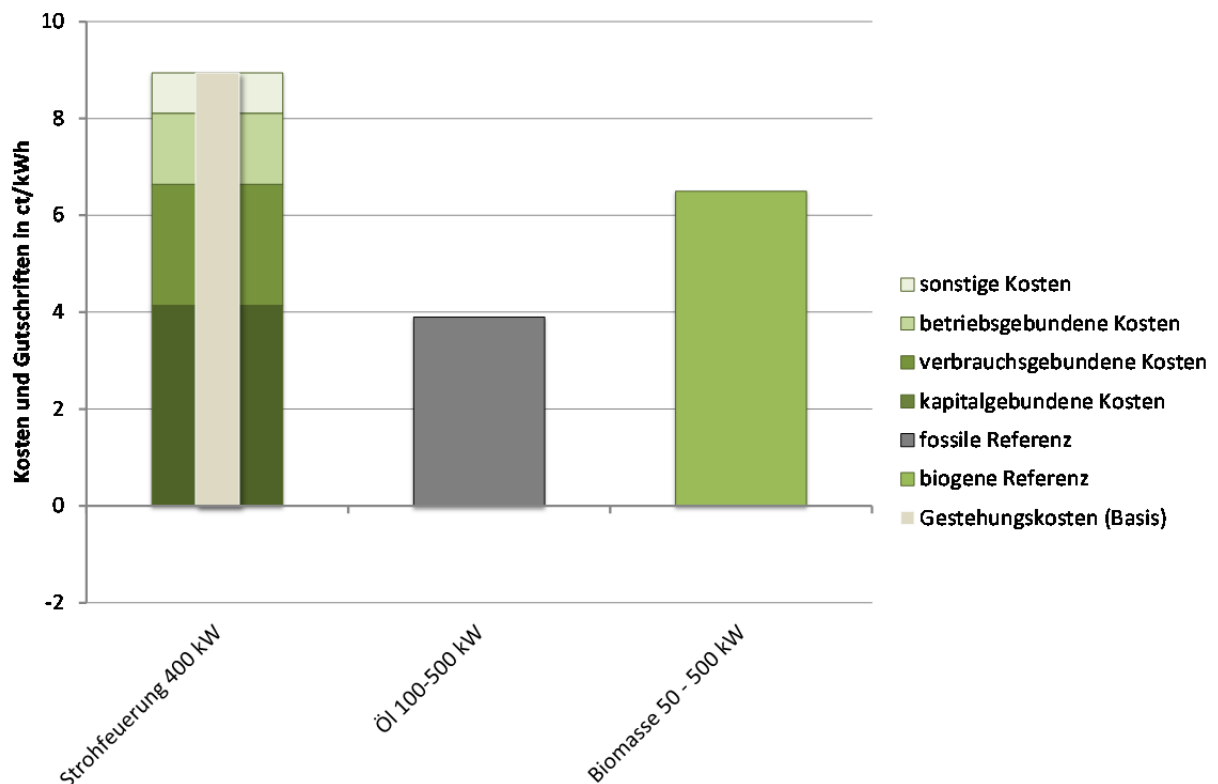


Abbildung 52: Gesteungskosten der Strohfeuerung 400 kW, der fossilen sowie der biogenen Referenz (Eingesetzte Biomasse bei Anlage Biomasse 50 – 500 kW: Holz; Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Die Sensitivitätsanalyse (Abbildung 53) zeigt, dass auch bei dem Heizwerk die Jahresvolllaststunden den größten Einfluss auf die Stromgestehungskosten haben. Eine Steigerung um, wie oben beschrieben durchaus mögliche, 40 % auf 3.500 h/a senkt die Gesteungskosten um fast 2 ct/kWh auf rund 7 ct/kWh. Bei einer Verdoppelung der Volllaststunden ist ein erhöhter Personalaufwand einzurechnen. Bei einem Ansatz von 0,4 Vollzeitstellen (im Vergleich zu 0,2) [130] und 5.000 Volllaststunden pro Jahr reduzieren sich die Gesteungskosten auf knapp 6 ct/kWh und lägen damit im Bereich der biogenen Referenz. Änderungen des angesetzten Rohstoffpreises bewirken im Vergleich eine relativ geringe Abweichung der Gesteungskosten. Aber auch hier gilt, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit voraussichtlich wesentlich höher ist als die für Änderungen z. B. der Jahresvolllaststunden.

Die Investitionskosten zeigen nach den Volllaststunden die stärkste Auswirkung. Wie oben beschrieben, sind hier nicht nur die Kosten der einzelnen Positionen von Bedeutung, sondern auch die Auswahl der zur Investition zugehörigen Arbeiten und Güter. Wird so nur die reine Feuerungsanlage inklusive Installation ohne Nebenaufwendungen wie Strohlager, Umbau des Heizhauses und des Schornsteins betrachtet, liegen die Investitionskosten rund 30 % niedriger. Die Gesteungskosten belaufen sich für diesen Fall auf etwa 7,3 ct/kWh.

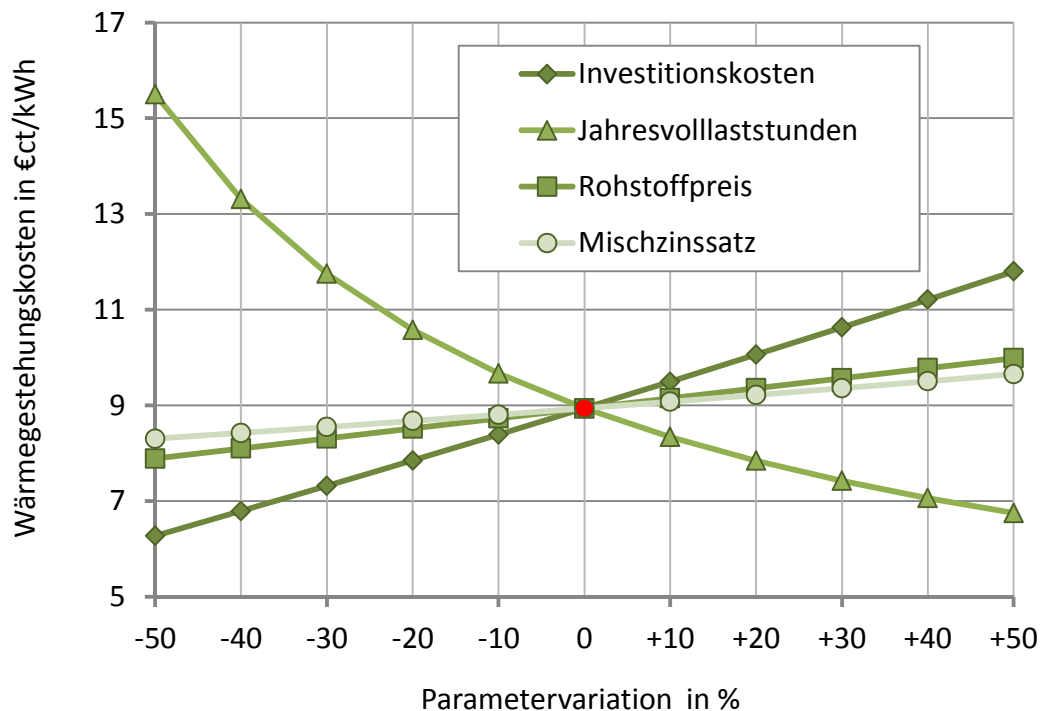


Abbildung 53: Sensitivitätsanalyse der Strohfeuerung (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Treibhausgasvermeidungskosten der Wärmepfade

Wie in Kapitel 7.2.2 beschrieben, kann durch die Gegenüberstellung der Differenz der Gesteungskosten mit den vermiedenen Treibhausgasemissionen verschiedener Anlagen eine Aussage darüber getroffen werden, mit welcher Option die volkswirtschaftlich günstigste Treibhausgasvermeidung realisierbar ist. Die hier berechneten Modellanlagen werden mit verschiedenen möglichen Referenzen verglichen, welche durch die Modellanlagen ersetzt werden könnten.

Wie in Abbildung 54 dargestellt, dient als eine erste Referenz ein Mix aus Erdgas/Heizöl, der als Durchschnitt für die deutsche Wärmebereitstellung gelten kann [131]. Diesem generellen Wert wurden konkretere Einzelanlagen zur Seite gestellt. Der Erdgas-Brennwertkessel [131] dient als Grenzbetrachtung, da diese Technologie am wahrscheinlichsten an Stelle der Biomasseanlagen zum Einsatz käme. Ergänzend dazu wurden ein Heizöl-Niedertemperaturkessel [131] sowie zwei Ölkessel verschiedener Leistungsgröße [119] betrachtet, um hier ein umfassendes Referenzbild aufzuspannen. Die Berechnung der THG-Werte der Modellanlagen ist in Kapitel 9 dargelegt.

Die Pelletsfeuerung zeigt eine große Spannweite bei den THG-Vermeidungskosten. Der Ersatz eines Niedertemperatur-Ölkessels stellt sich positiv dar. Der Vergleich mit dem Ölkessel im Leistungsbereich von 100 bis 500 kW weist durch seine niedrigen Gesteungskosten einen sehr hohen Wert auf, ist aber aufgrund der sehr unterschiedlichen Leistungsgrößen für die Ergebnisinterpretation zweitrangig. Im Vergleich zu den anderen hier betrachteten Pfaden erweist sich die Pelletsfeuerung als eine der günstigeren Optionen.

Die Strohfeuerung weist im Vergleich mit fast allen Referenzen negative Werte der Treibhausgasvermeidungskosten auf. In diesen Fällen ergeben sich somit keine Treibhausgasvermeidungskosten. Lediglich beim Vergleich mit dem in den Gesteungskosten niedriger liegenden Ölkessel im Leistungsbereich von 100 bis 500 kW lassen sich THG-Vermeidungskosten feststellen. Da dieser leistungstechnisch der Strohfeuerung (400 kW) am ehesten gleicht, ist dieser Wert neben dem Wärmemix am stärksten in die Ergebnisinterpretation einzubeziehen. Zwischen diesen beiden Werten besteht eine starke Spreizung, sodass eine eindeutige Bewertung nicht möglich ist.

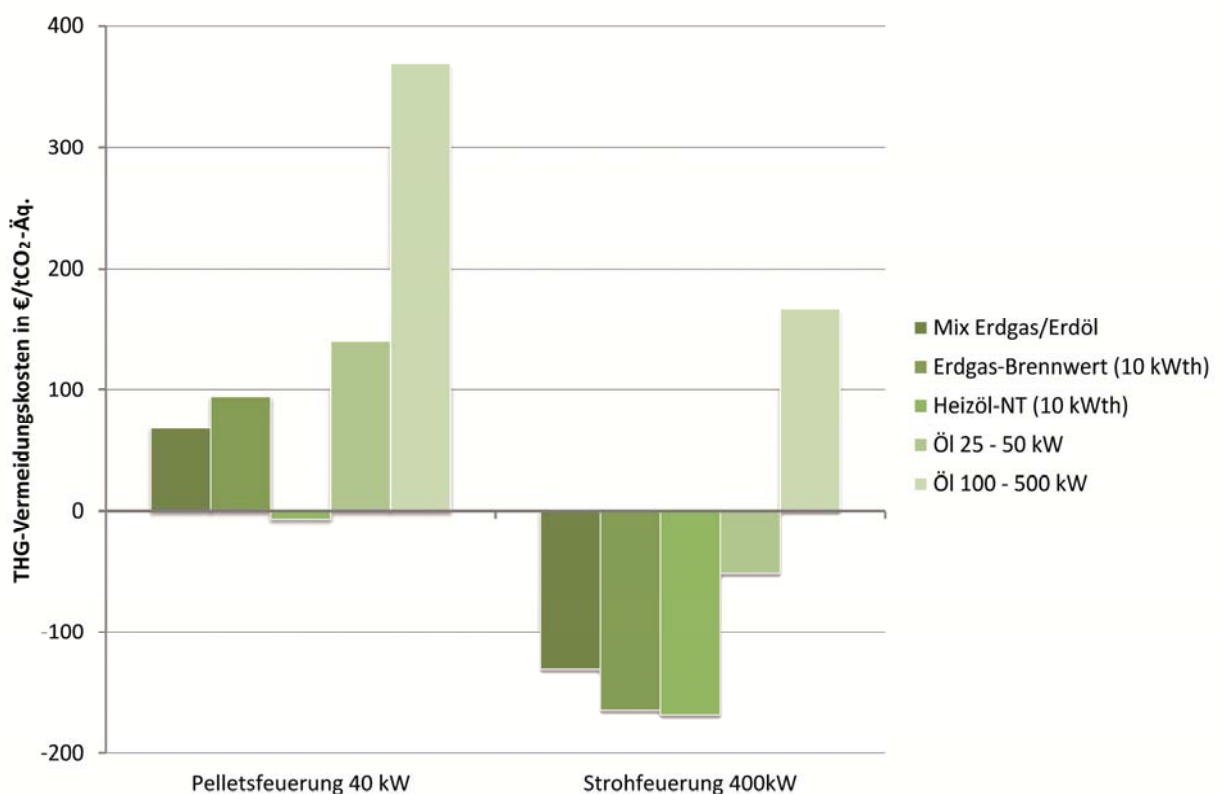


Abbildung 54: THG-Vermeidungskosten der Wärmepfade (Kosten auf Basis 2010)

7.3.3 Strombereitstellung in Kraft-Wärme-Kopplung

Die zur Berechnung der Gesteungskosten der KWK-Konzepte gewählten Parameter zeigt Tabelle 30. Daraufhin erfolgen die nähere Erläuterung der Annahmen sowie die Ergebnisdarstellung.

Tabelle 30: Parameter der Gestehungskostenberechnung – KWK-Konzepte (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Parameter	Stroh-HKW 2,3 MW _{el}	Biogasanlage 500 kW _{el}
Vollbenutzungsstunden	5.350 h/a	8.000 h/a
Kapitalgebundene Kosten		
Investitionssumme I ₀	11.667 000 €	284.482 €
Kalkulatorischer Mischzinssatz	8 %	8 %
Instandsetzung	(2,5 %*I ₀)/a	(2,5 %*I ₀)/a
Betrachtungszeitraum	20 a	20 a
Verbrauchsgebundene Kosten		
Bereitstellungskosten Strohballen	79 €	76 €/t
Strompreis (Eigenbedarf)	12 ct/kWh	12 ct/kWh
Entsorgung Rostasche	80 €/t	-
Entsorgung Flugasche	150 €/t	-
Betriebsgebundene Kosten		
Personalbedarf	10 MA	1 MA
Spezifische Personalkosten	50.000 €/MA*a	50.000 €/MA*a
Wartung und Reinigung	(2,0 %*I ₀)/a	(2,0 %*I ₀)/a
Verwaltung	(0,75 %*I ₀)/a	(1,0 %*I ₀)/a
Versicherung	(1,0 %*I ₀)/a	(1,0 %*I ₀)/a
Unvorhergesehenes	(0,5 %*I ₀)/a	(0,5 %*I ₀)/a
Erlöse für Nebenprodukte		
Wärmeauskopplung	90 %	40 %
Wärmegutschriften	3 ct/kWh	3 ct/kWh

Stroh-HKW 2,3 MW_{el}

Wie in Kapitel 5 beschrieben, basieren die Berechnungen für das Heizkraftwerk auf Angaben einer bestehenden vergleichbaren Anlage in Rudkøbing. Die Zahlen, speziell die Investitionskosten, stammen aus dem Jahr der Errichtung 1990. Nach der Umrechnung von Dänischen Kronen in Euro sowie der Inflationsanpassung ergeben sich spezifische Investitionskosten von rund 5.070 €/kW_{el}. Dieser Wert ist relativ hoch, jedoch im Rahmen der heute üblichen Kosten dieser Leistungsklasse. Mit 2,3 MW_{el} handelt es sich bei dieser Dampfturbine um eine der kleineren am Markt verfügbaren Anlagen [132]. Durchaus übliche Anlagen mit 20 MW_{el} können für rund die Hälfte (etwa 2.500 €/kW_{el}) realisiert werden². Für zukünftig gebaute Anlagen ist es wahrscheinlich, dass die Investitionskosten unter den hier angesetzten liegen. Da die Höhe der Einsparungen an dieser Stelle nur abgeschätzt werden könnten, wird auf den

² DBFZ-interne Daten

originalen und damit am meisten belastbaren Wert zurückgegriffen. Die Auswirkungen der Investitionskostenabsenkung zeigt die Sensitivitätsanalyse (Abbildung 56).

Der bestimmende Faktor der verbrauchsgebundenen Kosten ist der Rohstoffpreis, welcher rund 32 % der Gesamtkosten ausmacht. Weitere Bestandteile sind die Stromkosten durch den externen Bezug (bei derzeitigen EEG-Anlagen wirtschaftlicher als die Eigenbedarfsdeckung) sowie die Entsorgungskosten der Grob- und Flugasche.

Der Großteil der betriebsgebundenen Kosten entsteht durch die Personalkosten. Der Anlagenbetrieb erfolgt in 4 Schichten zu je 2 Mitarbeitern. Zuzüglich einer Reserveschicht benötigt die Anlage somit 10 feste Mitarbeiter. Die Kosten für die Verwaltung fließen über eine Pauschale ein. Auch hier kann es je nach Betreibermodell zu größeren Differenzen kommen [130].

Ein wesentlicher Faktor zur Berechnung der Gestehungskosten sind die Erlöse für Wärme, die als Gutschrift in die Stromgestehungskosten einfließen. Da die Anlage wärmegeführt wird, beträgt die angesetzte Wärmeauskopplung 90 %. Auf die Annahme von 100 % wurde verzichtet, um eventuellen Ausfällen und Unsicherheiten Rechnung zu tragen. Das Heizkraftwerk stellt Wärme für Warmwasser und Raumheizung bereit, welche zu angenommenen 3 ct/kWh_{th} abgesetzt werden kann. Trotz dieser Gutschriften von rund 10 ct/kWh_{el} liegen die Stromgestehungskosten mit etwa 25,1 ct/kWh_{el} im Vergleich zu den Referenzen auf einem sehr hohen Niveau (vergl. Abbildung 55). Die Leitstudie 2010 gibt für ein Erdgas-Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk mit 400 MW_{el} Stromgestehungskosten von 6,4 ct/kWh_{el} und für eine biogene Festbrennstoff-KWK-Anlage mit 2 MW_{el} 13 ct/kWh_{el} an. Selbst reine Erdgas-Dampfturbinen-Kraftwerke (150 MW_{el}) liegen mit 9,1 ct/kWh_{el} [119] noch deutlich unter dem des Stroh-HKW. Wie bereits im Kapitel 7.2.3 dargelegt, wurde das Erdgas-GuD als Referenz ausgewählt, da es sich um eine der effizientesten Technologien handelt, die sowohl Strom als auch Wärme bereitstellt. Jedoch wird das Erdgas-GuD stromgeführt betrieben und hat aufgrund dessen sowie allein schon durch die Anlagenkapazität andere Anwendungsgebiete als das Stroh-HKW. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden. Ein wesentlicher Unterschied des Stroh-HKW zur biogenen Festbrennstoff-KWK-Anlage mit 2 MW_{el} besteht in den Volllaststunden, welche mit 5 350 respektive 6.500 h/a angesetzt wurden. Wie die Sensitivitätsanalyse zeigt, würden sich bei einer Angleichung der Volllaststunden auf 6.500 h/a (Aufschlag von rund 20 %) die Gestehungskosten des Stroh-HKW auf etwa 21 ct/kWh_{el} absenken, lägen aber immer noch deutlich über den Referenzwerten.

Den Kosten von rund 25 ct/kWh stehen nach EEG 2012 Vergütungen in Höhe von 19,7 ct/kWh gegenüber. Somit sind Optimierungen der Anlage nötig, um sie nach EEG wirtschaftlich betreiben zu können.

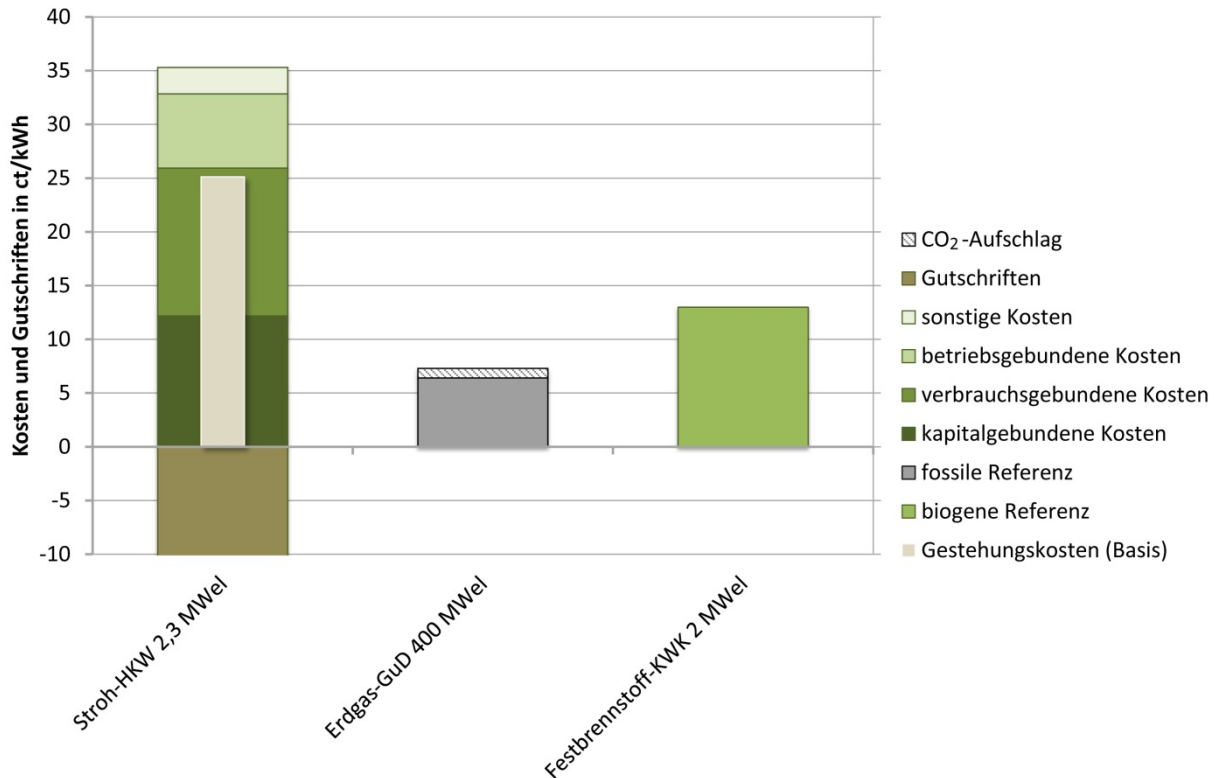


Abbildung 55: Gestehungskosten des Stroh-HKW 2,3 MW, der fossilen sowie der biogenen Referenz Bilanzierung der bereitstellungsbedingten Treibhausgasemissionen (Eingesetzte Biomasse Festbrennstoff-KWK: Holz; Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Die Änderungen der Volllaststunden zeigen in der Sensitivitätsanalyse (Abbildung 56) wie auch schon bei den vorherigen Konzepten die größten Auswirkungen auf die Stromgestehungskosten. Diese lassen sich aufgrund der Wärmeführung nur begrenzt steigern. Aus dem gleichen Grund lässt sich auch die Wärmeauskopplung kaum anheben, da diese bereits bei 90 % liegt. Die Ausschöpfung der 100 % bewirkt dennoch eine Absenkung der Gestehungskosten um gut 1 ct/kWh_{el}. Wenn auch die Rohstoffkosten geringeren Einfluss auf die Gestehungskosten haben als die Investitionskosten, ist hier mit einer höheren Volatilität zu rechnen.

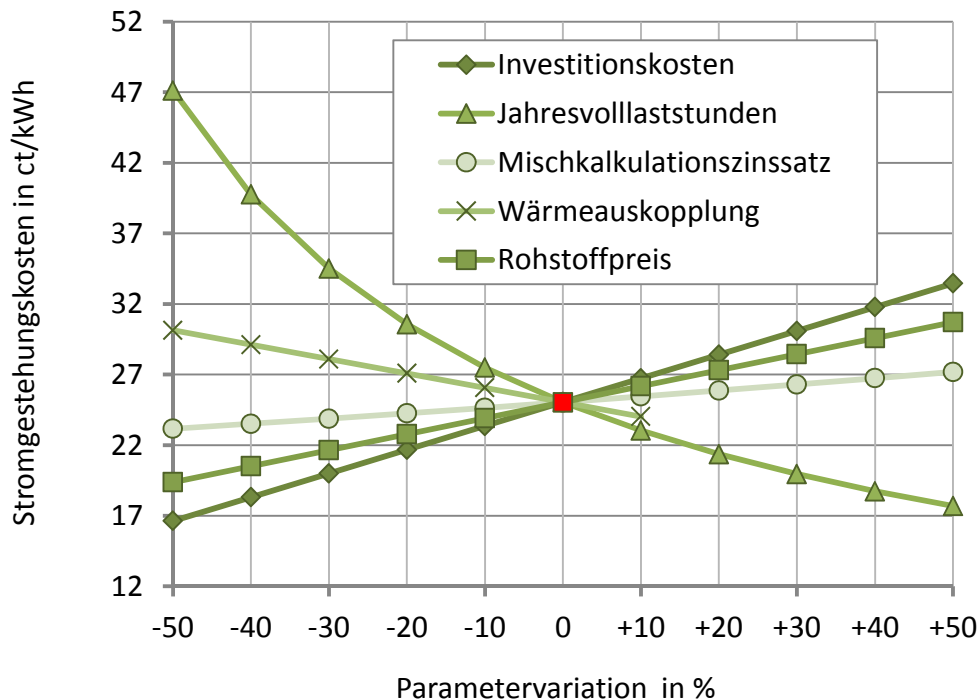


Abbildung 56: Sensitivitätsanalyse des Stroh-HKW 2,3 MW_{el} (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Biogasanlage

Die berechnete Biogasanlage basiert auf Standardwerten für heutige Biogasanlagen, welche für die Bearbeitung von Stroh angepasst wurden. Grundlegend handelt es sich bei den Anpassungen um die Investitionskosten für die Aufbereitung des Strohs sowie für die Schlauchsilage. Weitere technische Details finden sich in Kapitel 5.

Die Investitionskosten liegen bedingt durch die nötige Strohaufbereitung höher als bei Anlagen, die mit herkömmlichen Substraten betrieben werden. Ebenso erhöhen sich die verbrauchsgebundenen Kosten durch den Einsatz der Schlauchsilage signifikant gegenüber Anlagen mit Einsatz z. B. eines Fahrtilos. Im Gegenzug sinken die Investitionskosten durch die Einsparung des Fahrtilos.

Die verbrauchsgebundenen Kosten werden durch die Substratkosten bestimmt. Die Gülle fällt am Hof an und steht somit kostenfrei zur Verfügung. Für das Kleeergras als Zwischenfrucht auf den eigenen Feldern werden dessen Bereitstellungskosten eingerechnet. Gleiches gilt für das Stroh. Da ohne die Biogasanlage die Gülle direkt hätte ausgebracht werden müssen, fließt in die Rechnung der Biogasanlage lediglich der zusätzlich entstehende Gärrest abzüglich des Substratabbaus während der Vergärung ein. Diese zusätzlichen Gärreste wirken bei der Ausbringung als Düngemittel, wodurch an dieser Stelle Einsparungen auftreten. Es wird unterstellt, dass sich die zusätzlichen Ausbringungskosten und die Kosteneinsparung bei den Düngemitteln ungefähr ausgleichen. Somit fließen keine Ausbringungskosten für den Gärrest in die Wirtschaftlichkeitsrechnung ein. Für die Häckselung des Strohs und des Kleeergrases ist ein gemeinsamer Häckseler vorgesehen, der in die Befülltechnik der Schlauchsilage integriert ist. Technisch denkbar, sind solche Geräte derzeit aufgrund fehlenden Bedarfes noch nicht verfügbar.

Bestimmend für die betriebsgebundenen Kosten sind die Personalkosten. Für diese Anlagengröße ist mindestens 1 Vollzeitkraft (bzw. ein Vollzeitäquivalent) vorzusehen.

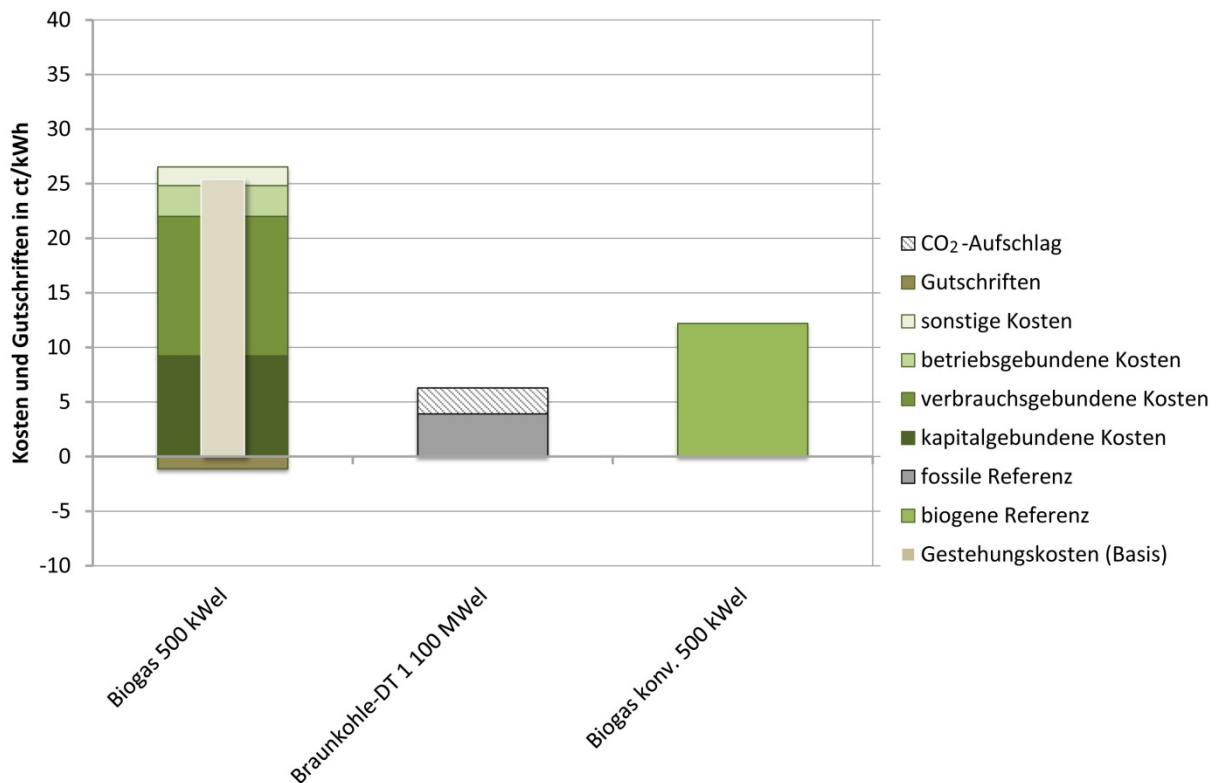


Abbildung 57: Gestehungskosten der Biogasanlage sowie der Referenzen (Substratmix bei Biogas 500 kW_{el}: Weizenstrohsilage, Rindergülle, Klee-/Weidelgrassilage; Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Abbildung 57 zeigt die deutlichen Kostenunterschiede der Biogasanlage und ihrer Referenzen. Den Stromgestehungskosten von etwa 25 ct/kWh steht eine Vergütung nach EEG 2012 (Inbetriebnahme 2012) von 21 ct/kWh gegenüber. Hier sind also Optimierungen nötig, um die Anlage im Rahmen des EEG wirtschaftlich zu betreiben. Die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 58 zeigt, dass eine Änderung der Volllaststunden zwar die größten Effekte bewirkt, aber eine Steigerung kaum mehr möglich ist. Weitere relevante Hebel zur Optimierung bestehen in der Senkung der Substratkosten und der Investitionssumme, während die Erhöhung der Wärmeauskopplung sich verhältnismäßig gering auf die Gestehungskosten auswirkt.

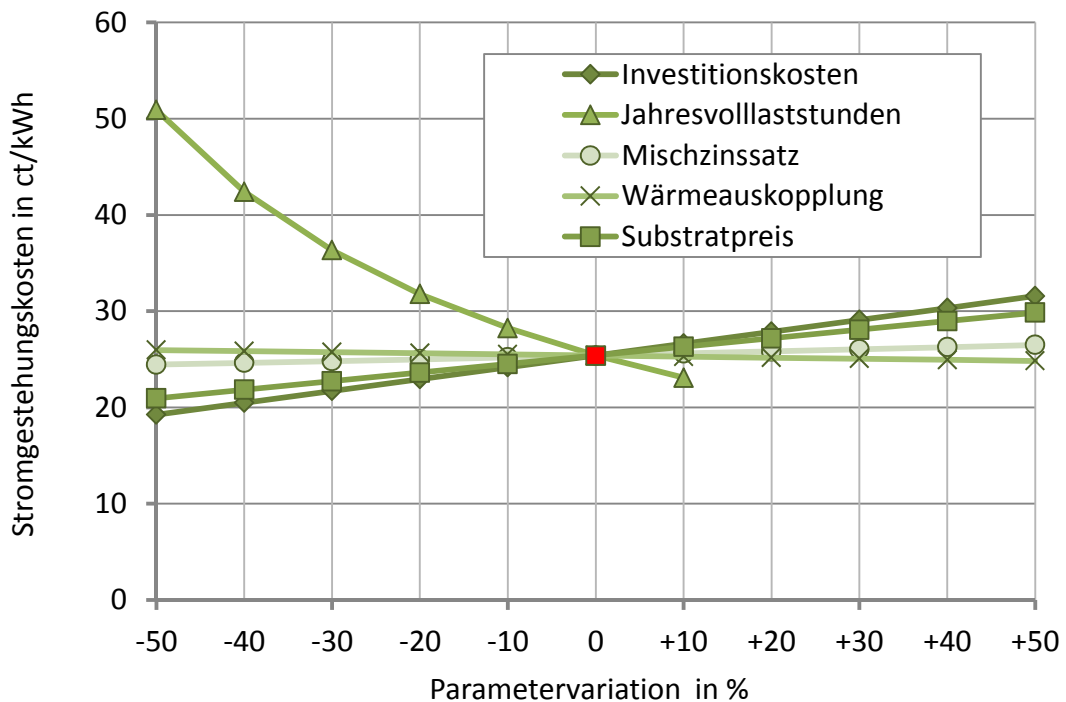


Abbildung 58: Sensitivitätsanalyse der Biogasanlage (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Treibhausgasvermeidungskosten der KWK-Pfade

Wie Abbildung 59 darstellt, dienen als erste Referenz die Durchschnittswerte des deutschen Kraftwerksparkes [131]. Um ein breiteres Spektrum an stromerzeugenden Technologien darzustellen, wurden weiterhin zwei Erdgas-und-Dampf-Kombikraftwerke als eine der effizientesten heutigen Kraftwerke ausgewählt [131,133]. Für Grenzbetrachtungen dient ein Mix aus Erdgas-GuD und Import-Steinkohlekraftwerken [131]. Zur Vollständigkeit wurde letzteres mit in die Betrachtungen aufgenommen. Nähere Erläuterungen der Methodik finden sich in Kapitel 7.2.2.

Es zeigt sich, dass sowohl das Stroh-HKW als auch die Biogasanlage im Vergleich mit sämtlichen Referenzen derzeit noch sehr hohe Werte aufweisen. Gerade der Ersatz der Erdgas-GuD mit ihren niedrigen Gestehungskosten und geringen THG-Emissionen stellt sich unter dem Aspekt der THG-Vermeidungskosten als weniger effizient dar. Doch selbst im Vergleich zum derzeitigen Kraftwerkspark und dem Grenzmix (Erdgas-GuD/Importsteinkohle-KW) lassen sich keine positiven Aussagen treffen. Bei dem Ersatz eines reinen Importsteinkohle-KW entstehen die niedrigsten THG-Vermeidungskosten.

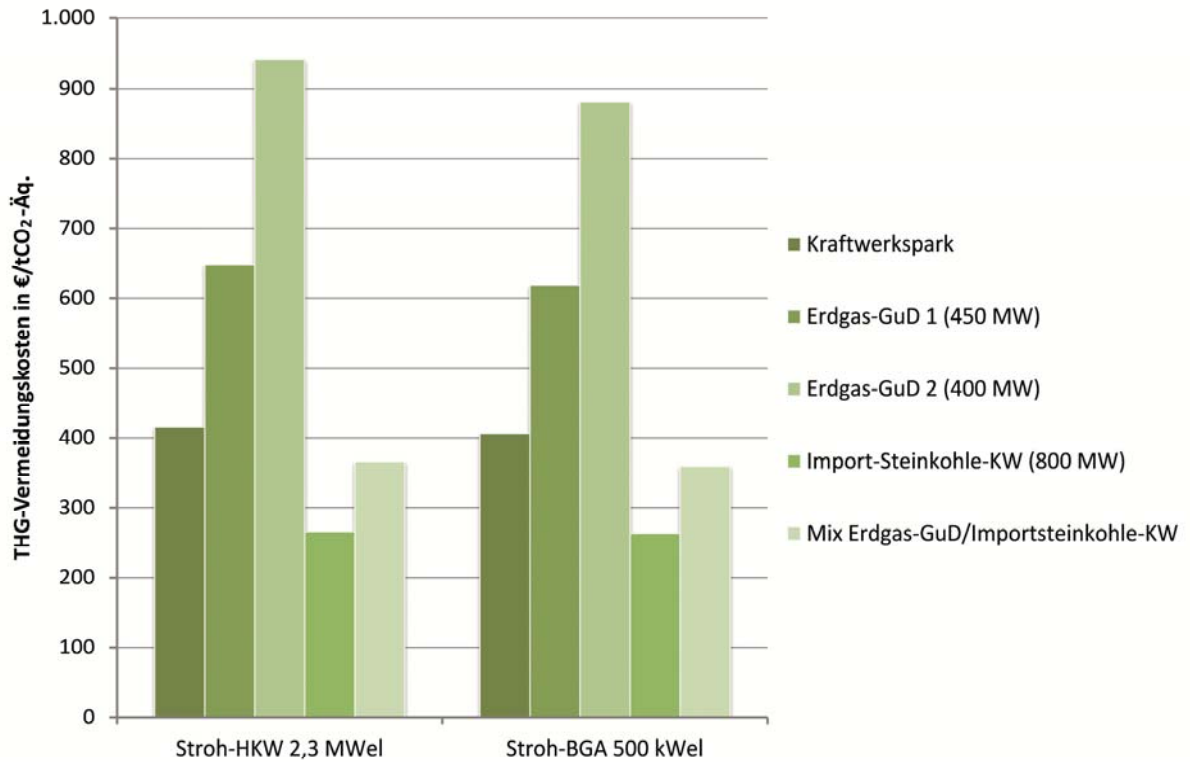


Abbildung 59: THG-Vermeidungskosten der KWK-Pfade (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

7.3.4 Kraftstoffe

Zur Kostenberechnung der Bereitstellung der Kraftstoffe wurden die folgenden Werte (Tabelle 31) herangezogen. Erläuterungen zu einzelnen Positionen sowie die Ergebnisdarstellung erfolgt in den Kapiteln der jeweiligen Kraftstoffe.

Tabelle 31: Parameter der Gesteungskostenberechnung – Kraftstoffkonzepte (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Parameter	Bio-SNG 30 MW	FT-Diesel 2 GW	Ethanol 156 MW
Vollbenutzungsstunden	7.500 h/a	8.000 h/a	7.500 h/a
Kapitalgebundene Kosten			
Investitionssumme I_0	61 Mio. €	2.558 Mio. €	159 Mio. €
Kalkulatorischer Mischzinssatz	8 %	8 %	8 %
Instandsetzung	$(2,5 \% \cdot I_0)/a$	$(2,5 \% \cdot I_0)/a$	$(2,5 \% \cdot I_0)/a$
Betrachtungszeitraum	20 a	20 a	20 a
Verbrauchsgebundene Kosten			
Bereitstellungskosten Strohballen	82 €/t	89 €/t	92 €/t
Strompreis (Eigenbedarf)	12 ct/kWh	12 ct/kWh	12 ct/kWh
Betriebsgebundene Kosten			
Personalbedarf	15 MA	475 MA	35 MA
Spezifische Personalkosten	50.000 €/MA*a	50.000 €/MA*a	50.000 €/MA*a
Wartung und Reinigung	$(2,0 \% \cdot I_0)/a$	$(2,0 \% \cdot I_0)/a$	$(2,0 \% \cdot I_0)/a$
Verwaltung	$(0,75 \% \cdot I_0)/a$	$(0,75 \% \cdot I_0)/a$	$(0,75 \% \cdot I_0)/a$
Versicherung	$(1,0 \% \cdot I_0)/a$	$(1,0 \% \cdot I_0)/a$	$(1,0 \% \cdot I_0)/a$
Unvorhergesehenes	$(0,5 \% \cdot I_0)/a$	$(0,5 \% \cdot I_0)/a$	$(0,5 \% \cdot I_0)/a$
Erlöse für Nebenprodukte			
Wärmegutschriften	3 ct/kWh	3 ct/kWh	3 ct/kWh

Bio-SNG

Die Investitionskosten wurden verschiedenen Literaturquellen entnommen [134–142], auf die Größe der Modellanlage skaliert, an den Stroheinsatz angepasst und um eine Pelletieranlage erweitert. Eine Beschreibung der technischen Details findet sich in Kapitel 5. Die Kostenberechnung, deren Ergebnisse Abbildung 60 im Vergleich mit den Referenzen darstellt, betrachtet die Pellet- sowie die Bio-SNG-Produktion als einen Komplex. Durch den gemeinsamen Betrieb können Kostensenkungen erzielt werden, wie z. B. durch die Einsparung von Personal und die Nutzung der überschüssigen Wärme aus der Bio-SNG-Produktion für die Pelletsherstellung. Zusammen mit den notwendigen Instandhaltungskosten sowie den Finanzierungskosten stellen die kapitalgebundenen Kosten rund 39 % der Gesteungskosten dar. Sie haben damit den zweitgrößten Anteil nach den verbrauchsgebundenen Kosten mit rund 44 %. Hier dominieren die Strohbereitstellungskosten, jedoch beeinflussen auch die Hilfsenergien und -stoffe mit rund 40 % die verbrauchsgebundenen Kosten stark. Die betriebs- und sonstigen Kosten fallen im Gegensatz dazu mit zusammen rund 17 % moderat aus.

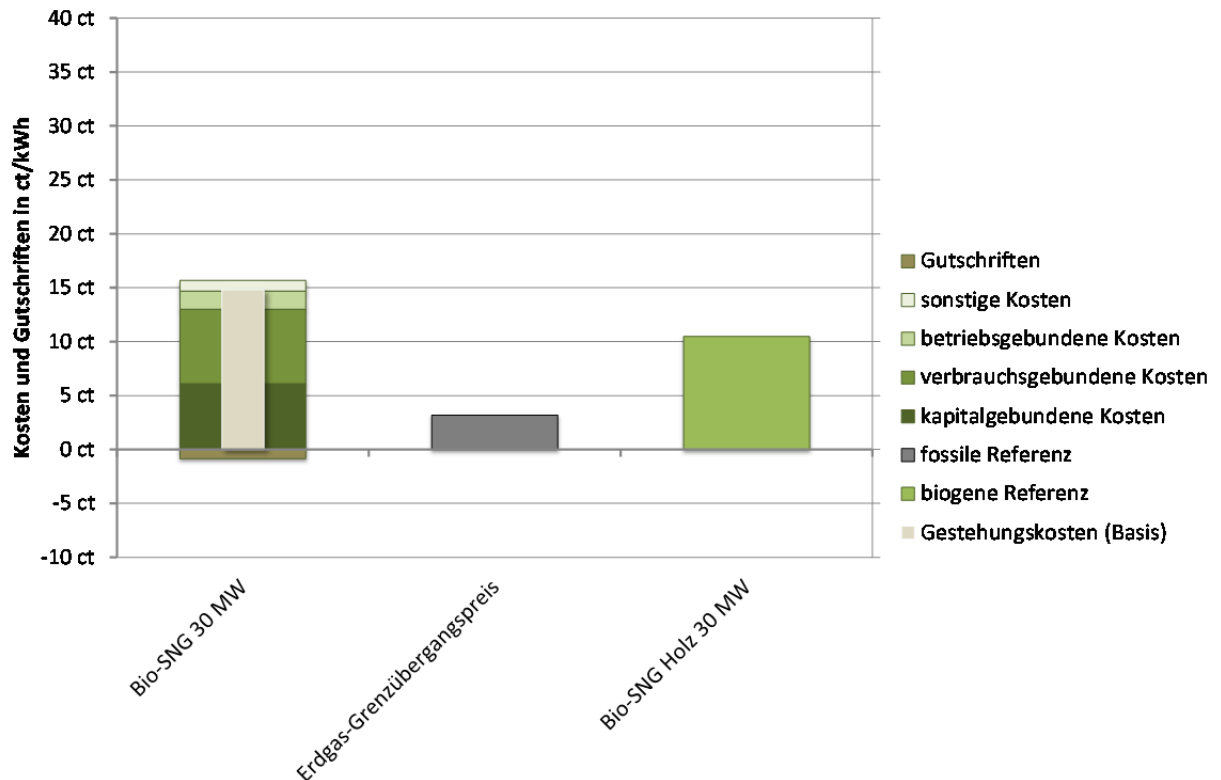


Abbildung 60: Gestehungskosten der Bio-SNG-Anlage sowie der Referenzen (Erdgas-Grenzübergangspreis inkl. vermiedener Netznutzungsentgelte; Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Als Nebenprodukte senken die anteilig verkaufte Niedertemperatur- als auch Prozesswärme die Gestehungskosten, allerdings um weniger als 1 ct/kWh. Sie belaufen sich unter den gewählten Annahmen auf etwa 14,8 ct/kWh. Damit liegen sie deutlich über den Kosten für Erdgas (Grenzübergangspreis zzgl. vermiedener Netznutzungsentgelte) sowie auch über denen einer Bio-SNG-Anlage auf Holzbasis vergleichbarer Größe. Ausschlaggebend sind hier die höheren Investitions- und verbrauchsgebundenen Kosten. Den größten Einfluss auf die Gestehungskosten haben, wie die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 61 zeigt, auch hier die Jahresvolllaststunden. Diese lassen sich kaum noch steigern. Bei einer Erhöhung auf 8.000 h/a reduzieren sich die Gestehungskosten um rund 0,5 ct/kWh auf etwa 14,3 ct/kWh. Zweitstärksten Einfluss, vor den Investitionskosten, haben die Biomassekosten. Dieser Effekt wird noch durch die Eintrittswahrscheinlichkeit verstärkt. Während sich die Investitionskosten nur im Rahmen der Anlagenerrichtung beeinflussen lassen, sind Schwankungen bei den laufend umgesetzten Verbrauchsgütern sehr viel wahrscheinlicher.

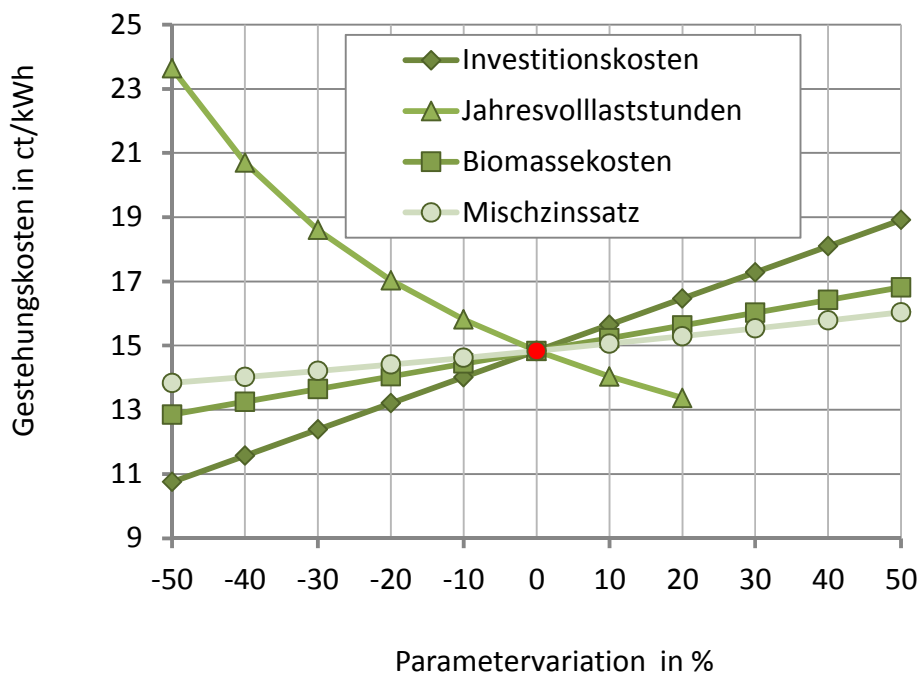


Abbildung 61: Sensitivitäten der Bio-SNG-Anlage (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Inwieweit die höheren Gestehungskosten die Marktfähigkeit des Bio-SNG auf Strohbasis beeinflussen, hängt von seinem Marktwert und den weiteren Kosten zur Bereitstellung ab. So können sich durch herausragende Qualitäten, steuerliche Vorteile und gesetzliche Regelungen wie das Double Counting eventuell höhere Marktpreise ergeben, welche neben der Kostendeckung auch eine ausreichende Gewinnspanne ermöglichen.

BtL – FT-Diesel

Die Herstellung von Kraftstoff aus Stroh durch ein BtL-Verfahren (hier Fischer-Tropsch) ist ein bisher nicht erprobtes Konzept, sodass die Stoff- und Energieströme auf Simulationen beruhen und die Kosten nur abgeschätzt werden können. Besonders das dezentrale Konzept der Pyrolyseanlagen mit zentraler BtL-Anlage ist sehr innovativ, wodurch keine Erfahrungswerte vorliegen. Auf der Basis von Modellrechnungen und Daten aus Versuchsanlagen ergeben sich Gestehungskosten für den FT-Diesel von 15,44 ct/kWh_{FTD} für die Basis- sowie 14,58 ct/kWh_{FTD} für die optimierte Variante. Abbildung 62 zeigt die Kosten, deren Verteilung sowie den Vergleich mit ausgewählten Referenzen.

Trotz der hohen Investitionskosten von über 2,5 Mrd. Euro dominieren nicht die kapital- sondern die verbrauchsgebundenen Kosten durch den Bedarf von über 4 Mio. t Stroh, welches aufgrund des großen Einzugsgebietes mit die höchsten Bereitstellungskosten der hier vorgestellten Konzepte aufweist. Dabei spielt nicht nur die Strohbereitungskosten eine Rolle, sondern auch der Transport des Slurry von den dezentralen Vergasungsanlagen zur zentralen FT-Anlage. Insgesamt summieren sich die verbrauchsgebundenen Kosten auf über 55 %. An zweiter Stelle folgen die kapitalgebundenen Kosten mit rund 33 %. Die größte Sensitivität (Abbildung 63) zeigt die Anlage bei den Jahresvolllaststunden. Diese wurden bereits mit 8.000 h/a sehr hoch angesetzt, um bei dieser von vornherein eher theoretischen

Anlage ein mögliches Maximum aufzuzeigen. Da der Betrieb der 21 Teilanlagen samt der damit verbundenen Logistik aufgrund der Komplexität wahrscheinlich sehr fehleranfällig sein wird, ist die Beherrschung dieser Komplexität eine der Kernaufgaben zur Sicherstellung und Optimierung der Volllaststundenzahl als wesentlicher Einflussfaktor auf die Gestehungskosten.

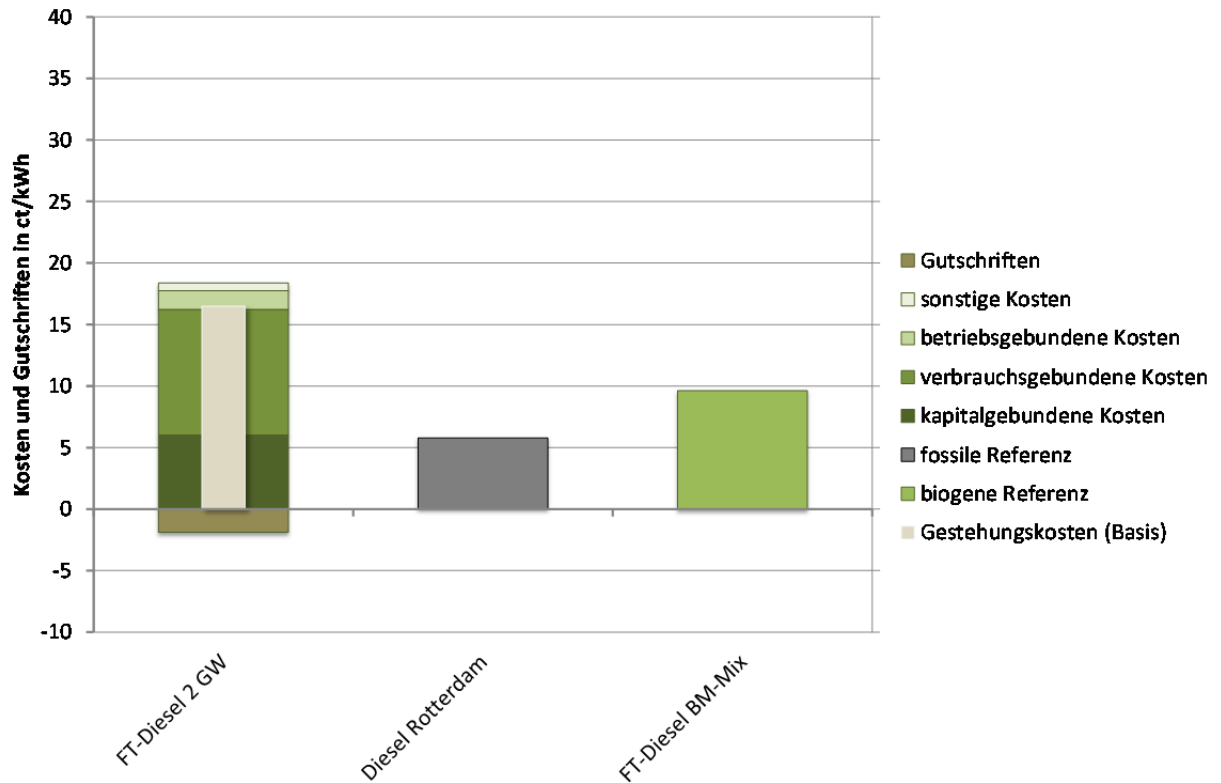


Abbildung 62: Gestehungskosten der FT-Diesel-Anlage sowie der Referenzen (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Eine geringere Auslastung führt zu einem noch größeren Abstand zu den Referenzen. Aber auch hier gelten die Aussagen, die für Bio-SNG getroffen wurden. Die Wirtschaftlichkeit der Anlage hängt neben den Kosten von dem erzielbaren Marktpreis ab, der unter Umständen höher sein kann als bei den Referenzen, sowie weiteren eventuell unterschiedlichen Kostenpositionen. Punkte sind hier Distribution, Steuern, gesetzliche Regelungen zur Nachhaltigkeit und Biokraftstoffquoten unter Beachtung des Double Counting sowie eventuelle qualitative Vorteile des FT-Diesels.

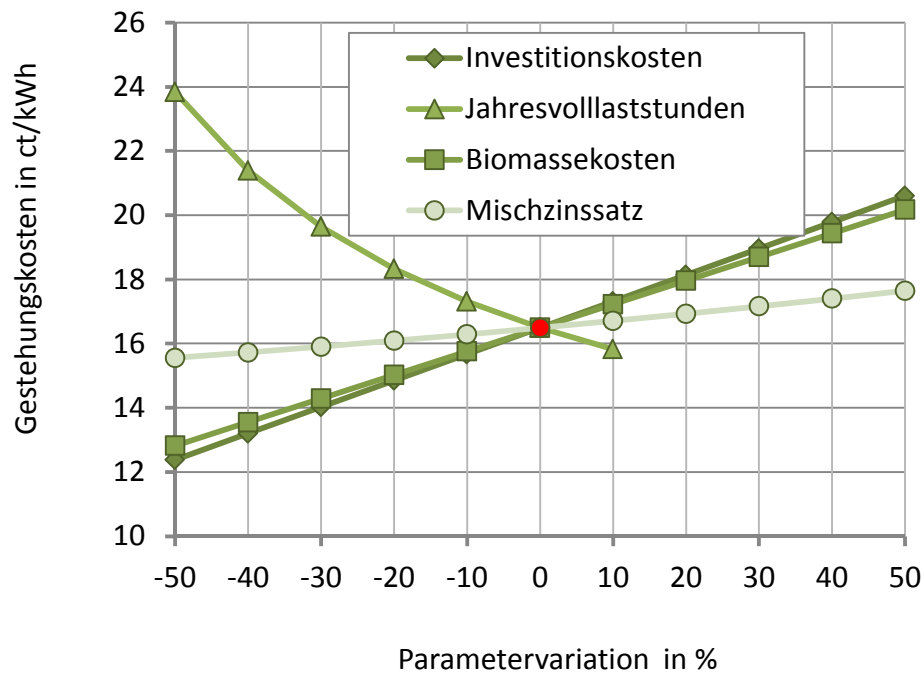


Abbildung 63: Sensitivitäten der FT-Diesel-Anlage (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Ethanol

Auch bei der Ethanol-Produktion aus Stroh handelt es sich um ein weitgehend theoretisches Konzept, sodass zu diesem Zeitpunkt nur eine Kostenabschätzung vorgenommen werden kann. Diese orientiert sich an konventionellen Ethanolanlagen, deren Daten entsprechend modifiziert wurden. Im Ergebnis zeigen sich hier im Vergleich mit den anderen Stroh-Konzepten die höchsten Unterschiede zwischen Strohverarbeitung und etablierten Produktionsverfahren. Die Basisvariante ergibt Gestehungskosten von rund 26,8 ct/kWh (Abbildung 64), optimiert sinken die Kosten auf 25,5 ct/kWh. Brasilianisches Ethanol kostet derzeit rund 10 ct/kWh (Preis Rotterdam). Die Anlage verzeichnet die höchsten Strohbereitstellungskosten, da sie das größte zentrale Konzept ist.

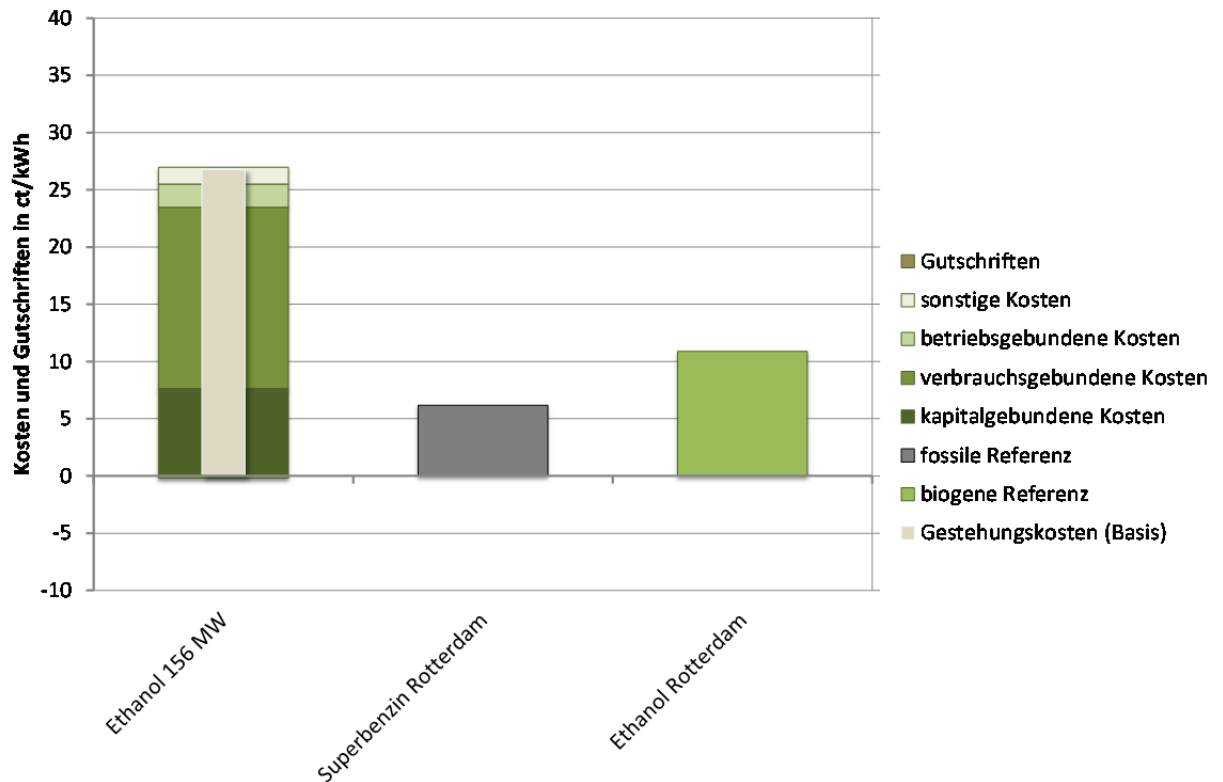


Abbildung 64: Gestehungskosten der Ethanolanlage sowie der Referenzen Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Bei den Sensitivitäten (Abbildung 65) ergibt sich hier ein zu den anderen Konzepten sehr ähnliches Bild. Die größte Sensitivität zeigen die Jahresvolllaststunden, gefolgt von fast gleichbedeutenden Investitions- und Biomassekosten, die jedoch unterschiedlichen Volatilitäten unterliegen.

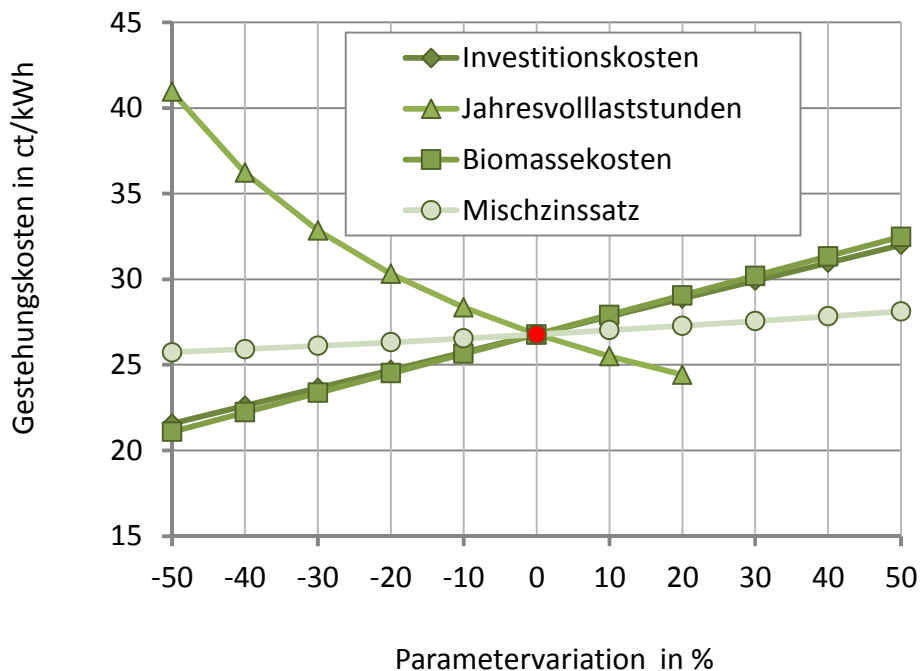


Abbildung 65: Sensitivitäten der Ethanol-Anlage (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

Treibhausgasvermeidungskosten der Kraftstoffpfade

Abbildung 66 zeigt die THG-Vermeidungskosten in Bezug auf die fossilen Referenzen. Die Methodik ist in Kapitel 7.2.2 dargelegt. Die derzeitige Anwendung für Bio-Ethanol ist der Ersatz von Otto-Kraftstoff (Super-Benzin), weshalb dieser als fossile Referenz an dieser Stelle dient [131], [143]. Die fossile Referenz für FT-Diesel besteht im herkömmlichen Dieselmotorkraftstoff [131], [143]. Die Wahl der Referenz für Bio-SNG fiel auf Compressed Natural Gas, da auch dieses als Kraftstoff zum Einsatz kommt. Die THG-Werte wurden Concawe entnommen [144], die Kosten basieren auf Angaben der BAFA zum Erdgas-Grenzübergangspreis zzgl. vermiedener Netznutzungskosten (siehe Kapitel 7.2.3).

Die Kraftstoffpfade weisen die höchsten THG-Vermeidungskosten der hier untersuchten Modellanlagen auf, was in den hohen Kosten begründet liegt. Damit sind unter diesem Aspekt die anderen Pfade bei ihrer Umsetzung zu bevorzugen.

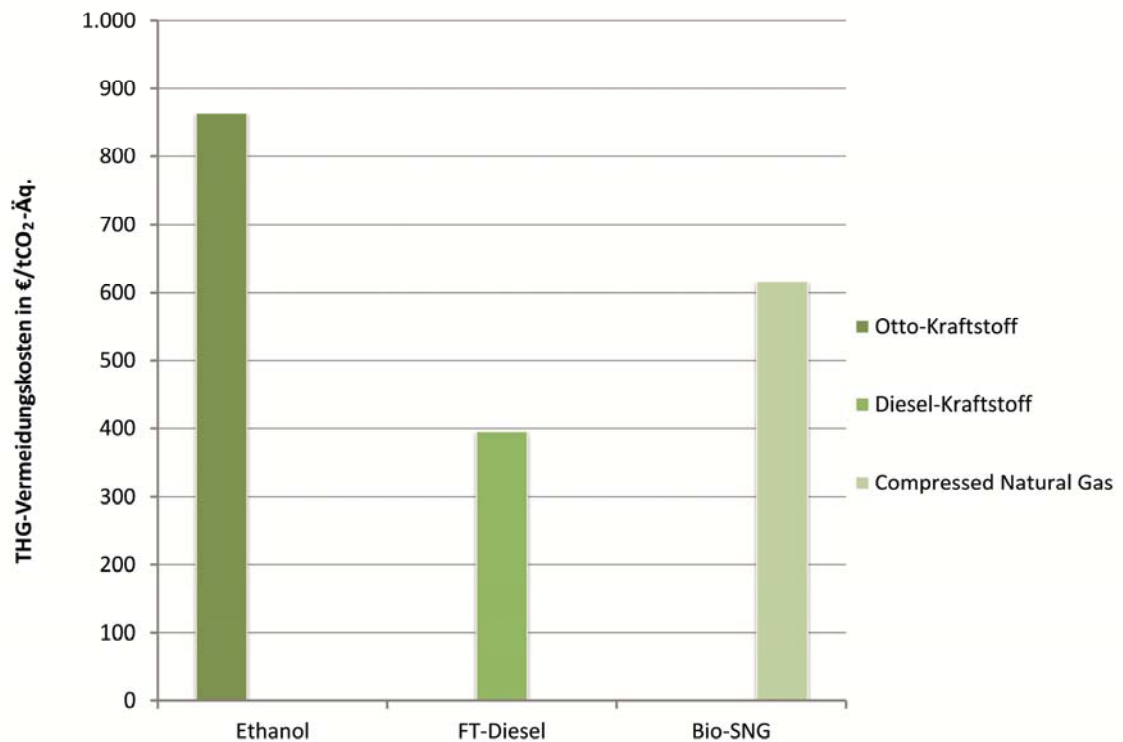


Abbildung 66: THG-Vermeidungskosten der Kraftstoffpfade (Kosten mit Bezugsjahr 2010)

7.4 Diskussion

Die Analysen zeigen, dass die Gesteungskosten sämtlicher Konzepte teilweise deutlich über denen der Referenzen liegen. Die optimierten Bereitstellungswege für Stroh senken die Kosten leicht (um ca. 0,3 bis 1,5 Cent pro Kilowattstunde bzw. ca. 2,5 % bis ca. 6 %). Bei fast allen Konzepten dominieren die verbrauchsgebundenen Kosten (mit ca. 28 % bis 59 %), gefolgt von den kapitalgebundenen Kosten (mit ca. 21 % bis 38 %). Die zukünftige Entwicklung der verbrauchsgebundenen Kosten, i.d.R. dominiert durch die Strohbereitstellung, ist schwer prognostizierbar. Inwieweit bei der Strohlogistik Optimierungen durchgeführt werden, hängt von den geschätzten oder absehbaren Absatzpotenzialen ab. Bei steigender Nutzung von Stroh kann es im Gegenzug zu Preissteigerungen kommen, da eventuell Nachfragekonkurrenzen entstehen. Bei hinreichender Marktdurchdringungen sind Einsparungen bei den kapitalgebundenen Kosten eher wahrscheinlich, da es sich teilweise um neue Technologien handelt, bei denen durch Absatz steigender Mengen und entsprechender Lernkurveneffekte die Investitionskosten sinken können. Bis auf die Biogasanlage kommt bei allen Konzepten Stroh als hauptsächlicher Rohstoff zum Einsatz. Eine zukünftige Alternative zur kostengünstigeren energetischen Verwertung von Stroh ist die Kombination mit anderen Rohstoffen.

Weitere Untersuchungen und Entwicklungen müssen zeigen, inwieweit die hohen Gesteungskosten die zukünftige Marktfähigkeit der Energieerzeugung aus Stroh einschränkt und welche Maßnahmen nötig sind, um diesen Rohstoff im zukünftigen Energiemix zu etablieren.

Die Anwendung von Bioenergie im Rahmen des Umbaus des Energiesystems unterliegt einer dynamischen Weiterentwicklung. Stroh verfügt hier über erhebliches Potenzial, sofern die

Wirtschaftlichkeit gegeben ist. Die Gestehungskosten sind ein erster Schritt in der diesbezüglichen Bewertung. Der nächste Schritt besteht in der Untersuchung der möglichen angebotenen Energieprodukte (auch außerhalb des EEG), deren erwartete Marktpreise, die nötigen Distributionskosten sowie der Vergleich mit Konkurrenzprodukten. Sollten die derzeitigen Marktbedingungen keine ausreichende Wirtschaftlichkeit der einzelnen Konzepte bieten, müssen zur Nutzung des Strohpotentials entsprechende Mechanismen in den Förder- und Umlagesystemen geschaffen werden. Das sogenannte „Double Counting“ im Kraftstoffbereich ist hier einer der richtungsweisenden Ansätze. In ihm ist festgelegt, dass Stroh als Reststoff bei der Erfüllung der THG-Einsparungen doppelt angerechnet werden kann. Ein weiterer Ansatz ist die Förderung der Nutzung von Stroh im EEG durch die Einordnung in die am höchsten vergütete Einsatzstoffklasse II. Zentraler Punkt dieser Maßnahmen sind die damit realisierbaren THG-Einsparungen. Diese werden detailliert im folgenden Kapitel 9 untersucht. Inwieweit das Double Counting sowie das EEG die Strohnutzung unterstützen, muss die zukünftige Nutzung dieser erst kürzlich eingeführten Maßnahmen zeigen.

Die erweiterte Marktbetrachtung sollte die einzelnen Märkte der Energieprodukte vor verschiedenen Zeithorizonten betrachten und die Effekte der Marktetablierung, speziell die Absenkung der Investitionskosten durch Lernkurven und die Preisentwicklung des Strohs durch seine energetische Nutzung einbeziehen. Letztendlich entscheidend ist auch die konkrete Standortbetrachtung. Potentielle Investoren verfolgen unterschiedliche Ziele. Fonds streben eine hohe und stabile Gewinnquote an, öffentliche Betreiber setzen auf eine sichere und kostengünstige Versorgung, industrielle Betreiber sehen eventuell eher eine auf ihre Bedürfnisse maßgeschneiderte und flexible Energieversorgung als Priorität. Privatleute suchen möglicherweise eher eine unkomplizierte, wartungsarme und kostengünstige Lösung. Wie auch immer die Motivation gelagert ist, stehen den potentiellen Investoren verschiedene Alternativen zur Verfügung, die sich an den konkreten Gegebenheiten vor Ort orientieren. Somit müssen auch die biogenen und fossilen Optionen detailliert betrachtet werden. Von Bedeutung sind hier Rohstoffpreisentwicklungen (fossil wie auch biogen), Zertifizierung von Biomasse, Nutzungskonkurrenzen sowie Einpreisungen der Umweltschäden durch Emissionshandel und ähnliche Mechanismen.

8 THG-Bilanzierung der Strohbereitstellung

[Autoren: Kirsten Wiegmann und Klaus Hennenberg (beide Öko-Institut)]

8.1 Einleitung

Ein Fokus des Projekts lag auf der Treibhausgasbilanzierung (THG-Bilanzierung) der Bereitstellung von Stroh. Ein weiterer war die Analyse und Beurteilung der Treibhausgasemissionen der gesamten Kette, einschließlich unterschiedlicher Konversionspfade (vgl. Kapitel 9).

Für die Emissionsbilanz der Strohbereitstellung wurden insbesondere Veränderungen des Bodenkohlenstoffgehalts sowie die Auswirkung von Logistikketten bei der Strohbereitung berücksichtigt. In diesem Kapitel wird ein methodischer Ansatz zur Integration der Humusbilanz in die THG-Bilanzierung vorgestellt und die Ergebnisse der THG-Bilanzierung anhand eines repräsentativen landwirtschaftlichen Betriebs mit hohem Anteil an Getreideanbau dargestellt. Zudem wird eine Optimierung des Beispielbetriebs hin zu einer hohen nachhaltigen Strohentnahme vorgestellt.

Die meisten Arbeiten zur THG-Bilanzierung von landwirtschaftlichen Produkten sowie die Datensätze in Datenbanken zur Öko-Bilanzierung (z. B. GEMIS³) setzen voraus, dass die übliche landwirtschaftliche Anbaupraxis innerhalb einer Fruchtfolge eine ausgeglichene Humusbilanz erreicht. Ist dies nicht der Fall, wird Bodenkohlenstoff Boden freigesetzt (Humuszehrung) oder atmosphärischer Kohlenstoff über Pflanzenwachstum und Humusbildung im Boden festgelegt. Die Entwicklung eines Bilanzierungsansatzes, der die Humusbilanz in die Treibhausgasbilanzierung integriert, ist eine Voraussetzung, um die Auswirkung der Bodenkohlenstoffflüsse auf die Treibhausgasbilanz einzuschätzen. Die Bedeutung des Bodenkohlenstoffs als CO₂-Senke ist international anerkannt (z. B. Kyoto-Protokoll) und in Deutschland wurden schon zahlreiche Studien zur Bedeutung des Bodenkohlenstoffs für den Klimaschutz durchgeführt bzw. befinden sich in Arbeit⁴. Effekte einer Landnutzungsänderungen – Konversion eines kohlenstoffreichen Flächentyps hin zu einem kohlenstoffarmen (bzw. umgekehrt) – werden bereits in der THG-Bilanzierung berücksichtigt (z. B. RED). Änderungen zum Bodenkohlenstoff innerhalb einer Landnutzungsform werden aber i. d. R. nicht in THG-Bilanzen abgedeckt [146].

Im Hinblick auf die Integration der Humusbilanz in die THG-Bilanzierung wurde beispielsweise von Cherubini und Ulgiati [147] die Veränderung des Bodenkohlenstoffgehalts durch die Entnahme von Stroh ermittelt. Die Autoren rechnen negative Effekte bei der Strohentnahme auf den Bodenkohlenstoffgehalt in die THG-Bilanz mit ein, sowie negative Effekte des Stickstoff-Entzugs mit der Strohentnahme, der durch eine Ersatzdüngung auszugleichen ist. Zwei weitere Beispiele sind die Arbeit von Gabrielle und Gagnaire [148] und Brandão et al. [149], die die Ergebnisse eines deterministischen Bodenkohlenstoffmodells für den Anbau von Feldfrüchten wie Getreidearten, Raps und Miscanthus in eine Lebenszyklus-Analyse (LCA) zur Bioenergieerstellung einbinden. Dabei wurde davon ausgegangen, dass ein verringerter Kohlenstoffaufbau durch die Strohentnahme dem Stroh

³ GEMIS: „Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme“ www.gemis.de

⁴ Überblick in Hüttl 2008 [145]; siehe zu laufenden Projekten z. B. Institut für Agrarrelevante Klimaforschung (vTI-AK): https://www.klimawandel-und-klimaschutz.de/index.php?id=315&lang=dt&act=institutions&i_id=451

zuzuordnen ist⁵. Diese Beispiele betrachten jedoch lediglich die Strohentnahme bzw. den Anbau einzelner Feldfrüchte. Effekte der gesamten Fruchtfolge werden nicht berücksichtigt.

Eine Kombination der Humusbilanz und der THG-Bilanz für Fruchtfolgen ist im Grundzug in dem Humusbilanz-Tool REPRO⁶ integriert. Dabei werden bilanzierte Veränderungen im Bodenkohlenstoff durch Anbau und Ernte von Fruchtarten in THG-Emissionen umgerechnet und zusammen mit den THG-Emissionen aus Aufwendungen wie Diesel- und Düngereinsatz (basierend auf Emissionsfaktoren) ausgewiesen. Eine Prüfung, ob diese Umsetzung mit den Anforderungen einer THG-Bilanzierung übereinstimmt, steht aber noch aus.

8.2 Methodik und Datenbasis

8.2.1 Zielsetzung und Fragestellungen

Ein Kernziel bei der Bilanzierung der bereitstellungsbedingten Treibhausgasemissionen (THG) ist es, den Bodenkohlenstoffauf- und -abbau für Fruchtfolgen mit dauerhafter Strohentnahme zu berücksichtigen. Dies findet in der gängigen THG-Bilanzierung nicht statt (s. o.). Hierzu wurden im Projekt folgende übergreifende Aspekte betrachtet:

- Nimmt die THG-Bilanz des Bodenkohlenstoffes eine relevante Größenordnung im Vergleich zu Inputs wie Diesel und Dünger ein?
- Wie und in wieweit lässt sich die Bilanzierung des Bodenkohlenstoffs bei der Bilanzierung der bereitstellungsbedingten THG-Emissionen berücksichtigen?
- Methodische Umsetzung der bereitstellungsbedingten THG-Emissionen in Bilanzierungstools wie GEMIS (Ökobilanzierung) und REPRO (primär Humusbilanzierung)
- Wie stellt sich die THG-Bilanz von Stroh dar, wenn der Entzug an Bodenkohlenstoff und Stickstoff berücksichtigt werden?
- Wie wirkten sich Bergungsvarianten und Strohballenarten auf die THG-Bilanz aus?
- Wie wirkt sich eine Optimierung der Fruchtfolge auf eine mögliche Strohentnahme und die THG-Bilanz aus?

8.2.2 Der Einfluss der Strohentnahme auf die organische Bodensubstanz

Im traditionellen Getreideanbausystem (ohne Strohentnahme für die Energienutzung) verbleibt das Stroh auf dem Feld oder es wird für die Tiereinstreu verwendet und anschließend als organischer Dünger auf die Felder rückgeführt.

Das Stroh wird zerkleinert und von Maschinen bzw. der Bodenfauna in den Boden eingearbeitet und zersetzt. Dabei wird der meiste im Stroh gebundene Kohlenstoff kurzfristig als Kohlendioxid (sog. Bodenatmung) in die Atmosphäre entlassen. Ein kleinerer Teil wird jedoch in der organischen Bodensubstanz festgelegt. Die Höhe dieser Kohlenstofffixierung ist von zahlreichen Bodenparametern sowie dem Klima abhängig.

In einem Getreideanbau mit Strohentnahme für die Energienutzung steigt die gesamte geerntete Menge an und damit auch die Kohlenstoffentnahme aus dem Anbausystem. Für die kurzfristig umgesetzte

⁵ Zur Diskussion der unterschiedlichen Ansätze zur Bestimmung der Bodenkohlenstoffdynamik siehe Kap. 3.1.2

⁶ REPRO Betriebsbilanzierungsmodell der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Hülsbergen, 2003)

Kohlenstofffraktion des Stroh entsteht durch die Entnahme kein Unterschied in der Kohlenstoffbilanz. Es gelangt in jedem Falle wieder in die Atmosphäre. Im Vergleich zum traditionellen Getreideanbau führt also die Strohentnahme zu einem zusätzlichen Kohlenstoffverlust aus der Fraktion die eigentlich (potenziell) zu Humus festgelegt werden würde. Dabei handelt es sich um eine sogenannte entgangene Sequestrierung. Beide Anbausysteme (mit und ohne Strohnutzung) sind in Abbildung 67 illustriert.

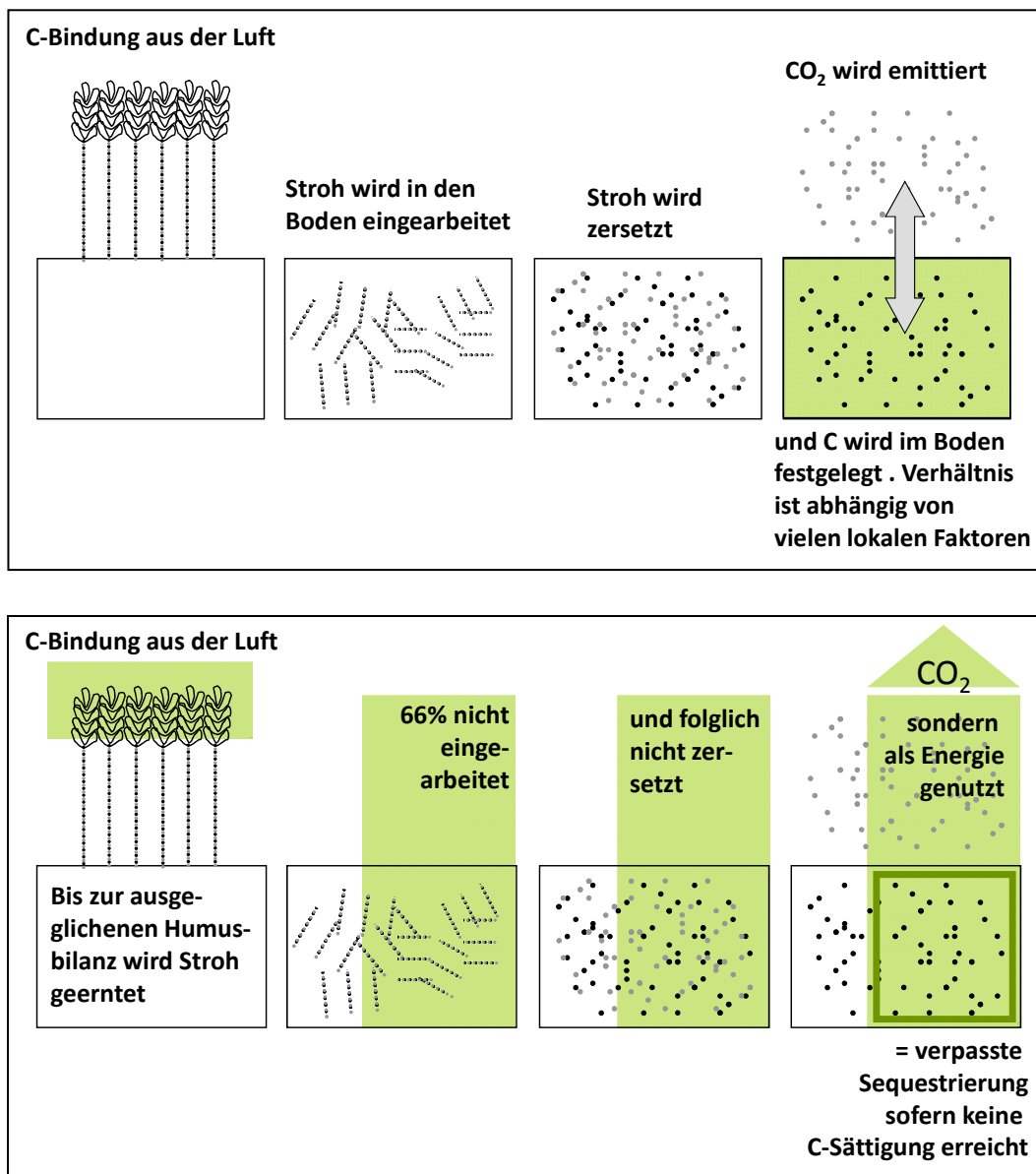


Abbildung 67: Kohlenstoffkreislauf im Getreideanbau mit und ohne Strohentnahme

Die Quantifizierung der Kohlenstoffflüsse sowie des Bodenkohlenstoffgehalts und seiner Dynamik sind aus zwei Perspektiven relevant:

1. Aktueller Bodenkohlenstoff-Pool:

Prinzipiell können Humusbilanzen herangezogen werden um eine schlagspezifische oder regionale Strohextraktionsrate zu ermitteln. Wird nur so viel Stroh entnommen, dass die Humusbilanz

ausgeglichen ist, wird der Fortbestand der vorhandenen Bodenkohlenstoffgehalte garantiert. Dies trifft zu, sofern Humusbilanzen die aktuellen Kohlenstoffflüsse für verschiedene Standorte in ausreichender Genauigkeit beschreiben. Die entgangene Sequestrierung kann aber auch bei diesem Vorgehen auftreten.

2. Zukünftiger Bodenkohlenstoff-Pool:

Das Ausmaß der entgangenen Sequestrierung durch die Entnahme von Stroh kann mit Hilfe von Humusbilanzen kalkuliert werden. Weiterhin können diese in THG-Emissionen umgerechnet werden um diese in die THG-Bilanzen für Biokraftstoffe oder andere Bioenergienutzungen zu integrieren [149][147][148]. Generell können die THG-Bilanzen um Bodenkohlenstoffverluste ergänzt werden. Sollten sie im Rahmen der RED erfasst werden, so könnten sie als direkte Landnutzungsveränderung einfließen.

8.2.3 Bedeutung des Bodenkohlenstoff auf- und -abbau für die THG-Bilanzierung

Nimmt die THG-Bilanz des Bodenkohlenstoffes eine relevante Größenordnung im Vergleich zu Inputs wie Diesel und Dünger ein?

Im Rahmen der Humusbilanzierung (VDLUFA, HE-Methode) wird für die C-Freisetzung und Bindung beim Anbau von Feldfrüchten im Grundzug zwischen zwei Aspekten unterschieden:

- C-Freisetzung oder C-Bindung durch den Anbau.
- C-Bindung durch den Verbleib von Reststoffen bzw. Ernterückständen auf der Fläche.

Dabei geht die VDLUFA-Methode von einer fixen C-Freisetzung oder C-Bindung pro Fläche aus während der HE-Methode ein dynamisches Modell hinterlegt ist. Die Ergebnisse der HE-Methode sind abhängig von der Bodenart, den klimatischen Standortbedingungen, der Erntemenge, sowie der zugeführten mineralischen und organischen Düngung [150]. Anhand dieser Werte kann die Größenordnung der THG-Freisetzung bzw. Fixierung für den Anbau von Weizenkorn und die Entnahme von Weizenstroh für ein Anbaujahr eingeschätzt werden. Die Bodenkohlenstoffkoeffizienten nach VDLUFA sowie die Rechenergebnisse der HE-Methode sind in Anhang [Tabelle A 18 und Tabelle A 19] zusammengestellt.

Einen Überblick über das Beispiel der humusbedingten THG-Freisetzungen für den Anbau von Weizenkörnern gibt Tabelle 32⁷. Hier sind die Ergebnisse der drei verwendeten Methoden im Überblick dargestellt. Dabei wird die THG-Bindung auf den Heizwert des Weizenkorns bezogen. Dies ist relevant, wenn das Stroh auf der Fläche verbleibt. Die THG-Freisetzung der Strohentnahme wird dagegen dem Weizenstroh zugerechnet.

⁷ Die Tabelle führt nur beispielhaft die Rechnung nach VDLUFA oberer Wert auf. Deren Werte bewegen sich in der Mitte des Wertespektrums der angewandten Methoden, die Ergebnisse sämtlicher Rechnungen sind im Anhang dargestellt.

Tabelle 32: Humus-bedingte THG-Freisetzung und -Bindung für den Weizenanbau mit und ohne Strohentnahme – Ergebnisse aller drei Methoden

	SUMME ANBAU ohne Strohentnahme (g CO ₂ -Äq./MJ _{Korn})	SUMME ANBAU mit Strohentnahme (g CO ₂ -Äq./MJ _{Korn})	Differenz ohne und mit Strohentnahme (g CO ₂ -Äq./MJ _{Korn})
VDLUFAo	-6,85	6,4	13,25
VDLUFAu	-11	2,44	13,28
HE-Methode	-9,31 bis 4,11	1,26 bis 14,68	10,57

Negative Werte = Bindung im Boden, positive Werte = Freisetzung in die Atmosphäre

Eine differenziertere Darstellung der wichtigsten Kennwerte und Rechenschritte für die Berechnung liefert Tabelle 33 für das Beispiel der VDLUFA-Methode (unterer Wert). Eine detaillierte Darstellung aller drei Methoden befindet sich im Anhang (siehe Tabelle A 20 und Tabelle A 21). Weitere Ausführungen zu diesem Vorgehen und möglichen Varianten siehe Unterkapitel 8.2.4.

Die Differenz der THG-Bilanz für den Anbau mit und ohne Strohentnahme nimmt eine Größenordnung von 10 g CO₂-Äq./MJ ein. Diese Emissionen sind der Strohentnahme zuzuweisen, da ohne Strohentnahme der Effekt nicht auftreten würde. Anbaubedingte THG-Emission durch Inputs wie Diesel, Dünger und Pestizide und der Lachgasfreisetzung aufgrund von N-Düngung liegen für Weizenkörner in der Größenordnung von 23 g CO₂-Äq./MJ (Tabelle 41). Zusammenfassend ist daher festzuhalten, dass die THG-Freisetzung aus dem Humusauf- und -abbau eine relevante Größenordnung einnehmen kann. Daher ist es berechtigt, diesen Parameter in der THG-Bilanz zu berücksichtigen. Dies ist insbesondere bei einer energetischen Nutzung der Fall, deren politische Förderung mit einer Reduktion von THG-Emissionen begründet ist und die Berechnung der THG-Emissionen in gesetzlich vorgeschriebenen Bilanzierungsverfahren gefordert wird (RED).

Tabelle 33: Kennwerte und Rechenschritte für die humusbedingte THG-Freisetzung und -Bindung für den Weizenanbau mit und ohne Strohentnahme

Parameter	Berechnung	VDLUFA_o
ANBAU - Freisetzung durch Bodenbearbeitung		
C-Humus Koeffizient Anbau Korn	(kg Humus-C/ha)	-400
CO ₂ -Äq. Koeffizient Anbau Korn	(kg CO ₂ -Äq./ha)	1.468
Trockenmasseertrag Körner	(t _{TM} /ha)	6,53
Heizwert Körner	(MJ/kg _{TS})	17
THG-Freisetzung Anbau HP	(g CO ₂ -Äq./MJ _{Korn})	(1) 13,22
Energieertrag Korn	(MJ/ha)	(2) 111,01
Energieertrag Stroh (bei 66% Entnahmerate)	(MJ/ha)	59,36
ANBAU – Bindung durch Verbleib des Strohs auf der Fläche		
C-Humus Koeffizient Reststoff	(kg Humus-C/t _{TS})	116,3*

CO ₂ -Äq. Koeffizient Stroh	(kg CO ₂ -Äq./t _{TM})	(3)	426,8
Strohertrag (tTS/ha)		(4)	5,22
THG-Bindung Anbau (Stroh)	(g CO ₂ -Äq./MJ _{Korn})	(5)=(3)*(4)/(2)	20,07
	(kg CO ₂ -Äq./ha)	(6)=(3)*(4)	2227,9
SUMME ANBAU ohne Strohentnahme	(g CO ₂ -Äq./MJ _{Korn})	(7)=(1)-(5)	-6,85
ANBAU - mit Strohentnahme			
Bergungsrate		(8)	0,66
Verbliebene THG-Bindung Stroh	(g CO ₂ -Äq./MJ _{Korn})	(9)=(5)*(1-(8))	-6,82
	(kg CO ₂ -Äq./ha)	(10)=(6)*(1-(8))	757,5
SUMME ANBAU mit Strohentnahme	(g CO ₂ -Äq./MJ _{Korn})	(11)=(1)-(9)	6,4

*ergibt sich aus der Umrechnung von FM zu TM von 100 (80-110) kg Humus-C/t_{FM}

8.2.4 Integration der Humusbilanz in die THG-Bilanz

Wie und in wieweit lässt sich die Bilanzierung des Bodenkohlenstoffs bei der Bilanzierung der bereitstellungsbedingten THG-Emissionen berücksichtigen?

Die Ansätze der THG-Bilanzierung und der Humusbilanzierung unterscheiden sich in der in den Systemgrenzen, für die die Bilanzierungen durchgeführt werden. Der Ansatz der Humusbilanzierung betrachtet die Humusveränderungen, die über eine gesamte Fruchtfolge (Dauer und Fläche) entstehen. Dies bedeutet, dass der Bezugsraum nicht der Anbau einer einzelnen Fruchtart ist, sondern die Summe aller angebauten Fruchtarten inklusive einer Winterzwischenfrucht sowie von Bracheflächen darstellt. Die THG-Bilanzierung hingegen betrachtet i. d. R. nur eine ausgewählte Fruchtart – wenngleich auch sog. „Hofterbilanzen“ durchgeführt werden können. Vor aber allem fließen in die THG-Bilanz sämtliche Aktivitäten ein, die zu THG-Emissionen führen. Das umfasst sowohl technische Vorgänge (wie z. B. Dieselerbrennung, Düngemittelproduktion) als auch natürliche (z. B. Lachgasverluste in infolge der Düngerumsetzung auf dem Feld).

Die Humusbilanz stellt eine Möglichkeit dar, landnutzungsbedingte THG-Emissionen in die THG-Bilanz zu integrieren, die bisher nicht berücksichtigt sind. Trotz der genannten Unterschiede der Methoden ist für einzelne Fruchtarten eine Integration der THG-Emissionen, die durch einen Bodenkohlenstoffauf- und -abbau hervorgerufen werden, durchaus möglich, auch wenn nicht immer eine fruchtartenscharfe Zuordnung erfolgen kann. Dabei müssen einige Zurechnungsvorschriften getroffen werden:

- Effekte für den Bodenkohlenstoff durch den Anbau (Bodenbearbeitung, Entnahme von Hauptprodukten) und durch die Entnahme von Reststoffen (Stroh) können fruchtartenscharf zugeordnet werden.

- Positive Effekte für den Bodenkohlenstoff aus dem Anbau einer Winterzwischenfrucht und einer Brache können nicht fruchtartenscharf zugeordnet werden, sondern sind als eine Verbesserung der Humusbilanz der gesamten Fruchtfolge zu sehen. Es besteht aber die Möglichkeit, diese positiven Effekte anteilig auf alle angebauten Fruchtarten anzurechnen, da idealisiert davon ausgegangen werden kann, dass jede der Fruchtarten in der Rotation über die Jahre auf jeder Fläche angebaut wird.
- Eine Wirtschaftsdüngergabe verbessert die Humusbilanz deutlich und kann grundsätzlich fruchtartenscharf zugeordnet werden. Allerdings besteht hier ein deutliches Potenzial, THG-Bilanzen einzelner Fruchtarten innerhalb einer Fruchtfolge zu beeinflussen und damit die THG-Bilanz von Fruchtarten zu manipulieren (siehe Text unten).

In dem methodischen Ansatz zur THG-Bilanzierung unter Berücksichtigung des Bodenkohlenstoffs wurden diese drei Aspekte berücksichtigt (siehe Tabelle 33). Die THG-Bilanzierung für den Anbau der Fruchtarten (Diseleinsatz, Dünger, Lachgasfreisetzung) folgt den Anforderungen der Erneuerbaren Energien Richtlinie (RED, siehe auch [131]). Bodenkohlenstoffumsätze werden für die Anbauflächen nach VDLUFA_u und VDLUFA_o [58] sowie dynamisch nach der HE-Methode (Humus-Einheiten-Methode; [59] bestimmt. Bodenkohlenstoffumsätze, die aus dem Anbau, der Ernte und der Entnahme von Reststoffen entstehen, werden fruchtartenscharf in die Bilanz einbezogen. THG-Emissionen und eine C-Bindung im Boden, die durch eine Winterzwischenfrucht oder eine Brache resultieren (Bodenkohlenstoff, Diseleinsatz), werden anteilig nach der Anbaufläche den übrigen Fruchtarten zugerechnet.

Im Hinblick auf den Wirtschaftsdüngereinsatz könnte der Landwirt die Getreideflächen für die Ethanolherstellung gezielt mit Wirtschaftsdünger düngen und Mineraldünger auf die anderen Kulturen aufbringen. Dadurch würde – wenn die Bodenkohlenstoffbilanz in der THG-Bilanz (z. B. RED) berücksichtigt würde – die THG-Bilanz verbessert werden und so eine geforderte Reduktion der THG-Emissionen erreicht werden. Mit einem solchen Vorgehen wären aber potenziell zwei ungewollte Effekte verbunden: Zum einen würde der Humusgehalt des Wirtschaftsdüngers dann auf anderen Flächen fehlen. Wie z. B. auf der Zuckerrübenanbaufläche (zur Nahrungsproduktion), wo er eigentlich eingesetzt werden würde um die hohe Kohlenstoffzehrung des Hackfrüchteanbaus zu kompensieren (siehe Beispielbetrieb in 8.3.6). Ein weiterer ungewollter Effekt könnte eine Überdüngung mit Wirtschaftsdünger sein, da dieser dann vorrangig zum Ausgleich der Humusbilanz aufgebracht würde statt zum Ausgleich der Nährstoffbilanz.

Damit eine THG-Bilanzierung keinen Anreiz in diese Richtung setzt, sollten die Vorschriften zur Bilanzierung des Bodenkohlenstoffs Effekte durch Wirtschaftsdünger anteilig auf alle Anbauflächen angerechnet werden – ebenso wie für eine Winterzwischenfrucht oder eine Brache. Dieser Ansatz bedeutet, dass der Kohlenstoffeintrag dem gesamten Anbausystem zu Gute kommt. Die Nährstoffgabe im organischen Dünger betrifft aber die Flächen, auf die der Wirtschaftsdünger ausgebracht wird. Da die Ausbringung des Wirtschaftsdüngers primär der Düngung von Flächen dient, werden Aufwendungen zur Ausbringung (Diseleinsatz) fruchtartenscharf betrachtet (siehe Tabelle 34).

Im Bilanzansatz wird für die Aufwendungen beim Anbau keine Allokation zwischen dem Hauptprodukt Korn und dem Reststoff Stroh vorgenommen, was dem Ansatz in der RED entspricht. Eine Allokation der Effekte des Bodenkohlenstoffs zwischen Korn und Stroh würde im Prinzip die Effekte der

Humusbilanz wieder aufheben und damit der angestrebten Integration der Humusbilanz in die THG-Bilanzierung entgegenlaufen. Im Hinblick auf die beschriebene Umlage wurde entschieden, sie nur auf die angebauten Hauptfruchtarten durchzuführen. Das heißt, bei der Entnahme des Reststoffs Stroh wird keine Umlage in der THG-Bilanz berücksichtigt. Dahinter steht der Gedanke, dass eine Strohentnahme eine zusätzliche Aktivität ist, die die übrige Konstellation einer Fruchtfolge nicht beeinflussen sollte.

Die Datengrundlage für die Integration der Humusbilanz in die THG-Bilanzierung stammt aus den Humusbilanz-Methoden VDELUFA und der HE-Methode. Dabei wird grundsätzlich angenommen, dass eine lineare Zu- bzw. Abnahme des Bodenkohlenstoffs vorliegt, die auf statische Werte aus VDLUFA bzw. dynamische Werte der HE-Methode basiert. Diese Annahme bedeutet, dass die Analyse nur akzeptable Ergebnisse liefert, wenn der Bodenkohlenstoffgehalt der untersuchten Flächen noch nicht in dem Bereich einer Sättigung oder auf einem deutlichen Wege dorthin befindet. Diese Einschränkung ist bei der Bewertung von Ergebnissen zu berücksichtigen.

Der hier vorgestellte methodische Ansatz ermöglicht eine fruchtarten- sowie eine flächenscharfe Zuordnung aller THG-Emissionen inklusive der Änderung des Bodenkohlenstoffgehalts. In der vorliegenden Studie werden THG-Emissionen für einen Beispielbetrieb nach diesem Ansatz berechnet und für die Fruchtarten und die Strohentnahme sowie für die gesamte Fruchtfolge dargestellt.

Für die Bilanzierung nach diesem Ansatz ist stets ein vollständiger Datensatz für die gesamte Fruchtfolge notwendig. Dadurch ergeben sich für den Anbau einer Fruchtart unterschiedliche THG-Bilanzen in Abhängigkeit von der Fruchtfolge. Dies erschwert die Einbindung in Bilanzierungstools, die weniger auf die kleinräumige Heterogenität als mehr auf räumlich übergreifende Aussagen abzielen. Beispielsweise wäre es denkbar, aber auch kritisch, in einem Bilanzierungstool wie GEMIS idealisiert deutschlandweite oder Regionen-typische Fruchtfolgen abzubilden.

Tabelle 34: Überblick zum Bilanzrahmen (Umlagesystem)

Aufwendung	Berücksichtigung
Dieseleinsatz (inklusive Ausbringung des Wirtschaftsdüngers)	Flächenscharf für die Fruchtarten
Aufwendungen für die Herstellung anorganischer Dünger (N, P, K, Ca)	Flächenscharf für die Fruchtarten
Pestizideinsatz	Flächenscharf für die Fruchtarten
Lachgasfreisetzung (N-Düngung; organisch und mineralisch)	Flächenscharf für die Fruchtarten
Bodenkohlenstoffbilanz für Anbau und Ernte	Flächenscharf für die Fruchtarten
Bodenkohlenstoffbilanz für die Entnahme von Reststoffen (Stroh)	Flächenscharf für die Fruchtarten / den Reststoff
Bodenkohlenstoffbilanz für den Wirtschaftsdünger	Anteilige Umlage auf die Anbaufläche der Fruchtarten (Winterzwischenfrucht und Brache werden nicht gedüngt)
Bodenkohlenstoffbilanz für Winterzwischenfrucht und Brache	Anteilige Umlage auf die Anbaufläche der Fruchtarten

8.2.5 Betrachtete Aufwendungen und Emissionen für den Anbau und die Strohentnahme

Dieseleinsatz, Pestizideinsatz und Düngegaben werden fruchtartenscharf bilanziert (siehe z. B. Tabelle 37). Für anorganischen Dünger werden N, P, K und Ca berücksichtigt. Für Nährstoffe aus Wirtschaftsdünger wird – anders als für den Kohlenstoff – ebenfalls flächenscharf bilanziert. Dabei wird von einer Nährstofffreisetzung in dem Ausbringungsjahr von 50 % ausgegangen.

Zur Berechnung der Lachgasfreisetzung werden – wie in der RED – die IPCC-Werte nach IPCC (2006) [151] verwendet und auf die oben beschriebene Düngergabe (N-anorganisch und N aus Wirtschaftsdünger) im Anbaujahr bezogen. Der Wert beträgt 1,0 % Freisetzung des N als Lachgas. Lachgasfreisetzungen aus dem Stickstoff, der aus Reststoffen, Ernterückstände und Winterzwischenfrucht stammt, werden in dieser Studie allerdings nicht berücksichtigt. Dieser Stickstoff wird i.d.R. erst in den folgenden Jahren verfügbar und reduziert dann die nötige N-Gabe für die angebaute Fruchtart. In ähnlicher Weise wie für die Integration der Humus-Bilanz müsste hierzu ein methodischer Ansatz entwickelt werden, der die Lachgasfreisetzung innerhalb der Fruchtfolge bilanziert, was aber den Rahmen dieses Projekts sprengt.

Mit der Strohentnahme werden zudem Nährstoffe entzogen. In Anlehnung an die Düngeverordnung [152] wird in der vorliegenden Bilanzierung allein der Stickstoffentzug berücksichtigt, und zwar mit einem N-Gehalt von 0,5 kg/t_{FM} Stroh. Es wird davon ausgegangen, dass der entzogene Stickstoff in Zuge der Fruchtfolge durch eine Ersatzdüngung ausgeglichen werden muss. Da dieser Mehraufwand durch die Strohentnahme bedingt ist, werden THG-Effekte der Strohentnahme zugeschlagen. Eine Lachgasfreisetzung für diese Ausgleichsdüngung wird nicht berücksichtigt, denn es wird Stickstoff aus dem Stroh ersetzt, für den – wie oben beschrieben – keine Lachgasfreisetzung berücksichtigt wird. Dies entspricht im Grundzug der Bilanzierung in Cherubini und Ulgiati [147]. Für die Bergung sind zudem Aufwendungen in Form Dieseleinsatz nötig (siehe Tabelle 37 und Tabelle 41).

8.2.6 Vergleich der Datenbasis der verwendeten Bilanzierungstools

Beschreibung der methodischen Umsetzung der bereitstellungsbedingten THG-Emissionen in Bilanzierungstools wie GEMIS (Ökobilanzierung) und REPRO (primär Humusbilanzierung)

Für die THG-Bilanzierung werden verschiedene Parameter als fixe Eingangsdaten bestimmt. Hierzu zählen Heizwerte, Trockenmassenanteile für die Fruchtarten und Reststoffe und Massenverhältnisse von Hauptprodukt und Nebenprodukt (Anhang Tabelle A 17), Koeffizienten für die Humusbilanz nach VDLUFA (Anhang Tabelle A 18) und Emissionsfaktoren für Inputs bei Anbau und Ernte.

Tabelle 35: Emissionsfaktoren für Inputs bei Anbau und Ernte nach unterschiedlichen Quellen

	GEMIS ⁸	REPRO ⁹	IFEU ¹⁰	BioGrace ¹¹
	g CO ₂ -Äq./kg			
Diesel	3.725	3.567	--	3.777
Dünger N (Herstellung)	7.574	2.852	6.409	5.917
Dünger P	1.250	2.573	1.179	2.321
Dünger K	1.195	752	663	698
Dünger Ca	309	--	297	182
Pflanzenschutzmittel	12.315	23.103	12.370	11.026

Fett & kursiv = Daten mit der größten Abweichung / Ausreißer

Die Emissionsfaktoren für Inputs bei Anbau und Ernte einzelner Quellen unterscheiden sich mitunter deutlich (vgl. Tabelle 35):

- So weichen die THG-Emissionen aus REPRO für die Herstellung von N-Dünger und von Pestiziden deutlich von denen der anderen Quellen ab. Dabei liegt die N-Düngerproduktion mit einem verhältnismäßig niedrigen Wert bei 2.852 g CO₂-Äq./kg während bei der Herstellung von Pestiziden von einem hohen Wert von 23.103 g CO₂-Äq./kg ausgegangen wird.
- Die Emissionswerte für die Herstellung von P-Dünger ergeben ein zerrissenes Bild: Bei REPRO und BioGrace sind sie fast doppelt so hoch wie bei GEMIS und IFEU
- Für die K-Düngerproduktion liegt in GEMIS der Emissionsfaktor deutlich höher als bei den übrigen Datensätzen.
- Für die Herstellung von Ca-Dünger liefert REPRO keine Daten. Die THG-Emissionen liegen bei BioGrace um etwa ein Drittel niedriger als die der anderen zwei Quellen.

Diese Unterschiede führen bei der THG-Bilanzierung des Anbaus der Feldfrüchte zu abweichenden Ergebnissen. Dabei ergeben insbesondere die Emissionswerte, die in REPRO verwendet werden, verhältnismäßig geringe THG-Emissionen im Vergleich zu den Berechnungen auf Basis der anderen Datenquellen, wobei nach GEMIS die Werte am höchsten liegen (Tabelle 36). In Anhang C der RED wird als Voreinstellwert 23 g CO₂-Äq./MJ angenommen, was dem Wert nach BioGrace am nächsten kommt (vgl. Tabelle 36).

⁸ GEMIS: „Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme“ www.gemis.de; Es ist zu beachten, dass die verwendeten Daten unterschiedliche Bezugsjahre aufweisen: 2010 für N, 2000 für K und Ca, Daten vor 2000 für P und Pflanzenschutz.

⁹ Im Programm REPRO sind die Werte nach [153] hinterlegt

¹⁰ Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU) – institutsinterne Datenbank, die bei der Berechnung der Voreinstellwerte der deutschen Biomasse-Nachhaltigkeitsverordnung (BioNachV) aus dem Jahr 2007 verwendete wurden (Kontakt: Horst Fehrenbach).

¹¹ <http://www.biograce.net/content/ghgcalculationtools/standardvalues>

Tabelle 36: Auswirkung der unterschiedlichen Emissionsfaktoren am Beispiel des Weizenanbaus (ohne Humus)

	Aufwendungen Anbau				THG ohne Humus
	Diesel	Dünger	Pestizide	Lachgas	
(g CO ₂ -Äq/MJ)					
GEMIS	2,51	13,00	0,50	8,03	24,04
REPRO	2,40	4,89	0,94	8,03	16,26
IFEU (2007)	2,49	10,99	0,50	8,03	22,01
BioGrace	2,55	10,15	0,45	8,03	21,18

Ein zweiter Punkt ist, dass REPRO in den Berechnungen für den Energiegehalt des Endproduktes die in der Landwirtschaft übliche Bruttoenergie [59] nutzt, wohingegen in der THG-Bilanzierung sich die Verwendung des Heizwertes durchgesetzt hat (siehe RED und [131]). Hinzu kommt, dass in REPRO der oben erläuterte Bilanzrahmen (Tabelle 34) nicht eins zu eins implementiert ist. Beispielsweise wird keine Umlage des Kohlenstoffs aus dem Wirtschaftsdünger vorgenommen sondern der Effekt der gedüngten Fruchtart zugeschrieben.

Aus diesen Gründen ist eine direkte Vergleichbarkeit der Bilanzierung in Tools wie GEMIS oder REPRO nicht möglich. Es wurde daher in der vorliegenden Studie ein Excel-basiertes Berechnungs-Tool erstellt, um die Einbindung der Humusbilanz in die THG-Bilanzierung abzubilden. Dabei wurden die Emissionsfaktoren nach BioGrace verwendet (Tabelle 36), da es sich bei diesen Daten um einen EU-weiten Datensatz handelt, der im Hinblick auf die Verwendung in der RED harmonisiert wurde. In dieses Tool werden zudem variable Eingangsdaten für den Anbau der einzelnen Fruchtarten eingegeben. Hierzu zählen Anbaufläche, Erträge, Fläche mit Reststoffentnahme (Stroh), Anteil der Strohentnahme, Aufwendungen für den Anbau (Diesel, N, P, K, Ca, Pestizide, organischer Dünger) und Kennwerte der C-Koeffizienten, die dynamisch in REPRO für einen Beispielbetrieb bestimmt werden (Tabelle 40).

8.3 Ergebnisse

8.3.1 Treibhausgasbilanz der Strohbereitstellung – Weizenanbau (Einzelkultur)

Wie stellt sich die THG-Bilanz von Stroh dar, wenn der Entzug an Bodenkohlenstoff und Stickstoff berücksichtigt werden?

Zur Erläuterung der Ergebnisse der THG-Bilanzierung und da der Fokus des Projekts auf der Nutzung des Reststoffs Stroh liegt, wird an dieser Stelle exemplarisch der Anbau von Weizen und die Entnahme des Strohs betrachtet. D.h. die Humusbilanz bezieht sich nur auf das einzelne Anbaujahr, nicht auf die gesamte Fruchtfolge; so entsteht ein Bild, als würde der Weizen in Selbstfolge angebaut werden. Die Anbaudaten stammen aus dem Beispielbetrieb in Unterkapitel 8.3.6. Bei der Strohentnahme kann zudem zwischen zwei Bergungsvarianten und Ballenarten unterschieden werden (Tabelle 37).

8.3.2 Mögliche Strohentnahme bei ausgeglichener Humusbilanz

Die Getreideproduktion auf den 90 ha Anbaufläche des Beispielbetriebs liegt bei 589 Tonnen. Durch die Anforderung, dass beim Anbau mit Strohentnahme eine ausgeglichene Humusbilanz erzielt werden

muss, kann je nach Methode zur Humusbilanzierung eine unterschiedliche Menge an Stroh entnommen werden (vgl. Tabelle 37 und Abbildung 68). Von den 90 ha Weizenanbaufläche können nach VDLUFA_u bis zur ausgeglichenen Humusbilanz ca. 254 Tonnen Stroh geerntet werden, was einer vollständigen Entnahme auf einer Fläche von ca. 74,6 ha entspricht. Nach VDLUFA_o liegt der Wert bei 161 Tonnen Stroh (46,7 ha) und nach der HE-Methode bei 184 Tonnen (53,2 ha).

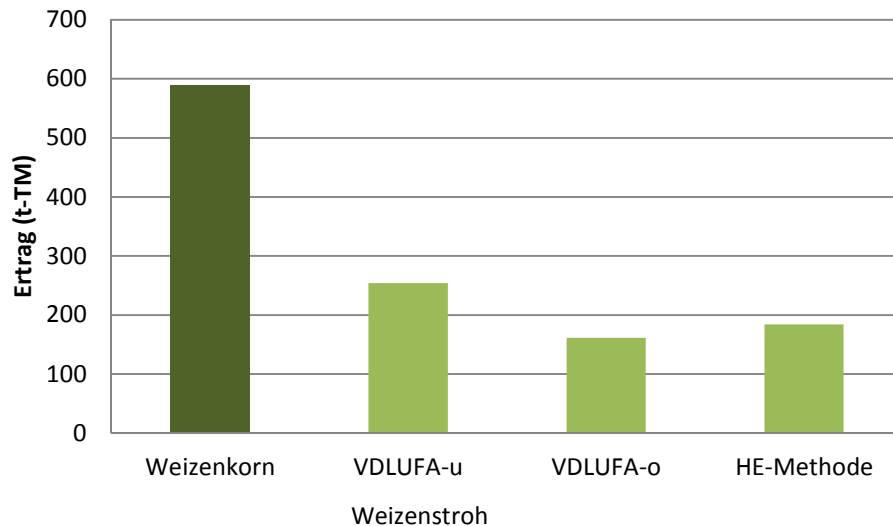


Abbildung 68: Ertrag an Weizenkörnern und an Weizenstroh von 90 ha Anbaufläche eines Beispielbetriebs bei einer ausgeglichenen Humusbilanz

8.3.3 THG-Bilanz mit und ohne Integration von Bodenkohlenstoffveränderungen

Der Weizenanbau *ohne* Berücksichtigung des Bodenkohlenstoffs führt zu einer Freisetzung von 21,81 g CO₂-Äq./MJ Weizen. Dabei entfällt ein Großteil auf die Düngergabe und die damit verbundene Lachgasfreisetzung (zusammen 18,18 g CO₂-Äq./MJ). Die Strohentnahme ohne Berücksichtigung der Humusbilanz führt dagegen zu dem deutlich kleineren Wert von 1,95 g CO₂-Äq./MJ, der durch die Ersatzdüngung für N dominiert wird (vgl. Abbildung 69). Die Ermittlung dieser Werte ist grundsätzlich mit der RED-Bilanzierungsweise konform, mit der Ausnahme, dass die Ersatzdüngung nach der RED nicht zu berücksichtigen ist. Ohne die Ersatzdüngung käme das Stroh lediglich auf einen Wert von 0,23 g CO₂-Äq./MJ (Tabelle 37).

Wird der Bodenkohlenstoff mit in die THG-Bilanz integriert, entstehen Unterschiede

- für die beiden Fälle mit und ohne Strohentnahme
- sowie je nach Humusbilanzmethode

Zunächst werden hier die Fälle des Weizenanbaus mit und ohne Strohentnahme unter Einbeziehung von Bodenkohlenstoffeffekten betrachtet. Dies erfolgt exemplarisch anhand der Ergebnisse für VDLUFA_o. Alle im Weiteren beschriebenen Werte können in Tabelle 37 nachvollzogen werden.

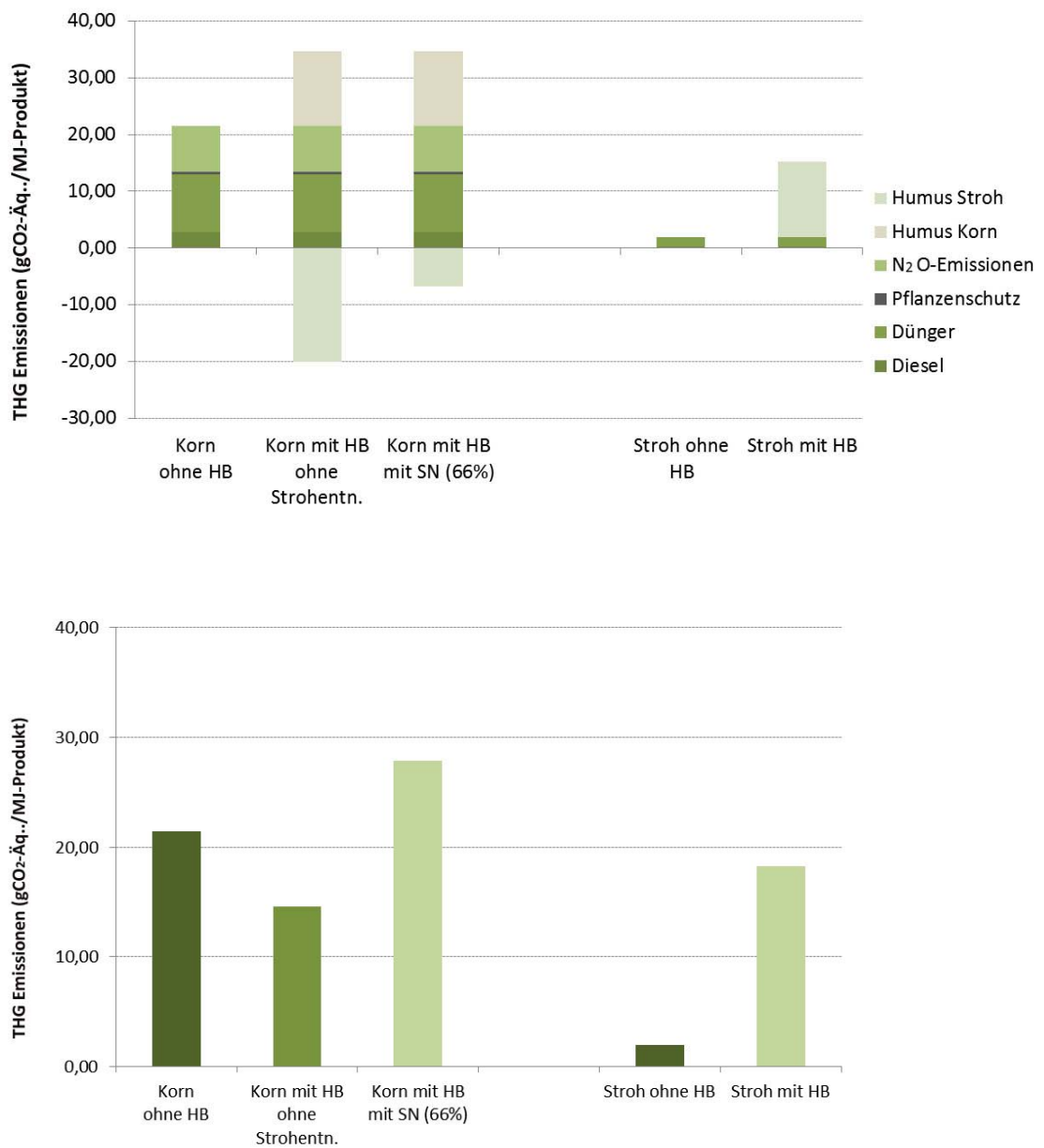


Abbildung 69: Vergleich der THG-Bilanzen von Weizenkörnern und Weizenstroh für die Einbeziehung einer Humusbilanz nach VDLUFAo. HB = Humusbilanz, SN = Strohnutzung

Tabelle 37: Bereitstellungsgedungte Treibhausgasemissionen für Weizenkörner und –stroh mit Berücksichtigung der Humusbilanzierung (VDLUFau, VDLUFAo, HE-Methode) und zweier Logistikvarianten zur Strohbereitung. Die Strohentnahme basiert auf einer ausgeglichenen Humusbilanz. Der Anbau ist nicht in eine Fruchtfolge eingegliedert.

		Aufwendungen Anbau										Humus			Total
		(ha)	(t _{TS} /ha)	(t _{TS})	(MJ/ha)	(MJ)	Diesel	Dünger	Pesti- zide	Lach- gas	Gesamt ohne Humus	HP	NP	NP+HP	
Weizen- korn	V _u											9,25	-20,08	-10,83	10,34
	V _o	90	6,54	588,6	111,1	10.000	2,55	10,15	0,45	8,03	21,18	9,25	-20,08	-10,83	10,34
	HE											9,77	-16,03	-6,26	14,92
Weizen- stroh (Quader- ballen)	V _u	73,56	3,45	253,8	59,4	4.367						0,00	24,81	24,81	26,76
	V _o	46,65	3,45	160,9	59,4	2.769	0,23	1,72	0,00	0,00	1,95	0,00	24,81	24,81	26,76
	HE	53,24	3,45	183,7	59,4	3.160						0,00	19,80	19,80	21,75
Weizen- stroh (Rund- ballen)	V _u	73,56	3,45	253,8	59,4	4.367						0,00	24,81	24,81	26,87
	V _o	46,65	3,45	160,9	59,4	2.769	0,34	1,72	0,00	0,00	2,06	0,00	24,81	24,81	26,87
	HE	53,24	3,45	183,7	59,4	3.160						0,00	19,80	19,80	21,87

NP= Nebenprodukt, HP= Hauptprodukt

Die Integration von Bodenkohlenstoffeffekten in die THG-Bilanz führt dazu, dass der Weizenanbau mit Strohentnahme zusätzliche THG-Freisetzung aufweist, während der traditionelle Weizenanbau (mit Strohrückführung) zu geringeren THG-Emissionen führt, da die Einbindung im Boden von Kohlenstoff aus der Strohrückführung berücksichtigt wird.

Für das Weizenkorn ohne Strohentnahme ergeben sich deutlich niedrigere THG-Emissionen (ca. 10-15 g CO₂-Äq./MJ) als für die Strohentnahme (ca. 22-27 g CO₂-Äq./MJ) – siehe Abbildung 69). Die größten THG-Emissionen entstehen aber für das Weizenkorn mit Strohentnahme (27 g CO₂-Äq./MJ). Dieses Ergebnis unterstreicht einerseits die Notwendigkeit, die Humusbilanz für den Reststoff Stroh in die THG-Bilanz zu integrieren. Andererseits wird aber auch deutlich, dass bei dieser Sichtweise durch die Strohentnahme plötzlich alle Ernteprodukte in ihren THG-Bilanzen betroffen sind. Üblicherweise wird in solchen Fällen eine sog. Systemerweiterung vorgenommen und die THG-Bilanz aller Produkte betrachtet. Dies ist aber beispielsweise im Rahmen der RED nicht vorgesehen. Hierzu fehlt eine methodische Festlegung.

8.3.4 Unterschiede durch die unterschiedlichen Humusbilanzmethoden

Bei den VDLUFA-Ergebnissen resultieren die Unterschiede nur aus den unterschiedlichen C-Koeffizienten für den Weizenanbau, während für die Rückführung von Stroh für beide Verfahren mit dem gleichen Humuskoeffizienten rechnet (+100 kg C/Mg FM). Nach der HE-Methode liegen die THG-Emissionen für den Bodenkohlenstoff mit -6,26 g CO₂-Äq./MJ in der Größenordnung von VDLUFA₀.

Die THG-Bilanz des Bodenkohlenstoffs für die Strohentnahme beträgt für VDLUFA_u und VDLUFA_o 24,81 g CO₂-Äq./MJ. Dieser Wert liegt höher als der Wert für die THG-Fixierung beim Weizen (20,08 g CO₂-Äq./MJ). Dies liegt daran, dass die Angabe einmal auf den Energieertrag vom Korn und einmal auf den Energieertrag vom Stroh bezogen ist¹². Nach der HE-Methode ist die THG-Fixierung wiederum mit 19,80 g CO₂-Äq./MJ wiederum niedriger als die für VDLUFA (Tabelle 37).

Die bisher vorgestellten THG-Bilanzen sind nicht in eine Fruchtfolge integriert. Durch Brachen, den Anbau einer Winterzwischenfrucht und der Gabe von organischem Dünger kann sich die THG-Bilanz für das Weizenkorn noch einmal verbessern (s. Umlage beschrieben in Kapitel 8.2.4 und Tabelle 34).

8.3.5 THG-Bilanz der Strohbereitstellung – Betrachtung der gesamten Fruchtfolge

Wie wirkt sich eine Optimierung der Fruchtfolge auf eine mögliche Strohentnahme und die THG-Bilanz aus?

Im Zuge der Analyse der THG-Emissionen zeigte es sich, dass es am sinnvollsten ist, anhand eines repräsentativen Betriebs mit hohem Getreideanteil gezielt Fragen zu betrachten. Dabei wird die Fruchtfolge des Beispielbetriebs optimiert und umgebaut, mit dem Ziel die Strohentnahme zu erhöhen.

Eine Ableitung von Aussagen durch den Vergleich unterschiedlicher Betriebe ist bei einer Einbindung der Humusbilanz nur eingeschränkt sinnvoll. Beispielsweise kann eine Fruchtfolge mit einem hohen Anteil an Bodenkohlenstoff zehrenden Fruchtarten und gleichzeitig hoher Wirtschaftsdüngergabe und hohem Anteil an Winterzwischenfrucht ähnliche THG-Emissionen aufweisen wie eine Fruchtfolge mit

¹² Der Wert spiegelt das Stroh-Korn-Verhältnis von 0,8 wider.

geringerem Anteil an Bodenkohlenstoff zehrenden Fruchtarten und einer geringeren Wirtschaftsdüngergabe und einem geringen Anteil an Winterzwischenfrucht.

8.3.6 Charakterisierung des Beispielbetriebs und Beschreibung der Optimierungsvarianten

Der ausgewählte Beispielbetrieb – mit einer Anbaufläche von 164,75 ha – befindet sich im nördlichen Harzvorland in Niedersachsen am Rand der Hildesheimer Börde. Die Böden werden dominiert von lehmigen Lößböden. Das Klima ist mit 607,6 mm Niederschlag und 10,3 °C Jahresdurchschnittstemperatur als relativ trocken und warm zu bezeichnen. Als reiner Ackerbaubetrieb ist die Produktion vorwiegend auf den Getreideanbau ausgerichtet. Als weitere Hauptfrucht ist mit ca. 23,5 % (Flächenanteil) die Zuckerrübe vertreten. Der Anbauumfang der Fruchtarten ist in Tabelle 39 dargestellt. In der bisherigen Bewirtschaftung werden die Nebenprodukte, wie Stroh und Rübenblatt, zum Ausgleich der Humusbilanz auf den Flächen belassen und nach der Ernte eingearbeitet.

Das Ziel der Optimierungsvarianten war es, höhere Strohmengen aus dem Betrieb entnehmen zu können. Dies soll ohne negative Auswirkungen auf den Humushaushalt, und damit das CO₂-Speichervermögen der Böden, geschehen. Die unterschiedlichen Varianten sind in der Tabelle 38 aufgezeigt, die daraus resultierenden Veränderungen im Anbauspektrum sind in der Tabelle 39 ersichtlich. Die Eingangsdaten für die Analyse sind beispielhaft für die Variante IST-Stroh in Tabelle 40 zusammengestellt.

Tabelle 38: Varianten zur Optimierung des Beispielbetriebs

Benennung	Beschreibung
Variante IST	Die Variante IST-ohne stellt die Ausgangssituation des Beispielbetriebs dar, bei der sämtliche Reststoffe auf den Ackerflächen verbleiben. In der Variante IST-Stroh wird dagegen die Strohmenge entnommen, die nach den drei Humusbilanzansatz zu einer ausgeglichenen Humusbilanz führt.
Variante Winterzwischenfrucht (WZF)	In dieser Variante (WZF-ohne; WZF-Stroh) wurde der Anteil der bestehenden Anbaufläche für die Winterzwischenfrucht um 10 ha ausgedehnt (noch freie Fläche). Diese Fläche kann zum Frühjahr mit der Fruchtart Hafer bestellt werden. Eine Ausdehnung des WZF-Anbaus gewährleistet positive Effekte auf die Humusbilanz mit dem Resultat einer höheren Entnahmemöglichkeit für Stroh.
Variante Raps statt Zuckerrübe (R-ZR)	Der Anbauumfang der humuszehrenden Fruchtart Zuckerrübe wurde in dieser Variante (R-ZR-ohne; R-ZR-Stroh) um 10 ha reduziert. Die freigewordene Fläche wird dem Winterraps zugeschlagen und eine weitere Entnahme von Getreidestroh ermöglicht.
Variante Ackergras statt Zuckerrübe (AG-ZR)	In dieser Variante (AG-ZR-ohne; AG-ZR-Stroh) wird der Zuckerrübenanbau um 10 ha reduziert, die freie Anbaufläche wird aber mit Ackergras bestellt. Dies hat stark positive Effekte auf den Humushaushalt und damit auch für die Entnahmemöglichkeit für Getreidestroh.

Tabelle 39: Anbauflächen des Beispielbetriebs und der Varianten. Die Strohentnahme basiert auf einer ausgeglichenen Humusbilanz nach VDLUFAo (organischer Dünger: siehe Text und Tabelle 40).

	Flächenanteil (ha)				
	IST-ohne	IST-Stroh	WZF	R-ZR	AG-ZR
Weizenkörner (W)	90	90	90	90	90
Weizenstroh (W)	0	62	70	90	90
Gerstenkörner (W)	12,25	12,25	12,25	12,25	12,25
Gerstenstroh (W)	0	0	0	0	0
Haferkörner	10	10	10	10	10
Haferstroh	0	0	0	0	0
Raps (Körner)	7,7	7,7	7,7	17,7	7,7
Zuckerrüben	38,8	38,8	38,8	28,8	28,8
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	0	0	0	10
Winterzwischenfrucht	38,8	38,8	48,8	38,8	38,8
Brache, Selbstbegrünung ab Herbst	6	6	6	6	6

Im IST-Zustand des Betriebs wird organischer Dünger beim Anbau der Fruchtart Zuckerrübe eingesetzt. Es handelt sich dabei um kompostierten Stallmist. Die ausgebrachte Menge liegt bei 4,29 t_{FM}/ha (1,5 t_{TS}/ha). Für die Variante R-ZR wird der kompostierte Stallmist zur Düngung der ehemaligen Zuckerrübenfläche (10 ha) anteilig auf die gesamte Rapsanbaufläche verteilt (17,7 ha). Gleichzeitig wird die Mineraldüngung auf den Rapsflächen um den im Anbaujahr verfügbaren Nährstoffgehalts des kompostierten Stallmist reduziert (Annahme: 50 % Verfügbarkeit im Anbaujahr). Es wird ebenfalls ein Diesel-Aufschlag von 5,2 kg/ha für die Ausbringung des Stallmistes berücksichtigt. In gleicher Weise wird für die Variante AG-ZR verfahren, nur dass als Rapsanbaufläche 7,7 ha vorliegen

Tabelle 40: Eingangsdaten für die Analyse (Variante IST-Stroh). Die Strohentnahme basiert auf einer ausgeglichenen Humusbilanz nach VDLUFAo (organischer Dünger: siehe auch Text).

	Anbau- fläche	Ertrag			Strohent- nahme	Inputs					Boden (Anbau) REPRO ¹³	Boden (Stroh) REPRO	Org. Dünger Stallmist*	
		(ha)	(t _{TS} /ha)	FM (t _{FM} /ha)		(%)	Diesel	N	P	K				Ca
Weizenkörner (W)	90	6,53	7,6	0	74,88	190,6					4,5	-295,8	92,8	0
Weizenstroh (W)	37,5			66	3,66	17,3						0	-92,8	0
Gerstenkörner (W)	12,25	6,88	8	0	54,00	150,7					4,2	-353,8	81,2	0
Gerstenstroh (W)	0			66	3,66	15,9						0	-81,2	0
Haferkörner	10	6,45	7,5	0	46,09	101					0,32	-510,4	81,2	0
Haferstroh	0			66	3,66	23,4						0	-81,2	0
Raps (Körner)	7,7	2,9	3,2		59,40	235,8		281			4,5	-336,4	69,6	0
Zuckerrüben	38,8	16,56	72		77,38	174,2	45,3	232	180		6,6	-1566	43,5	4,29 (1,50)
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6	30	100	31,62	140						307,4		0
Winterzwischenfrucht	38,8	1,5	10		32,28							139,2		0
Brache, Selbstbegrünung ab Herbst	6											145		0

* kompostiert (TM 35 %)

¹³ Die HE-Methode berechnet die C-Faktoren dynamisch für die Standortsbedingungen. Die hier ausgewiesenen Werte sind nicht direkt auf andere Standorte/Betriebe übertragbar. Die statischen VDLUFA-Werte finden sich in Tabelle A 19.

UMLAGE: In Tabelle 37 wurde die Berechnung der THG-Bilanz für Weizenkörner und Stroh durchgeführt, ohne dass der Anbau in eine Fruchtfolge integriert war. In Tabelle 41 sind nun die Ergebnisse für die Fruchtfolge des Beispielbetriebs angeführt (Variante IST-Stroh, siehe Anhang Tabelle 1 15). Dadurch, dass in der Fruchtfolge 6 ha und 38,8 ha Winterzwischenfrucht (WZF) integriert sind sowie eine organische Düngegabe von 1,5 Mg Festmist pro ha Zuckerrübenanbau erfolgt, kommt es zu entsprechenden THG-Umlagen hin zum Weizenanbau. Dabei liegen für VDLUFA die Umlage aus den Brachflächen bei -022 g CO₂-Äq./MJ und für die großflächigere WZF und den organischen Dünger bei -2,26 g CO₂-Äq./MJ bzw. -2,15 g CO₂-Äq./MJ. Beispielsweise werden auf 38,8 ha Zuckerübenanbau insgesamt 57,75 t Festmist ausgebracht (1,5 t_{TS}/ha). In der Umlage entspricht dies 0,367 t_{TS} Festmist für jeden Hektar Anbaufläche. Die Anrechnung für das Stroh erfolgt flächenscharf; eine Umlage findet nicht statt (vergl. Tabelle 34). Neben der Umlage für den Humus findet ebenfalls eine Umlage für den Dieselverbrauch für die WZF statt (0,26 g CO₂-Äq./MJ). Für die HE-Methode liegt insbesondere der THG-Umlage-Wert für die WZF mit -1,12 g CO₂-Äq./MJ deutlich niedriger als für VDLUFA.

Tabelle 41: Bereitstellungsgedungte Treibhausgasemissionen für Weizenkörner und –stroh mit Berücksichtigung der Humusbilanzierung (VDLUFAu, VDLUFAo, HE-Methode; Variante IST-Stroh). Die Strohentnahme basiert auf einer ausgeglichenen Humusbilanz. Der Anbau ist in eine Fruchtfolge eingegliedert

		Fläche		Ertrag			Gesamt ohne Humus	HP	Bra- che	Umlage WZF	Humus			Total
		(ha)	(t _{TS} /ha)	(t _{TS})	(MJ/ha)	(MJ)					Umlage org. Dünger	NP	Humus gesamt	
Weizen- korn	Vu						9,25	-0,22	-2,26	-2,15	-20,08	-15,46	5,98	
	Vo	90	6,5	588,2	111,1	10.000	21,44*	13,21	-0,22	-2,58	-2,15	-20,08	-11,82	9,62
	HE							9,77	-0,18	-1,12	-2,11	-16,03	-9,67	11,77
Weizen- stroh (Quader- ballen)	Vu	90	3,5	310,6	59,4	5.342	1,95	0,00	-	-	-	24,81	24,81	28,47
	Vo	37,5	3,5	129,4	59,4	2.226		0,00	-	-	-	24,81	24,81	28,47
	HE	-	-	-	--	--		--	-	-	-	-	-	--

*inkl. Umlage Diesel; 0,26

8.3.7 Strohentnahme bei einer Optimierung der Fruchtfolge des Beispielbetriebs

Im Folgenden wird für den Beispielbetrieb dargelegt, inwiefern die Betrachtung der gesamten Fruchtfolge die Entnahmeraten für Stroh beeinflusst. Für VDLUFA_u wird die mögliche Strohentnahme durch die Fruchtfolgenbetrachtung gesteigert, während für VDLUFA_o und die HE-Methode die Entnahmemenge verringert wird (vergl. jeweils 1. & 2. Balken von links). Das liegt darin begründet, dass VDLUFA_o und HE-Methode mit deutlich geringeren Humuskoeffizienten für die Hackfrucht Zuckerrübe (die in der Fruchtfolge enthalten ist) rechnen als VDLUFA_u. Somit bewirken die positiven Humuseffekte der Umlage bei VDLUFA_u eine Strohertragssteigerung, während die Umlagen-Effekte bei den anderen beiden Methoden von der Zehrung der Zuckerrübe überkompensiert werden.

Im Hinblick auf die Strohentnahme *in der Fruchtfolge* des Beispielbetriebs (Variante IST-Stroh), dass nach VDLUFA_u sämtliches Stroh (396,4 t) entnommen werden darf, ohne dass die Humusbilanz negativ wird. Wobei sämtliches Stroh eine Bergungsrate von 66 % meint. Nach VDLUFA_o darf lediglich auf 37,5 ha Stroh (129,4 t) entnommen werden, um einen ausgeglichene Humusbilanz zu gewährleisten. Laut der HE-Methode ist bereits ohne Strohentnahme die Humusbilanz negativ und es darf kein Stroh entnommen werden (vgl. Tabelle 41). Gegenüber der ursprünglichen Fruchtfolge (IST-Fruchtfolge) ändert sich die Strohentnahme deutlich, wenn die Fruchtfolge nach Humusgesichtspunkten optimiert wird, vergl. Abbildung 67.

Unter VDLUFA_o kann die Strohentnahme zwar durch die Änderungen in der Fruchtfolge deutlich erhöht werden, doch geht diese Steigerung nur für die Variante WZF-Stroh mit einer direkten Steigerung des gesamten Ertrags einher. In allen anderen Fällen kann zwar eine Steigerung der Strohentnahme erreicht werden doch nimmt gleichzeitig die Gesamtertragsmenge ab und außerdem ist keine Äquivalenz der Ernteprodukte gegeben. Nach der HE-Methode kann erst durch die Ergänzung einer Winterzwischenfrucht und durch den Wechsel von Teilen des Zuckerrübenanbaus auf Raps bzw. Ackergras eine positive Humusbilanz erreicht werden und folglich die die Entnahme von Stroh. Wie bereits oben beschrieben geht auch hier der Umbau der Fruchtfolge mit Ertragsabnahmen einher.

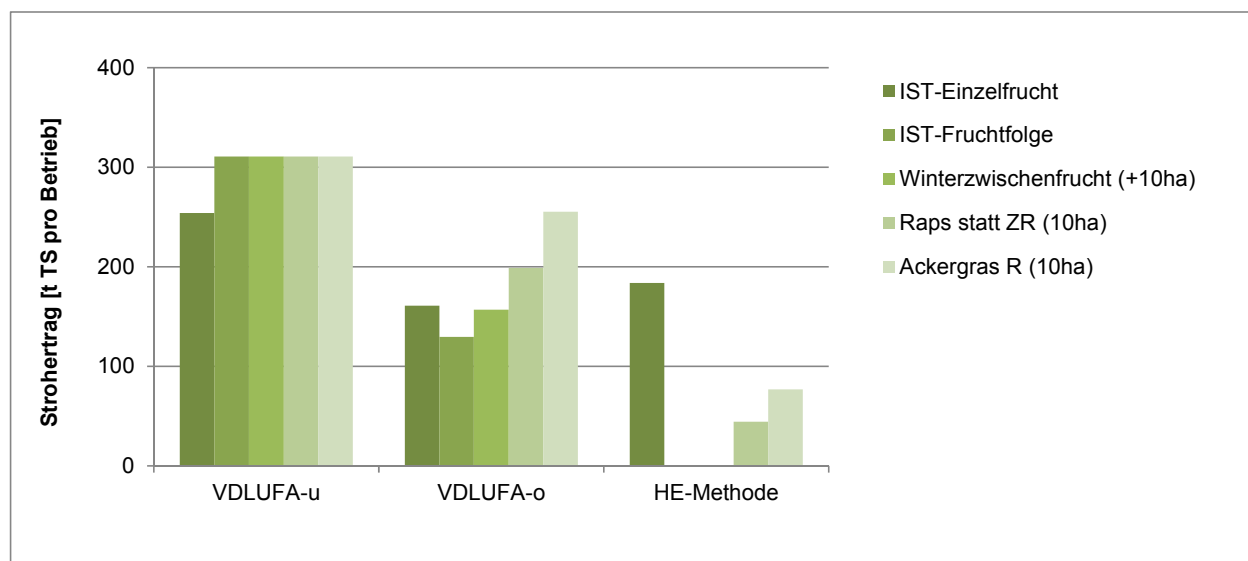


Abbildung 70: Vergleich der Stroherträge auf Basis der einzelnen Humusbilanzmethoden

Allerdings muss beachtet werden, dass die Unterschiede der Fruchtfolgegestaltung in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie die Unterschiede die durch die verschiedenen Humusbilanzmethoden entstehen. Die Ursache für die verschiedenen Ergebnisse der Methoden ist hauptsächlich in den spezifischen C-Koeffizienten für den Anbau begründet.

Detaillierte Ergebnistabellen für alle acht Varianten des Beispielbetriebs – aufgliedert nach Fruchtart und Humusbilanzansatz – befinden sich im Anhang (Tabelle A 20 bis Tabelle A 27).

8.3.8 Treibhausgasbilanz bei einer Optimierung der Fruchtfolge des Beispielbetriebs

Bei den Treibhausgasbilanzen wurden zunächst die Bilanzen für Einzelfrüchte ohne Bodenkohlenstoffeffekte betrachtet – so wie es in der Praxis meistens der Fall ist und so wie es auch die Rechenmethodik der RED vorsieht. Im ersten Schritt wurde dann der THG-Effekt der Humusbilanz einer einzelnen Kultur betrachtet. Da Humusbilanzen sich aber auf ganze Fruchtfolgen beziehen, sollen in diesem Kapitel die Effekte einer Fruchtfolgenbetrachtung auf die THG-Bilanz dargestellt werden.

- Betrachtet man die THG-Bilanz für einzelne Fruchtarten ohne Bodenkohlenstoff, so resultieren die Unterschiede vor allem aus dem unterschiedlichen Bedarf an mineralischem N-Dünger.
- Werden die Bodenkohlenstoffeffekte in die THG-Bilanz integriert, schneiden die Bilanzen für die Hauptprodukte besser ab als ohne Berücksichtigung der Humusbilanz. Umgekehrt verhält es sich mit humuszehrenden Hackfrüchten wie Zuckerrüben und mit der Entnahme von Nebenprodukten.
- Wird jetzt die gesamte Fruchtfolge mitbetrachtet, so hängt die THG-Bilanz von deren Humusbilanz ab: Ist die Humusbilanz nahezu ausgeglichen, fallen nur die Emissionen durch die Aufwendungen und düngedingte Emissionen ins Gewicht. Ist die Humusbilanz aber nicht ausgeglichen, beeinflusst die THG-Bilanz des Bodenkohlenstoffs das Ergebnis in deutlicher Weise.

Die Bedeutung der Ausgeglichenheit der Humusbilanzen führt zu einem starken Einfluss der Wahl der Humusbilanzmethode auf das Gesamtergebnis der THG-Bilanz. Aus Abbildung 71 wird deutlich, dass die methodischen Unterschiede der Humusbilanzverfahren stärker ins Gewicht fallen als Maßnahmen auf Ebene der Fruchtfolge. Die Werte der HE-Methode liegen etwa 25 % über denen von VDLUFA_u, während die Unterschiede zwischen den verschiedenen Fruchtfolgen innerhalb einer Rechenmethode bei unter 10 % liegen. Dieser Methodeneinfluss kommt zustande, da die Humusbilanz nach VDLUFA_o auch mit Strohentnahme für alle vier Fruchtfolgen ausgeglichen ist. Daher wirkt sich die Humusbilanz der Strohentnahme nicht auf die THG-Emission aus (THG-Humus HP+NP = 0 g CO₂-Äq./MJ) und die THG-Bilanz ist allein durch die Aufwendungen beim Anbau bestimmt.

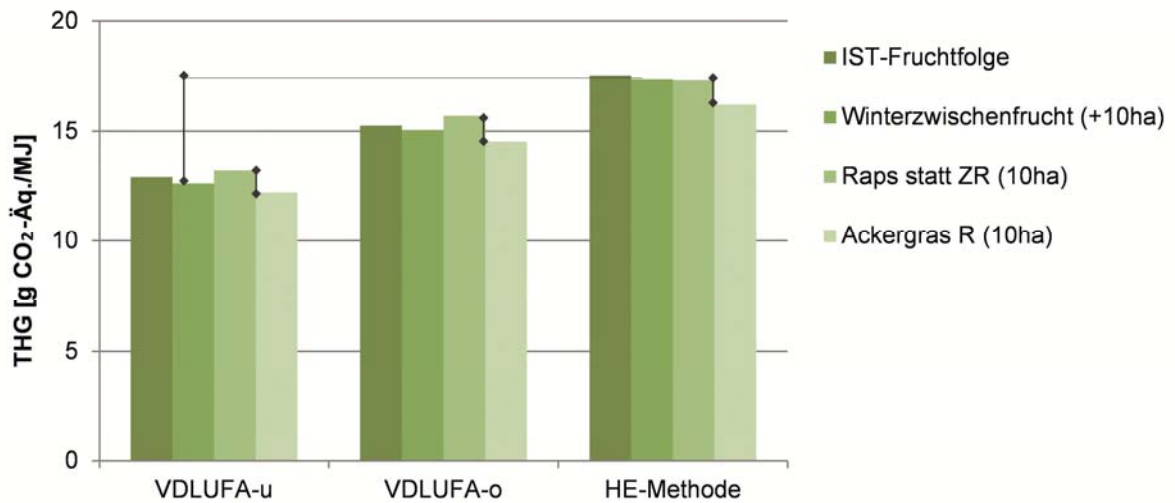


Abbildung 71: Vergleich der Treibhausgasemissionen für die einzelnen Fruchtfolge-Varianten auf Basis der drei betrachteten Humusbilanzmethoden

Der Einfluss der Strohentnahme bei einer nicht-ausgeglichene Humusbilanz wird noch einmal am Beispiel der Ergebnisse für VDLUFA_o dargestellt, siehe Abbildung 72: Die Varianten *ohne Strohentnahme* nach VDLUFA_o zeigen, dass insbesondere die Variante AG-ZR-Stroh zu einer Reduktion der gesamten THG-Emissionen der Fruchtfolge führt – allerdings verbunden mit einer Abnahme der Gesamterträge. Doch auch diese Minderungen sind nicht in der Lage die Zusätzlichen THG-Emissionen durch die Strohentnahme zu kompensieren, denn die THG-Bilanzen aller Fruchtfolge-Varianten *mit Strohentnahme* liegen nach dem Humusbilanzansatz VDLUFA_u etwa ein Viertel höher als die ohne Strohentnahme. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass die Unterschiede zwischen den Fruchtfolge-Varianten nur gering ausfallen.

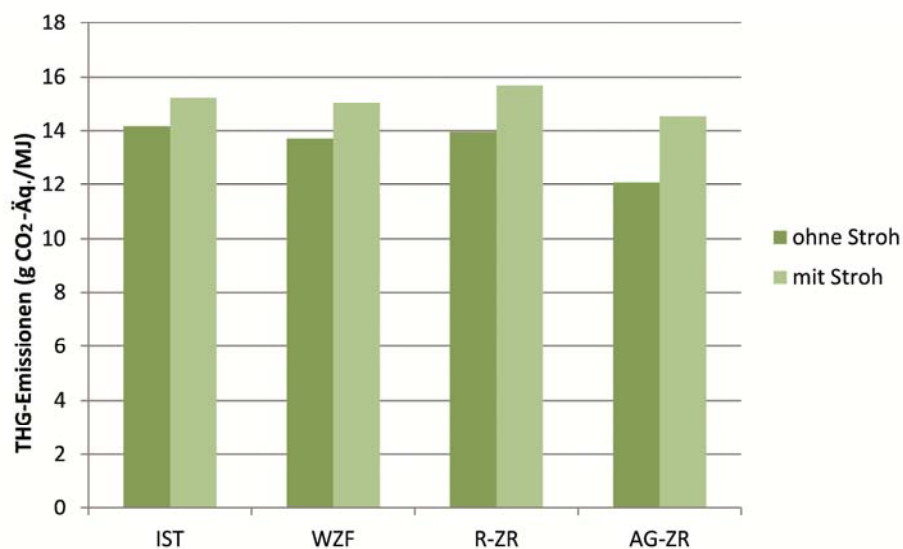


Abbildung 72: Bereitstellungsgedungte Treibhausgasemissionen (gemittelt für die Fruchtfolge) für die Varianten des Beispielbetriebs mit Berücksichtigung der Humusbilanzierung (VDLUFA_o).

8.3.9 Einfluss der Stroh-Bergungsvariante auf das Ergebnis

Wie wirkten sich Bergungsvarianten und Strohballenarten auf die THG-Bilanz aus?

Für die Strohbergung wurden bei der THG-Bilanzierung zwei Bergungsvarianten (Quaderballen und Rundballen) berücksichtigt. Die bereitstellungsbedingten THG-Emissionen dieser beiden Varianten unterscheiden sich lediglich in dem Dieseleinsatz (Tabelle 37 sowie Abbildung 74). Nach KTBL [154] werden bei der Bergung von Rundballen 6,5 l Diesel/ha und bei der Bergung von Quaderballen 4,4 l Diesel/ha eingesetzt¹⁴. Für diese beiden Varianten ergibt sich für Weizenstroh ein Unterschied von 0,11 g CO₂-Äq/MJ Stroh.

Würde nach RED Konvention bilanziert werden, so würde der Dieseleinsatz einen Unterschied von 47 % zwischen beiden Varianten bewirken. Bei Berücksichtigung von humusbedingten Emissionen und den Emissionen der Bereitstellung einer mineralischen N-Ausgleichsdüngung verursacht der Dieselbedarf für beide Varianten weniger als 1 % der THG-Emissionen. Die Bereitstellung des N-Düngers verursacht 6 % der THG-Emissionen. Aus Sicht der THG-Bilanzierung kommt daher der Logistik zur Strohbergung eine untergeordnete Bedeutung zu.

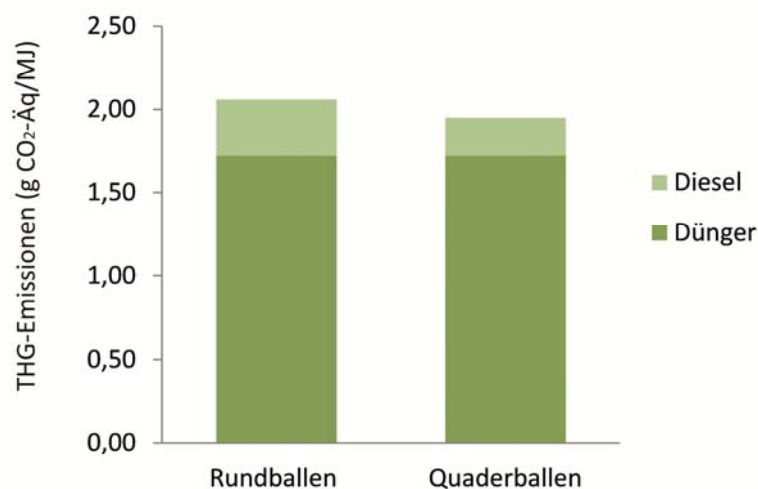


Abbildung 73: Bereitstellungsbedingte Treibhausgasemissionen für zwei verschiedene Bergungsarten – Rundballen und Quaderballen

8.4 Diskussion

Im Rahmen der Bilanzierung der bereitstellungsbedingten Treibhausgasemissionen wurde ein methodischer Ansatz entwickelt, der es erlaubt, die THG-Emissionen aus der Humusbilanzierung in die THG-Bilanzierung zu integrieren. Hierbei bestand insbesondere die Herausforderung, Humuseffekte, die nicht direkt einer angebauten Fruchtart zugewiesen werden kann (Brache, Winterzwischenfrucht, C aus organischem Dünger), über ein Umlagesystem auf die Anbaufläche der Fruchtarten zu verteilen. Zudem wurden bei der Strohentnahme neben den Bodenkohlenstoffeffekten auch Effekte des Stickstoffzugs mit der Strohentnahme berücksichtigt. Mit diesem Ansatz kann eine gesamte Fruchtfolge inklusive des

¹⁴ Dichte: 0,832 kg/l

Humuseffekts bilanziert, aber auch für jede Fruchtart eine THG-Bilanz ausgewiesen werden. Es ist aber festzustellen, dass bei der Integration der Humusbilanz stets die gesamte Fruchtfolge zu betrachten ist, diese vollständigen Datensätze in vielen Fällen aber nicht vorliegen werden.

Als grundsätzliche Annahme für die Integration der Humusbilanz in die THG-Bilanzierung wird von einer linearen Zu- bzw. Abnahme des Bodenkohlenstoffs ausgegangen, die auf statische Werte aus VDLUFA bzw. dynamische Werte der HE-Methode basiert. Diese bedeutet, dass die Analyse nur akzeptable Ergebnisse liefert, wenn der Bodenkohlenstoffgehalt der untersuchten Flächen noch nicht in dem Bereich einer Sättigung oder auf einem deutlichen Wege dorthin befindet. Diese Einschränkung ist bei der Bewertung von Ergebnissen zu berücksichtigen. Die vorgestellten Berechnungen basieren auf Daten aus Deutschland, so dass die getroffenen Aussagen auf Deutschland begrenzt sind. Grundsätzlich kann der Bilanzierungsansatz auf andere Länder übertragen werden, wenn entsprechende Datengrundlagen zur Humusbilanzierung vorliegen. Aber auch für Deutschland sind verschiedene Datenanpassungen notwendig.

Die Betrachtung bestehender Bilanzierungstools wie GEMIS und REPRO ergab, dass aufgrund unterschiedlicher Grundannahmen und Eingangsdaten ein Vergleich von Ergebnissen unmöglich macht. Zudem sind einige Anforderungen aus dem methodischen Ansatz zur Integration der Humusbilanz in die THG-Bilanzierung nicht entsprechend in dem Humusbilanztool REPRO implementiert. Daher wurden die Analysen für den Beispielbetrieb mit Excel berechnet. Das Excel-Tool berücksichtigt die methodischen Anforderungen und führt die notwendigen Daten aus GEMIS und REPRO zusammen.

Theoretische Betrachtungen und die Analyse des Beispielbetriebs zeigen, dass die THG-Emissionen aus der Humusbilanz eine Größenordnung annehmen, die in der Größenordnung der THG-Emissionen für Inputs (Diesel, Dünger inklusive Lachgas, Pestizide) zum Anbau von Fruchtarten liegen, und damit eine relevante Größe für die Bewertung von THG-Bilanz von Fruchtarten und Fruchtfolgen darstellen.

Die Berücksichtigung des Humus in der THG-Bilanz führt zu deutlich anderen Einschätzungen der THG-Bilanz der Fruchtarten und des Reststoffs Stroh als ohne Berücksichtigung des Humus. Beispielsweise betragen die THG-Emissionen für Weizenstroh ohne Berücksichtigung von Effekten durch die Strohentnahme (C und N) 0,23 g CO₂-Äq/MJ. Eine Ausgleichsdüngung für den N-Entzug führt bereits zu einem Emissionswert von 1,95 g CO₂-Äq/MJ. Um mehr als den Faktor 10 höher liegt dagegen die C-Freisetzung durch den fehlenden Humusaufbau infolge der Strohentnahme – nach VDLUFA wird hier ein Emissionswert von 24,81 g CO₂-Äq/MJ ermittelt. Damit ergibt sich insgesamt ein Emissionswert von 26,76 g CO₂-Äq/MJ.

Wird dagegen für ein traditionelles Getreideanbausystem mit Strohrückführung die Humusbilanz in die THG-Bilanz integriert, so reduzieren sich die THG-Emissionen für Weizenkörner in einer Größenordnung von 200 % (von 9 bis 13 auf -7 bis -11 g CO₂-Äq_{äq}/MJ).

Die Betrachtung der zweier Logistikketten für die Strohbereitstellung (Quaderballen, Rundballen) ergab, dass die Unterschiede in einer Größenordnung liegen, die im Vergleich zur Humusbilanz und N-Ausgleichsdüngung sowie im Vergleich zur THG-Emission durch die Inputs für den Weizenkornanbau vernachlässigbar ist.

Die Fruchtfolge des analysierten Beispielbetriebs (Variante IST) wurde im Hinblick auf die Strohentnahme optimiert. Dazu wurde zuerst die Fläche, auf der eine Winterzwischenfrucht (Variante WZF) angebaut wird erhöht. Anschließend wurde die Humus zehrende Fruchtart Zuckerrübe teilweise durch Raps (Variante R-ZR) und bzw. Ackergras (Variante AG-ZR) ersetzt. Dabei zeigt sich, dass alle Varianten eine Erhöhung der Strohentnahme ergaben, jedoch mit Ertragseinbußen für gesamte Biomasseernte einhergeht. Außerdem sind die Ernteprodukte als nicht äquivalent anzusehen (weder wirtschaftlich noch in Bezug auf die Nutzung). Insgesamt zeigt die Analyse des Beispielbetriebs, dass durch eine Optimierung der Fruchtfolge hin zu einer erhöhten Strohentnahme eine Ertragssteigerung der gesamten Fruchtfolge möglich ist, die nicht zu negativen THG-Effekten führt. Allerdings kann durch die Verwendung des Stroh aufgrund des C-Entzugs auch keine deutliche THG-Reduktion erreicht werden.

Abschießend ist festzuhalten, dass die THG-Bilanz des Reststoffs Stroh signifikant durch die Integration der Humusbilanz ansteigt. Dieser Aspekt ist nicht in der THG-Bilanzierung berücksichtigt, wie sie z. B. in der RED angewandt wird. Es ist empfehlenswert, Berechnung einer THG-Reduktion im Vergleich zu fossilen Energieträgern für das Stroh sowohl mit und ohne den Effekt des Strohentzugs (N und C) zu berechnen, um abschließend einschätzen zu können, ob es für den Klimaschutz vorteilhafter ist, das Stroh nicht zu bergen.

9 THG-Bilanzierung der Gesamtkette

Für die Bewertung der Nachhaltigkeit im Kontext einer energetischen Nutzung ist die Treibhausgasbilanz ein zentrales Kriterium. Um abschließend einschätzen zu können, wie sich die Treibhausgasbilanz der energetischen Strohnutzung im Vergleich zu einer fossilen Nutzung darstellt, muss die Gesamtkette einschließlich der Konversionsprozesse bilanziert werden. Im Kapitel 8 wurde sich intensiv mit der Treibhausgasbilanzierung von Stroh auseinandergesetzt, die während der Bereitstellungsphase des Strohs auftreten können. In diesem Kapitel wird die Analyse der Treibhausgasemissionen vorgestellt, die über den gesamten Lebensweg verschiedener Stroh-basierter Bioenergieträger potenziell auftreten können. Aufbauend auf den Bilanzierungsergebnissen bis zur Feldkante, wurden in diesem Arbeitspaket die Emissionen bis zur Nutzung des Bioenergieträgers bilanziert. Dazu wurden die in Kapitel 5 vorgestellten Nutzungskonzepte von Stroh zur Wärme-, Strom/KWK- und Kraftstoffbereitstellung ausgewertet. Es soll die Frage beantwortet werden, wie viele THG-Emissionen bei der Nutzung von Stroh in verschiedenen Konversionspfaden freigesetzt werden und welche Prozessschritte wesentlich zur THG-Emissionsfreisetzung beitragen. Abschließend werden die Ergebnisse mit fossilen Referenzen verglichen. Das Thema der Bilanzierung der entgangenen C-Sequestrierung wird wieder aufgegriffen und in den gesamten Lebenszyklus eingeordnet, indem abschließend ein Vergleich zwischen der Strohsequestrierung und den verschiedenen energetischen Nutzungsoptionen nach verschiedenen Ansätzen durchgeführt wurde.

9.1 Methodik und Datenbasis

Für die Bewertung der potenziellen Umweltwirkungen verschiedener Strohnutzungspfade wurde die Methodik der so genannten Ökobilanzierung oder Lebenszyklusanalyse (Life cycle assesment, LCA) angewendet. Der grundsätzliche Rahmen dieser Methodik ist in den Normen ISO 14040 und 14044 beschrieben [155,156]. Danach ist die Zielstellung einer Ökobilanzierung die Erfassung und Bewertung potenzieller Umweltwirkungen, die im Verlauf des Lebensweges eines Produktes- in diesem Fall eines Bioenergieträgers- von der Rohstoffgewinnung über die Rohstoffbereitstellung, die Aufbereitung, die Produktion, die Distribution, die Abfallbehandlung, das Recycling bis zur endgültigen Beseitigung auftreten. Eine Ökobilanz ist ein relativer Ansatz, in der potenzielle Umweltwirkungen beschrieben und interpretiert werden. Eine Ökobilanz gliedert sich nach ISO 14040 und 14044 in vier nachfolgend beschriebenen Bestandteile (vgl. Abbildung 74).

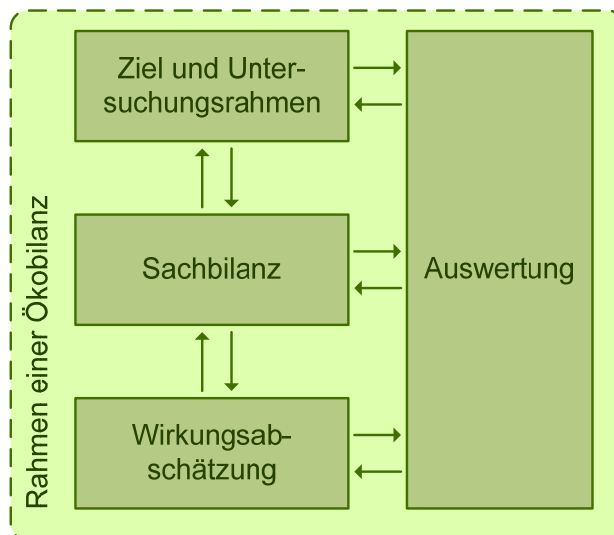


Abbildung 74: Bestandteile einer Ökobilanz nach ISO 14040 und 14044

9.1.1 Ziel- und Untersuchungsrahmen

Der erste Schritt in der Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen ist die Festlegung eines konkreten Untersuchungsziels für die Bilanz. Je nach Fragestellung können sich der Untersuchungsrahmen und damit die Systemgrenzen der Bilanzierung deutlich unterschiedlich gestalten. Prinzipiell gilt die Grundregel, dass insbesondere bei vergleichenden Ökobilanzen die Systemgrenzen der zu vergleichenden Produktsysteme eine parallele Detailtiefe aufweisen müssen, bzw. dass die zu vergleichenden Produktsysteme eine gewisse Nutzengleichheit aufweisen müssen. In dieser Bilanzierung sollen die THG-Emissionen, die bei der Nutzung von Stroh in verschiedenen Konversionspfaden entstehen mit denen aus der fossilen Energiebereitstellung verglichen werden.

Für die Abgrenzung des Bilanzierungssystems (**Systemgrenze**) auf der Anbauseite wird die Logik vertreten, dass alle Aufwendungen bilanziert werden, für die der Reststoff Stroh ursächlich ist. Die Emissionen, die aus dem Anbau des Weizens resultieren, werden dem Hauptprodukt, dem Weizenkorn, zugeschlagen. Dabei wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die eingesetzten Düngemittel primär dem Wachstum des Kornes dienen und das Stroh „nebenher“ anfällt. Im Anbausystem Stroh werden daher keine Düngemittel zur Produktion des Strohs berücksichtigt, allerdings wird eine Stickstoffkompensationsdüngung für die Menge an Nährstoffe angesetzt, die durch die Strohnutzung nicht wieder zurückgeführt werden (vgl. 8.2.5). Darüber hinaus werden die für die Bergung und den Transport des Strohs benötigten Inputs bilanziert.

Im Rahmen dieses Projektes wird die gesamte Prozesskette bis zur Nutzung des Energieträgers betrachtet. Für die Bereitstellungspfade, aus denen Kraftstoffe hervorgehen, stellt die Produktion des Kraftstoffes de facto die Systemgrenze, denn die Verbrennung des Kraftstoffes im Motor wird als CO₂-neutral angesehen (in Anlehnung an die Methodik der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie). Bei den Konversionsprozessen, deren Endprodukt Strom ist, wird die Bereitstellung frei Kraftwerk betrachtet, das heißt die Systemgrenze stellt die Einspeisung des Stromes in das Stromnetz dar. Es werden dementsprechend keine Netzverluste berücksichtigt. Für die Wärmepfade wurden Phasen des Lebenszyklus inklusive der Verbrennungsprozesse mitbilanziert. Die Systemgrenze der Wärmepfade stellt die Übergabe der Wärme an ein Wärmenetz dar, daher werden Wärmenetzverluste ebenfalls nicht berücksichtigt.

Bilanzieren werden die Prozesse und die in den Prozessen eingesetzten Materialien (Rohstoffe und Hilfsstoffe) sowie Hilfsenergien. Die Aufwendungen für den Bau der Anlagen werden nicht mit berücksichtigt. Es wurden Datensätze ohne Infrastrukturaufwendungen verwendet.

Die **funktionelle Einheit** ist die Bezugsgröße für alle Massen- und Energieströme des jeweiligen Prozesses. Sie charakterisiert den Nutzen eines Produktsystems und erlaubt einen Vergleich zwischen Produktsystemen, welche die gleiche funktionelle Einheit und den gleichen Nutzen aufweisen. Die hier gewählten Bezugsgrößen entsprechen den oben beschriebenen Systemgrenzen der Bioenergiepfade mit der Bezugsgröße Endenergie. Die funktionelle Einheit für die Strombereitstellung ist 1 MJ elektrisch (el.), für die Wärmepfade 1 MJ thermisch (th.) und für die Biokraftstoffpfade 1 MJ Kraftstoff.

9.1.2 Sachbilanz

In der Sachbilanzphase wird eine Bestandsaufnahme von Input- und Outputdaten in Bezug auf das zu untersuchende System durchgeführt. Die Sachbilanz ermöglicht quantitative Aussagen über den betrachteten Produktlebensweg. Ressourcenverbräuche (bzw. Prozessinputs) und die damit verbundenen Emissionen werden dem betrachtenden Nutzen (funktionelle Einheit) gegenüber gestellt. Im Rahmen dieser Studie erfolgte die Inventarisierung der Stoff- und Energieströme für die entwickelten Anlagen- und Bereitstellungskonzepte (vgl. Kapitel 5). Die Modellierung der Konzepte wurde mit der Software Umberto 5.5 mit Hilfe der Ökobilanzdatenbank Ecoinvent 2.2 umgesetzt. Im Folgenden werden prozessspezifische Annahmen und die Datengrundlagen beschrieben.

Die in den Konzepten bilanzierten Stoff- und Energieströme sind durch die Logistik- und Anlagenkonzepte weitgehend vorgegeben. Parameter wie Transportdistanzen, Hilfsstoffe und Hilfsenergieströme sind in den verschiedenen Modellierungen errechnet worden (siehe Kapitel 4 und 5). Damit ist jedoch noch nicht die Produktionsvorkette der eingesetzten Hilfsstoffe und -energien spezifiziert, die sich sehr unterschiedlich darstellen kann und auch zu sehr unterschiedlich hohen Emissionen führen kann (Treibhausgasemissionen aus der Vorkette). Im Folgenden sollen die Annahmen für die wichtigsten Parameter beschrieben werden. Generell orientieren sich die marktverfügbaren Anlagen an den heutigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bestehender Anlagen hinsichtlich ihrer Prozessenergieversorgung und ihres Nutzwärmeanteils.

Annahmen zum Strommix

Für die Bilanzierungen wurde analog zu den Referenzsystemen ein Strommix aus dem deutschen Kraftwerkspark angesetzt. Die Systemgrenze reicht von der Produktion des Stroms über die Einspeisung ins Netz bis zur jeweiligen Bezugsebene mit entsprechenden Verlusten (0,5 % Verluste im Hochspannungsnetz, 1 % Mittelspannungsverlust und 10 % Niederspannungsverlust). Der Materialbedarf für die Spannungsnetze ist ebenfalls in der Bilanz enthalten. Für die Konzepte zur Wärme- und Strombereitstellung wurde der deutsche Versorgungsmix berücksichtigt, welcher die Inlandproduktion plus Importe widerspiegelt. Es wurden die Datensätze des Versorgungsmixes aus der Ecoinvent Datenbank unter Anwendung der Mittelspannung für die hier bilanzierten Industrieanwendungen ausgewählt. Das Bezugsjahr für diese Datensätze ist 2004. Pro Kilowattstunde Strom, der in die Bilanzen einfließt, zum Beispiel als Hilfsenergie während der Konversion, ergeben sich Treibhausgasemissionen von 647,6 gCO₂-Äq. Ob und in welcher Höhe die Prozessstromversorgung in den Konzepten erfolgte, ist in Kapitel 5 (Anlagenkonzepte) beschrieben.

Die Konzepte zur Bereitstellung der Biokraftstoffe unterscheiden sich vor allem in zwei Punkten von denen der Wärme- und Strombereitstellung: Sie sind bisher noch nicht in kommerziellen Maßstab realisiert worden und sie decken tendenziell größere Leistungsbereiche ab. Daraus resultieren Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Prozessenergieversorgung. Um eine einheitliche Bilanzierung der drei Konzepte zu gewährleisten, wurde ein erneuerbarer Energiemix angesetzt, der sich in der prozentualen Zusammensetzung am Energiemix 2020 laut SRU Gutachten orientiert [157]. Pro Kilowattstunde Strom ergeben sich Treibhausgasemissionen in Höhe von 36 gCO₂-Äq.

Annahmen zu Verlusten

Es wurde mit durchschnittlich 7 % Verlusten während der Bergung und Transport des Stroh gerechnet. Für die Silierung wurden 5 % Silageverluste angesetzt. Bezüglich der Methanverluste im Biogasprozess wurde für diffuse Emissionen über die Anlage 1 % des produzierten Methans und für die Methanemissionen im Abgasstrom des BHKWs ebenfalls 1 % des produzierten Methans berechnet.

Annahmen zur Ascheentsorgung

Bei der Verbrennung fallen verschiedene Aschefraktionen (Feuerraumasche, Zyklon oder Filterasche) an. Im Sinne von geschlossenen Nährstoffkreisläufen ist es sinnvoll, Feuerraumaschen aus der Monoverbrennung von naturbelassenen pflanzlichen Ausgangsstoffen wieder auf das Feld zurückzuführen. Der Einsatz von Aschen auf landwirtschaftlichen Flächen als Düngemitteln ist jedoch nur möglich, wenn es sich um einen zugelassenen Düngemittel-Typ handelt und Mindestnährstoffgehalte, Schadstoffgrenzwerte und Kennzeichnung gem. DüMV erfüllt werden. Neben dem Einsatz von Aschen in der Landwirtschaft sind verschiedene Wege dokumentiert, wenn die Nutzung von z. B. Strohpellets von landwirtschaftlichen Kreisläufen entkoppelt ist. Üblicherweise werden die bei einer Zentralheizung anfallenden Mengen (Pelletkessel) im eigenen Garten oder im Restmüll entsorgt. Größere Mengen an Asche, wie sie beispielsweise in dem Strohheizwerk oder Heizkraftwerk entstehen, werden entweder in der Landwirtschaft ausgebracht oder mit dem Hausabfall verbrannt oder deponiert. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass jeweils ein Drittel der Asche in der Landwirtschaft ausgebracht, ein Drittel deponiert und ein Drittel verbrannt wird. Zur besseren Vergleichbarkeit der Konzepte gilt diese Annahme für alle Prozesse in denen Aschen aus der Strohverbrennung oder Vergasung anfallen.

9.1.3 Wirkungsabschätzung

In der Wirkungsabschätzung werden die Ergebnisse der Sachbilanzierung verarbeitet und Umweltwirkungskategorien zugeordnet, um die potenziellen Umweltwirkungen zu beurteilen. Im Rahmen dieser Studie wurde die Wirkungskategorie Treibhauseffekt untersucht. In dieser Kategorie sind alle Emissionen berücksichtigt, die nach dem IPCC als Treibhausgas gelten (z. B. Kohlendioxid und Kohlenmonoxid aus fossilen Quellen, Methan, Lachgas u. a.). Die CO₂-Emissionen aus den Verbrennungsprozessen des Festbrennstoffes oder der stroh-basierten Bioenergeträger werden nicht als Treibhausgas angerechnet, da sie biogenen Ursprungs sind. Die Treibhausgaswirkung verschiedener Gase ist nach den Faktoren des IPCC 2001 charakterisiert (CO₂: 1, CH₄: 23, N₂O: 296). Das Treibhausgaspotenzial bezieht sich in dieser Studie auf ein Zeitintervall von 100 Jahren.

9.1.4 Auswertung

In der Auswertungsphase werden die Ergebnisse aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam betrachtet und auf deren Basis Einschränkungen diskutiert. Es werden für das Ergebnis

wichtige Parameter, z. B. einzelne Prozessschritte, die wesentlich zur THG-Emissionsfreisetzung beitragen, identifiziert und aus diesen Ergebnissen werden im Anschluss Schlussfolgerungen und Empfehlungen entwickelt.

9.1.5 Allokationsmethodik

Wenn in einem Prozess mehrere Produkte (multi-output) oder Nebenprodukte auftreten, müssen auch die Umweltwirkungen zwischen den Produkten aufgeteilt werden. Dies kann u. a. durch die Anwendung von verschiedenen Allokationsmethoden geschehen. Welche Allokationsmethode unter welchen Bedingungen die geeignetste ist, ist eine der am stärksten diskutierten methodischen Fragen im LCA-Bereich. Als Verteilungsschlüssel können verschiedene Prinzipien, wie physische, chemische oder ökonomische Zusammenhänge oder physikalische Parameter wie z. B. Masse oder Energie herangezogen werden [158].

Bei dem Ansatz der **Energieallokation** werden die Emissionen aus der Prozesskette, die bis zur Entstehung des Koppelproduktes auftreten nach dem unteren Heizwert zwischen Koppelprodukt und Hauptprodukt aufgeteilt. In Annex V der EU RED wird für Koppelprodukte, die während der Biokraftstoffproduktion anfallen, diese so genannte Energieallokation vorgeschlagen. Diese wird auch in dieser Studie für Nebenprodukte aus der Kraftstoff-Produktion, z. B. Naphtha in der FT-Diesel-Produktion angewendet. Die Bestimmung des Allokationsfaktors, welcher den Anteil der Emissionen des Haupt-, bzw. des Nebenproduktes beschreibt, geschieht nach der folgenden Gleichung:

$$AF_{HP} = \frac{m_{HP} \cdot H_{u,HP}}{m_{HP} \cdot H_{u,HP} + m_{NP} \cdot H_{u,NP}} \quad \text{Gl. 12}$$

AF	Allokationsfaktor
m_{HP}	Masse Hauptprodukt
m_{NP}	Masse Nebenprodukt
$H_{u,HP}$	unterer Heizwert Hauptprodukt
$H_{u,NP}$	unterer Heizwert Koppelprodukt(e)

Im Fall der Bereitstellung von Strom und Wärme aus Festbrennstoffen und gasförmigen Bioenergieträgern ist eine der wichtigsten methodischen Fragen, wie die Emissionen zwischen der Wärme und dem Strom aufgeteilt werden. Im Anhang der EU COM wird für KWK Pfade empfohlen, die Allokation mit Hilfe der Carnot Effizienz (**Allokation nach Exergie**) durchzuführen [34]. Diese Methodik wird in dieser Studie für alle Pfade, in denen neben Strom auch Wärme bereitgestellt wird, angewendet. Die Exergieallokation berücksichtigt die Tatsache, dass Strom und Wärme unterschiedliche thermodynamische Wertigkeiten bzw. unterschiedliche Exergiegehalte aufweisen. Das Verhältnis des Exergiegehalts zwischen Strom- und Wärme fließt bei diesem Allokationsverfahren über den Carnot-Faktor in die Bestimmung des Allokationsfaktors ein. Der Allokationsfaktor für die Produkte des KWK-Prozesses wird durch die folgende Gleichung (Gl. 13) bestimmt. Die Wärmemenge, auf die Bezug genommen wird, ist generell der Nutzenergieanteil.

$$AF_{HP} = \frac{c_{el} \cdot n_{el}}{c_{el} \cdot n_{el} + c_{th} \cdot n_{th}} \quad \text{Gl. 13}$$

AF	Allokationsfaktor
HP	Hauptprodukt
c_{el}	Exergetische Wertigkeit
n_{el}	Elektrischer Wirkungsgrad
c_{th}	Exergetische Wertigkeit Wärme
n_{th}	Thermischer Wirkungsgrad

9.1.6 Referenzsysteme und Treibhausgasminderungspotenzial

Um die Ergebnisse aus der Ökobilanzierung verschiedener Nutzungsoptionen mit anderen – in der Regel fossilen – Optionen zu vergleichen, müssen Referenzsysteme definiert werden und die Gesamtemissionen aus diesen Systemen bestimmt werden. Um eine potenzielle Treibhausgasminderung- oder -erhöhung zu berechnen, werden die Gesamtemissionen des (fossilen) Komparators mit den Emissionen aus der Verwendung der Biomasse verglichen. Grundlegend erfolgt die Berechnung des Treibhausgasminderungspotenzials mit der nachfolgenden Formel:

Gl. 14

$$THG\text{-Minderung} = \frac{E_F - E_B}{E_F} * 100\%$$

E_F	Gesamtemissionen des fossilen Komparators
E_B	Gesamtemissionen bei der Verwendung der Biomasse

Es bestehen verschiedene Möglichkeiten bezüglich der Wahl des fossilen Referenzsystems. Je nachdem welche fossile Referenz ausgewählt wurde, kann sich eine Spannweite einer möglichen Emissionsminderung ergeben. Zum einen kann eine Durchschnittsbetrachtung angestrebt werden, z. B. ein Strommix der den deutschen Kraftwerkspark als Referenz widerspiegelt. Alternativ kann eine Grenzbetrachtung zu Grunde gelegt werden, z. B. Strom aus einem industriespezifischen Kraftwerkspark. Diese Variante scheint naheliegend wenn ein Standort bekannt ist und sicher ist, welcher Strom substituiert wird. Da in dieser Studie keine konkreten Anlagen- und Anlagenstandorte bilanziert, sondern Modellanlagen betrachtet werden, wird in dieser Studie eine Durchschnittsbetrachtung angestrebt. Das gewählte Referenzsystem für die Strombereitstellung ist somit der Produktionsmix frei Kraftwerkspark. Dabei wird der deutsche Erzeugungsmix 2010 des öffentlichen Kraftwerksparkes herangezogen, der nach [131] 160,8 gCO₂-Äq./MJ_{el} aufweist. Neben dieser Durchschnittsbetrachtung werden aber auch die Emissionen aus einem Importkohlekraftwerk und die Emissionen aus der Strombereitstellung eines Erdgas-Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk (GuD)-Kraftwerkes als Grenzbetrachtung vergleichend dargestellt. In Tabelle 42 sind die Treibhausgasemissionen der fossilen Komparatoren zusammengestellt.

Tabelle 42: Treibhausgasemissionen für die verschiedenen fossilen Referenzsysteme nach [131][144]

	THG-Emissionen (gCO ₂ -Äq./MJ)	THG-Emissionen (gCO ₂ -Äq./kWh)
Strom-Produktionsmix deutscher Kraftwerkspark	160,8	578,9
Strombereitstellung Erdgas-GuD-Kraftwerk	112,7	405,7
Strombereitstellung Importsteinkohle-Kraftwerk	248,1	893,2
Wärme aus dem Mixsystem Erdgas/Heizöl	87,8	315,7
Wärme aus Erdgas-Brennwert-System	69,7	250,9
Wärme aus Heizöl-NT	104,5	376,2
Benzin	90,2	324,7
Diesel	87,5	315,0
Erdgas/ CNG (Compressed natural gas)	70,7	254,5

Als fossiles Referenzsystem für die Wärmebereitstellung wird ein Erzeugungsmix aus Erdgas- und Heizöl-Niedertemperaturheizungen angesetzt, dessen Emissionen nach [131] 87,8 gCO₂-Äq./MJ betragen. Dieser Wert deckt sich annähernd mit dem in der EU COM genannten fossilen Wärmekomparator von 87 gCO₂-Äq./MJ [34]. Um die Bandbreite aufzuzeigen, in der sich die Emissionen aus der fossilen Wärmebereitstellung bewegen können, werden als Grenzbetrachtungen ein Erdgas-Brennwert-System und ein Heizöl-NT-System dargestellt (vgl. Tabelle 42).

Die fossilen Referenzen für den Kraftstoffbereich sind Benzin, Diesel und komprimiertes Erdgas (compressed natural gas, CNG). Die in Tabelle 42 genannten Emissionswerte schließen auch die 100 % Umwandlung des Kraftstoffes in einem Mittelklassewagen ein. Die geringsten Emissionen entstehen bei der Produktion und Nutzung von CNG. Sie betragen nach [144] 70,78 gCO₂-Äq./MJ. Für Benzin und Diesel wurden die Emissionen in Höhe von 87,5 bzw. 90,2 gCO₂-Äq./MJ bilanziert [131]. Der fossile Komparator aus der EU Richtlinie, der einen europäischen Mix aus Diesel und Benzin beschreibt, ist mit 83,8 gCO₂-Äq./MJ etwas niedriger als die deutschen Standards angesetzt.

9.2 Ergebnisse

Die in der Ergebnisdarstellung unter der Kategorie **Bereitstellung** zusammengefassten Prozesse umfassen die Prozessschritte Strohhäufung und eine Stickstoffkompensationsdüngung. Die Strohhäufung wiederum setzt sich aus den Schritten Sammeln, Bergen und Pressen von Stroh, Umschlag- und Transportprozesse bis zum landwirtschaftlichen Betrieb, Lagerung der Strohballen, und gegebenenfalls ein Aufbereitungsverfahren wie Zerkleinerung und Silierung zusammen. Die Module zur Strohhäufung und zur Stickstoffkompensationsdüngung sind für alle Pfade identisch, somit sind auch die Treibhausgasemissionen pro Tonne Stroh für alle Pfade zunächst gleich hoch. Wenn keine weiteren Aufbereitungsverfahren berücksichtigt worden sind, resultieren die unterschiedlich hohen Emissionen für die Bereitstellungsprozesse pro Megajoule aus den verschiedenen Wirkungsgraden zwischen den Technologien.

Die **Transportprozesse** der verschiedenen Bereitstellungspfade variieren stark hinsichtlich der Transportmittel und -distanzen in Abhängigkeit des jährlichen Rohstoffbedarfes einer Anlage. Sie bestehen in der Regel aus den Fahrtwegen zwischen landwirtschaftlichem Betrieb und der Konversionsanlage. Bei einigen Konzepten gibt es auch noch zusätzliche Wege, z. B. Transportwege zwischen der Konversionsanlage und dem Endverbraucher (Pelletstransport zum Endabnehmer). Die THG-relevanten Emissionen aus den Transportmodulen variieren aufgrund der unterschiedlich hohen Aufwendungen (Kraftstoffverbrauch) für den Transport stark.

Unter der Kategorie **Konversion** sind nachfolgend direkte THG-Emissionen, die während der Konversion entstehen, sowie Emissionen aus der Produktion und dem Einsatz von Hilfsmitteln und -energien zusammengefasst. Besonders großen Einfluss auf das Ergebnis haben die THG-Emissionen aus dem Einsatz von Prozessenergie, die in Regel primär aus fossilen Energien bereitgestellt wird. Eine Kilowattstunde Strom, die in die THG-Bilanzierung eines Anlagenkonzeptes eingegangen ist, ist mit 647,6 g CO₂-Äq. vorbelastet. Somit weisen alle Konzepte, die einen hohen Einsatz konventioneller (fossiler) Energien aufweisen, tendenziell hohe Emissionen auf. Von dieser Gemeinsamkeit abgesehen, sind die Emissionen, die in der Konversionsphase auftreten, technologiespezifisch und unterscheiden sich daher bei den Konzepten.

Die **Entsorgung** der Prozessabfälle ist die letzte Phase im Lebenszyklus. Für alle Pfade, in denen Aschen auftreten, sind standardisierte Module zur Entsorgung bilanziert worden. Technologiespezifisch kommt es zu bestimmten Abfällen und Entsorgungspfaden und daher zu unterschiedlichen THG-Emissionen für diesen Prozessschritt.

In Abbildung 79 sind die Ergebnisse aus der Bilanzierung der Anlagenkonzepte in einer Übersicht dargestellt. Ein direkter Vergleich zwischen den Wärme-, Kraftstoff- und KWK-Konzepten ist nicht möglich, da es sich um verschieden wertige Energien handelt. Die Ergebnisse aus der Treibhausgasbilanzierung für die verschiedenen Konzepte liegen in einer Bandbreite zwischen 8 und 40 gCO₂-Äq./MJ Endenergie. Als generelle Tendenz über alle Konzepte ist zu erkennen, dass die THG-Emissionen aus dem Prozessschritt der Konversion (Einsatz von Hilfsenergie oder Hilfsstoffe oder direkte Emissionen) sowie aus der Stickstoffkompensationsdüngung den größten Anteil an den Gesamtemissionen aufweisen. Die aus den Transportprozessen und der Entsorgung der Aschen resultierenden THG-Emissionen fallen für alle Konzepte sehr gering aus. Im Folgenden wird in einer ausführlichen Darstellung auf die Bilanzierungsergebnisse der Wärme-, Strom/KWK- und Kraftstoffkonzepte eingegangen.

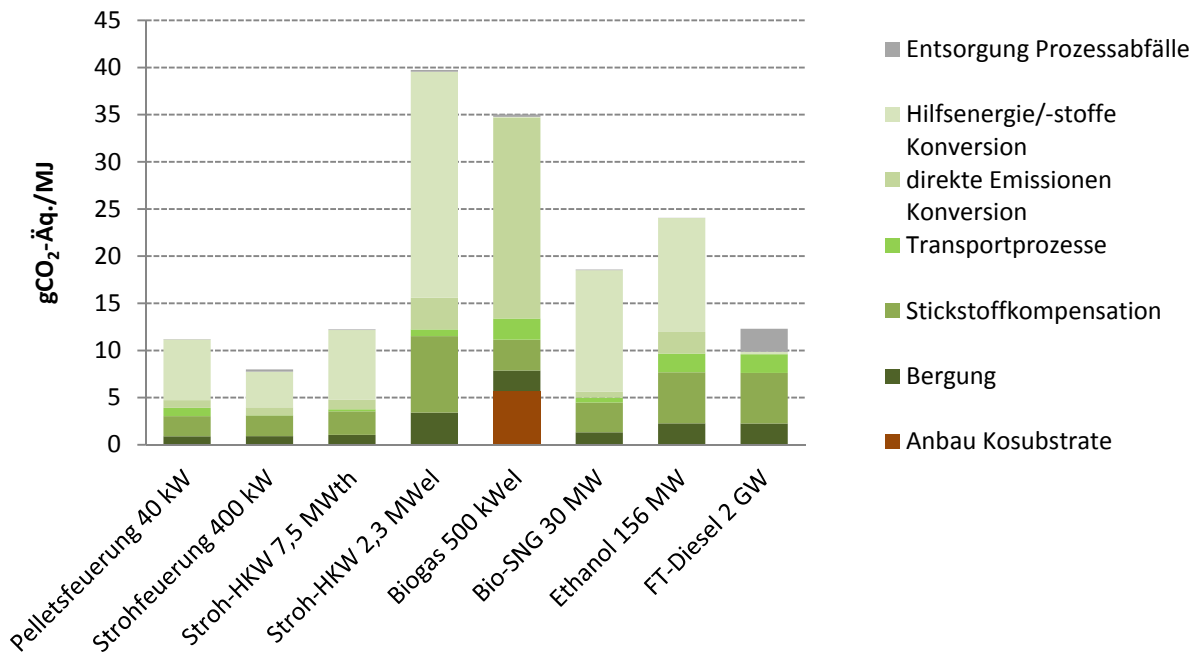


Abbildung 75: Übersicht über die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzierung für verschiedene Strohnutzungskonzepte

9.2.1 Wärmebereitstellung

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Bilanzierung der drei Konzepte zur Wärmebereitstellung auf der Basis von Stroh beschrieben. Dabei handelt es sich um das Anlagenkonzept Pelletskessel mit einer Feuerungswärmeleistung von 40 kW, das Konzept zum Strohheizwerk mit einer Feuerungswärmeleistung von 400 kW und das Anlagenkonzept Strohheizkraftwerk mit einer Feuerungswärmeleistung von 11,2 MW. Die Bilanzen für diese Pfade basieren auf den Anlagen- und Bereitstellungskonzepten, deren ausführliche Beschreibung im Kapitel 5.2.1 nachzulesen ist.

Die Ergebnisse aus der Treibhausgasbilanzierung für die drei Konzepte zur Wärmebereitstellung sind in Abbildung 76 dargestellt. Die THG-Emissionen, die für das Konzept Pelletsfeuerung und die Strohfeuerung im Heizkraftwerk bilanziert worden sind, unterscheiden sich nur geringfügig und betragen 11,2 bzw. 12,2 gCO₂-Äq./MJ. Ein Megajoule Wärme, welches im 400 kW Strohheizwerk bereitgestellt wird, ist mit ca. 8 gCO₂-Äq./MJ über den gesamten Lebenszyklus belastet. Für alle Konzepte gilt die Aussage, dass der Hauptteil der Treibhausgasemissionen während des Konversionsprozesses (58-69 %), also während der Verbrennung auftritt. Dabei handelt es sich nur zu einem geringen Teil um direkte THG-relevante Emissionen. Der höchste Anteil der Emissionen lässt sich auf den Verbrauch von Hilfsenergie zurückführen. Durch die Strohbereitstellung, hier im Wesentlichen durch die Stickstoffkompensationsdüngung, entsteht ebenfalls ein signifikanter Anteil der THG-Emissionen (19-27 %). Die aus den Transportprozessen und der Entsorgung der Aschen resultierenden Emissionen fallen für alle Konzepte sehr gering aus.

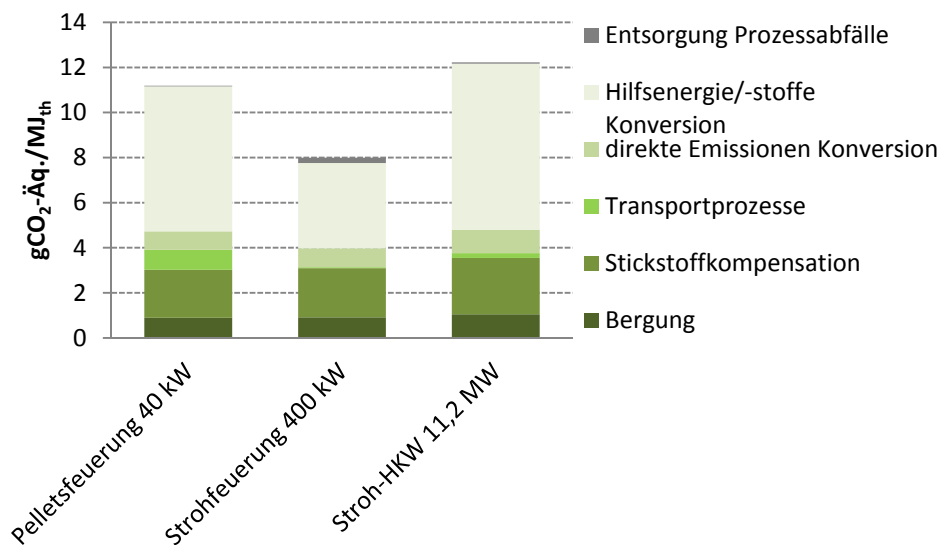


Abbildung 76: THG-Emissionen der Wärmebereitstellung

In dem Heizungssystem mit der geringsten Wärmeleistung, der **40 kW Feuerungsanlage**, wird Stroh in pelletierter Form eingesetzt, da die geforderten Grenzwerte nur mit einem genormten Brennstoff zu erreichen sind. Für das Pelletieren werden Hilfsenergien und -stoffe (Bindemittel) benötigt, deren Vorketten wiederum in die Bilanzierung der Treibhausgase einfließen. Da das Pelletieren ein vergleichsweise energieintensiver Prozess ist, entsteht während dieses Prozessschrittes der größte Anteil der Treibhausgasemissionen durch den Verbrauch von Strom. Die Produktion der Pellets ist zwar energieintensiv und mit entsprechenden Treibhausgasen belastet, allerdings werden direkte Emissionen, die während der Verbrennung entstehen, aufgrund der erhöhten Homogenität des Brennstoffes und der kontinuierlicheren Verbrennung reduziert. Die THG-Emissionen, die aus Transportprozessen resultieren machen in diesem Konzept einen Anteil von ca. 8 % aus und sind somit im Vergleich zu den anderen Konzepten deutlich höher. Dies liegt zum einen an den größeren Einzugsradien für den hohen Rohstoffbedarf der Pelletieranlage und zum anderen an den zusätzlichen Transportwegen zwischen Pelletierwerk und Endverbraucher. Die längeren Transportwege verursachen wiederum einen höheren Dieselbedarf und entsprechend höhere Treibhausgasemissionen.

Die Treibhausgasbilanz der Wärme aus der **400 kW Strohfeuerungsanlage** ist im Vergleich zu den anderen Konzepten mit 7,99 gCO₂-Äq./MJ am geringsten ausgefallen. In der Bilanz dieses Konzeptes sind die meisten THG-relevanten Emissionen auf den Einsatz von Hilfsenergien für den Betrieb der Feuerungsanlage zurückzuführen. Zum Betrieb ist Strom für die Regelungstechnik, für den Motorbetrieb für Ascheaustragung und Rohstoffeinschub, Ventilatoren und Wasserpumpen notwendig. Die THG-relevanten Emissionen, die potenziell im Verbrennungsprozess auftreten, sind sehr gering. Das hängt mit dem vergleichsweise geringen Rohstoffbedarf und den kurzen Transportdistanzen für dieses dezentrale Konzept zusammen. Die mit der Bereitstellung, dem Transport oder der Entsorgung der Aschen verbundenen Emissionen fallen ebenfalls kaum ins Gewicht.

Die THG-Emissionen, die im **Stroh-Heizkraftwerk** auftreten, resultieren ebenso wie in den anderen Wärmefäden hauptsächlich aus dem Stromeinsatz während des Konversionsprozesses. Sechzig Prozent der Gesamtemissionen sind auf den Einsatz von externer Hilfsenergie zurückzuführen. Diese THG-Emissionen könnten vermieden werden, indem der vom Kraftwerk bereitgestellte Strom prozessintern

eingesetzt würde. Doch da diese Versorgung aus ökonomischen Gründen in der Regel nicht praktiziert wird, fließt in die Bilanzierung Strom aus dem deutschen Kraftwerksmix ein. In der Darstellung ist zu erkennen, dass THG-Emissionen durch den Einsatz von Hilfsenergien und -stoffen im Vergleich zum Strohheizwerk höher ausfallen, was auf die zunehmende Komplexität des Prozesses zurückzuführen ist. Das Ergebnis von 12,2 gCO₂-Äq./MJ für die Wärme aus Heizkraftwerk beinhaltet keine Allokation. Alle THG-Emissionen sind der Wärme angerechnet worden. Durch die Anwendung des nach Gl. 13 berechneten Allokationsfaktors Wärme (0,375) wäre das Ergebnis lediglich eine THG-Emission von 4,6 gCO₂-Äq./MJ.

In Abbildung 77 werden die Ergebnisse der potenziellen Treibhausgasemissionen aller bilanzierten Wärmepfade mit fossilen Referenzsystemen verglichen. Dabei zeigt sich, dass die biogenen Wärmepfade signifikant weniger Treibhausgasemissionen verursachen als die fossilen Referenzen. Als Durchschnittswert wird die Wärme aus dem Mixsystem Erdgas/Heizöl herangezogen (87,8 gCO₂-Äq./MJ), der zwischen den hier genannten Min- und Max-Werten liegt. Mit den bilanzierten Pfaden könnten bis zu 91 % der THG-Emissionen der fossilen Wärmebereitstellung eingespart werden.

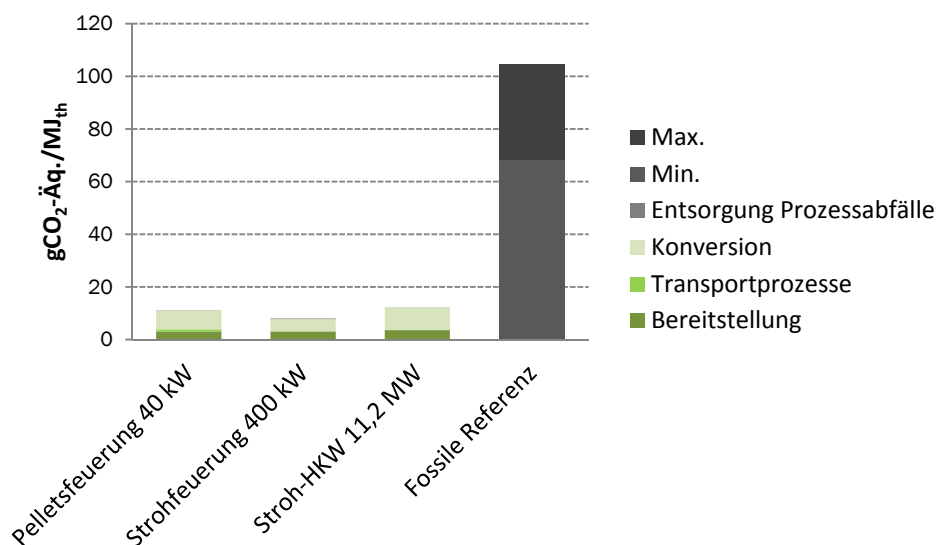


Abbildung 77: THG-Emissionen der biogenen und fossilen Wärmebereitstellung

9.2.2 Strom/KWK-Bereitstellung

Stroh kann neben der reinen Wärmebereitstellung auch in Pfaden zur Strombereitstellung bzw. Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) eingesetzt werden. Die hier bilanzierten Konzepte sind die Strohvergärung in einer 500 kW Biogasanlage und die Strohverbrennung in einem Heizkraftwerk mit einer Leistung von 11,2MW_{FWL} (vgl. Anlagenkonzepte zur KWK-Bereitstellung in Kap. 5.2.2). In Abbildung 78 sind die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzierung für die zwei Konzepte dargestellt. Die Ergebnisse liegen in einer ähnlichen Größenordnung und betragen 35 gCO₂-Äq./MJ Strom für die Biogasanlage und 39,7 gCO₂-Äq./MJ Strom für das Heizkraftwerk. Auch in diesen Konzepten entstehen die THG-Emissionen zum größten Anteil während der Prozessschritte Konversion und Bereitstellung, allerdings differieren die Ursachen und die Art der Emissionen. Die THG-Emissionen aus dem Transport und die Entsorgung der Prozessabfälle fallen kaum ins Gewicht. Für beide Konzepte wurden die THG-Emissionen zwischen Strom und Nutzwärme exergetisch alloziert. Die nach Gl. 13 berechneten Allokationsfaktoren Wärme

betragen 0,375 für das Strohheizkraftwerk und 0,171 für die Biogasanlage; die Allokationsfaktoren für den Strom liegen entsprechend bei 0,625 respektive 0,829.

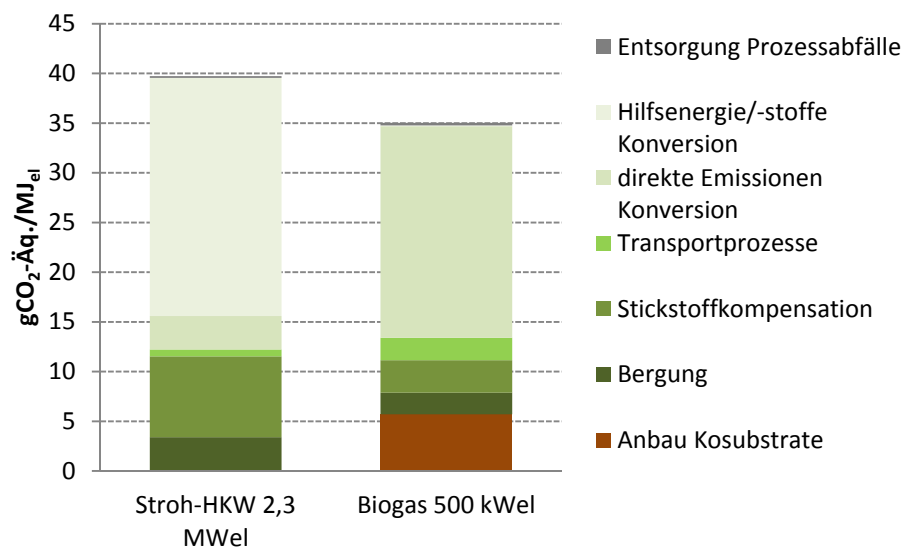


Abbildung 78: THG-Emissionen der Konzepte zur Strom/KWK-Bereitstellung

Die meisten THG-relevanten Emissionen entstehen im Konzept **Heizkraftwerk** durch den Einsatz von Hilfsenergien für den Betrieb der Feuerungsanlage. Die Prozessenergie könnte auch prozessintern bereitgestellt werden. Da dies aus ökonomischen Gründen in der Regel nicht praktiziert wird, wurde der Einsatz von extern produziertem Strom mitbilanziert (Strom aus dem deutschen Kraftwerksmix), der mit entsprechend hohen THG-Emissionen belastet ist. Die direkten THG-relevanten Emissionen aus der Verbrennung betragen 3,4 gCO₂-Äq./MJ elektrisch. Neben den THG-Emissionen aus dem Konversionsprozess, ist die Bereitstellungsphase des Strohs ausschlaggebend, hier im Besonderen THG-Emissionen, die durch die Stickstoffkompensationsdüngung entstehen. Sie betragen ca. 20 % der Gesamtemissionen.

Die einzelnen Prozessschritte, die wesentlich zur THG-Freisetzung beitragen, stellen sich in dem Modellkonzept der **Biogasanlage** anders da: Die direkten THG-Emissionen aus der Konversion machen über 50 % der Gesamtemissionen aus. Sie bestehen aus Methanemissionen, die diffus aus dem Fermenter und dem BHKW emittiert werden. THG-relevante Emissionen aus dem Einsatz von Hilfsenergie erscheinen in dieser Bilanz nicht, da von einer internen Prozessenergieversorgung ausgegangen wird. Die THG-relevanten Emissionen, die aus der Strohbergung und durch den Nährstoffentzugs des Strohs resultieren, fallen in diesem Konzept geringer aus, da Stroh nur anteilig eingesetzt wird. Unter der Kategorie Strohbergung sind auch die Aufwendungen der Substrataufbereitung (in diesem Fall ein mechanischer Aufschluss des Strohs und Silage mit Klee gras) zusammengefasst.

Das Konzept zur Strohvergärung in der Biogasanlage nimmt im Vergleich zu allen anderen Konzepten eine Sonderstellung ein, da es sich um ein Zumischungskonzept handelt, bei dem neben dem Reststoff Stroh auch Gülle und Klee gras eingesetzt werden. THG-Emissionen aus dem Anbau von Klee gras sind unter der Kategorie „Anbau Kosubstrate“ zusammengefasst und betragen ca. 5 gCO₂-Äq./MJ. Die THG-Emissionen, die durch Transportaufwendungen entstehen sind mit 2,24 gCO₂-Äq./MJ im Vergleich zu

den anderen Konzepten etwas höher, was auf die zusätzlichen Transportaufwendungen für die Ko-Substrate und Gülle zurückzuführen ist.

In der in Abbildung 78 dargestellten Bilanzierung wurde das bei der Bereitstellung von Biogas mengenmäßig sehr relevante Nebenprodukt, der Gärrest, bisher nicht berücksichtigt. Da eine Allokation nach energie- oder massebezogenen Gesichtspunkten ungeeignet scheint, wurde in einer Berechnungsvariante die folgende Methodik umgesetzt: Da Gärreste als organische Düngemittel fungieren und synthetische Düngemittel ersetzen können, wurde eine Gutschrift für vermiedene THG-Emissionen durch eine reduzierte Produktionen synthetischer Düngemittel vergeben. Dazu wurde der im Gärrest enthaltene Nährstoffwert berechnet (N, P, K-Gehalt). Die entsprechende Menge an THG-Emissionen, die bei der Produktion der identischen Menge an synthetischen Düngemittelmengen angefallen wäre, wurden dem System anschließend als vermiedene Emissionen angerechnet. Für die Emissionsfaktoren für Düngemittel wurden europäische Durchschnittswerte angesetzt [159]. Für diesen Biogasprozess könnten pro Kilowattstunde Strom potenziell 41,4 gCO₂-Äq. vermieden werden, wenn durchschnittliche Emissionswerte für die Düngemittelproduktion herangezogen werden. Damit würden die bilanzierten THG-Emissionen des Anlagenkonzeptes Biogas rein rechnerisch aufgehoben und pro MJ Strom 6,4 gCO₂-Äq./MJ zusätzlich zu der Substitution von fossilem Strom eingespart werden.

In Abbildung 79 sind die Ergebnisse der THG-Bilanzierung für die zwei KWK-Konzepte im Vergleich zur den THG-Emissionen der fossilen Strombereitstellung dargestellt. Das THG-Einsparpotenzial liegt zwischen 75 und 78 % im Vergleich zur durchschnittlichen fossilen Referenz.

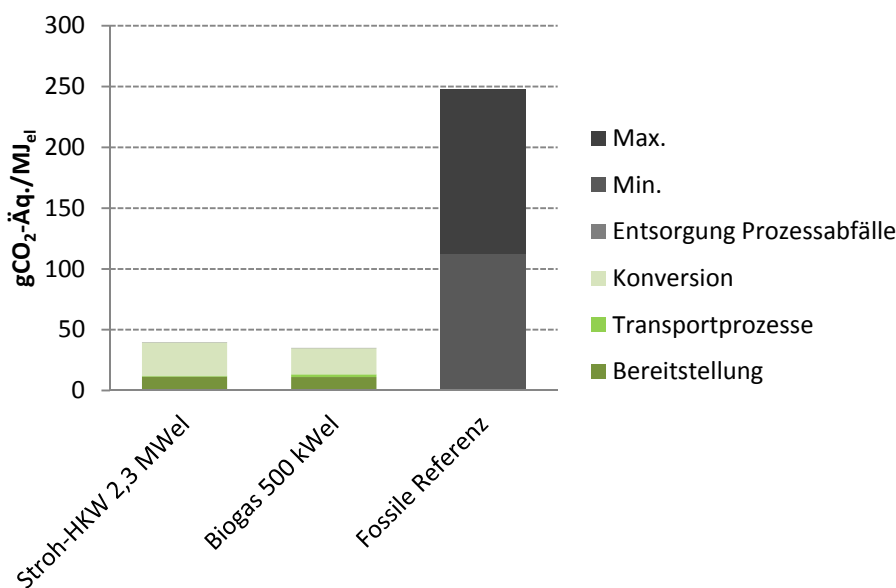


Abbildung 79: THG-Emissionen der Konzepte zur Strom/KWK-Bereitstellung und der fossilen Referenzen

9.2.3 Kraftstoffe

Der Einsatz von Stroh zur Bereitstellung von Kraftstoff wurde für drei Modellanlagen, eine SNG-, eine Ethanol- und eine FT-Diesel-Anlage bilanziert (vgl. 5.2.3). Die Ergebnisse aus der THG-Bilanzierung sind in Abbildung 80 dargestellt. Sie liegen im Bereich zwischen 13 und 24 gCO₂-Äq./MJ Kraftstoff. Die für diese Pfade berechneten und in diesen Ergebnissen enthaltenen Allokationsfaktoren für das

Hauptprodukt sind 0,94 für das Bio-SNG-Konzept, 0,67 für die Ethanolanlage und 0,75 für das FT-Diesel-Konzept.

Für diese zukünftigen Kraftstoffkonzepte wurde angenommen, dass die Prozessenergieversorgung auf erneuerbaren Energien beruht, daher weisen diese Konzepte im Vergleich zu den oben beschriebenen Anlagen bezüglich dieses Parameters geringere THG-Emissionen auf. Der Konversionsprozess ist generell komplexer als in den anderen Modellanlagen und der vermehrte Hilfsstoffeinsatz, schlägt sich teilweise deutlich in den Bilanzen nieder. Auch die THG-relevanten Emissionen, die aus den Bereitstellungsprozessen resultieren, machen einen höheren Anteil am Gesamtergebnis aus (zwischen 24,5 und 62 %). Die Kraftstoffkonzepte zeichnen sich durch einen hohen Rohstoffbedarf (Konzept Ethanol und FT-Diesel) und damit verbunden durch einen vergleichsweise hohen Anteil der THG-Emissionen durch Transportprozesse aus.

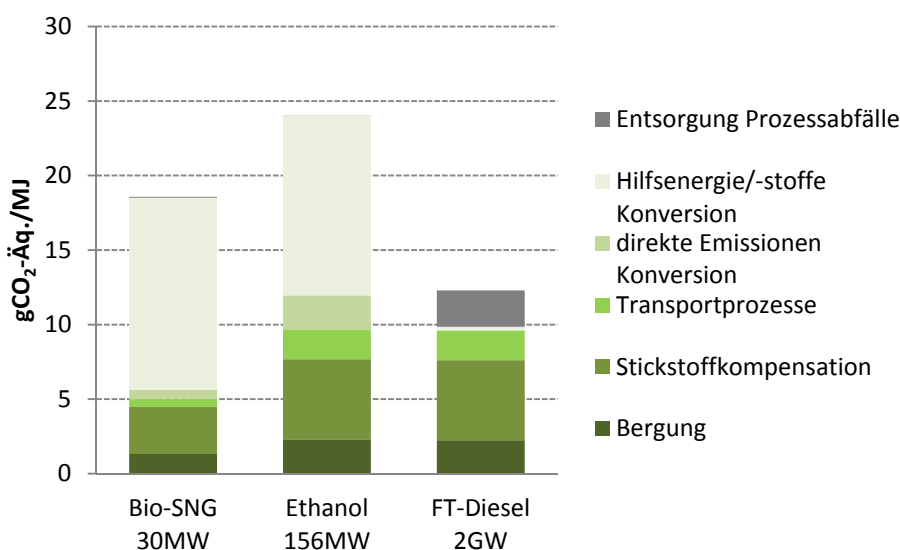


Abbildung 80: THG-Emissionen der Konzepte zur Kraftstoffproduktion

Das **Bio-SNG** Konzept weist die Besonderheit auf, dass Stroh in pelletierter Form eingesetzt wird und dass das Produkt aus diesem Pfad ein gasförmiger Kraftstoff ist. Die Treibhausgasbilanz für die Bio-SNG Anlage, beträgt 18,6 gCO₂-Äq. pro MJ produzierten Kraftstoff. Die THG-Emissionen aus Transport und Bereitstellung haben einen prozentualen Anteil an den Gesamtemissionen von ca. 27 %. Der restliche Anteil der Treibhausgase ist auf den Einsatz von Hilfsenergien und Hilfsstoffen während der Konversion zurückzuführen. Potenzielle THG-Emissionen in Höhe von 8,5 gCO₂-Äq./MJ entstehen durch den Einsatz von Strom während der Pelletierung des Strohs. THG-Emissionen in Höhe von 2,7 gCO₂-Äq./MJ resultieren aus der Produktion und dem Einsatz von Hilfsstoffen wie Aktivkohle, CaCO₃, SiO₂, Ni, N₂, ZnO u. a.

Das Anlagenkonzept zur Produktion von **Ethanol** ist mit 156 MW deutlich größer dimensioniert als die Bio-SNG Anlage. Das Konzept sieht den jährlichen Einsatz von 300.000 Tonnen Stroh vor und ist durch die Besonderheit charakterisiert, dass eine Biogasanlage und eine KWK-Anlage integriert sind. Das Nebenprodukt Schlempe soll in einer Biogasanlage und das Lignin in der KWK-Anlage eingesetzt werden. Die Prozessenergieversorgung kann somit zum größten Teil intern bereitgestellt werden. Das Ergebnis der Treibhausgasbilanz dieser Modellanlage beträgt 24 gCO₂-Äq. pro MJ Ethanol. Auch in

diesem Konzept dominieren die THG-Emissionen, die während der Konversionsphase entstehen. Fast 50 % der gesamten Emissionen entstehen durch die Produktion und den Einsatz von Hilfsstoffen. Mit 7,3 gCO₂-Äq./MJ wurde der Einsatz von Enzymen bilanziert, die für den Aufschluss von Cellulose und Hemicellulose nötig sind. Die als direkte THG-Emissionen aus dem Konversionsprozess aufgeführten Werte sind Methanemissionen und stammen aus der integrierten Biogasanlage, für die äquivalent zu der oben bilanzierten Anlage die gleichen Annahmen zum Methanschluß gelten. THG-Emissionen aus Transport und Bereitstellung fallen durch den höheren Rohstoffbedarf etwas höher als im Bio-SNG Konzept aus und betragen ca. 40 % der Gesamtemissionen.

Mit dem **FT-Diesel** Konzept wurde eine Modellanlage ausgewählt, die das obere Ende des Leistungsspektrums für Bioenergieanlagen aufzeigt. Bei einem jährlichen (Überschuss)-Strohpotenzial von 10 Mio. Tonnen Stroh müsste ca. 30 % des gesamten Strohs Deutschland in diesen Produktionspfad gehen. Damit die Transportaufwendungen eingedämmt werden, geht das Konzept von einer zentralen FT-Diesel-Anlage aus, die wiederum von 20 dezentralen Pyrolyseanlagen versorgt wird. In den Pyrolyseanlagen wird auf Basis von Stroh ein Slurry mit hoher Energiedichte produziert, welches an eine zentrale Kraftstoffanlage geliefert wird (vergleiche Konzeptbeschreibung 5.3.3). Die Gesamtbilanz dieses Anlagenkonzeptes beläuft sich auf 12,3 gCO₂-Äq. pro MJ Kraftstoff. Die THG-Emissionen aus den Transportaufwendungen sind zwar die höchsten aller Konzepte, aber mit 2 gCO₂-Äq. pro MJ FT-Diesel immer noch vergleichsweise niedrig. Die THG-Emissionen, die durch die Bergung des Strohs und die Stickstoffkompensationsdüngung potenziell hervorgerufen werden, sind vergleichbar zum Konzept der Ethanolanlage. Der Grund, warum dieses Konzept unter den Kraftstoffkonzepten die geringsten Gesamtemissionen aufweist, ist das Fehlen THG-emissionsrelevanter Prozesse (Enzymproduktion und Pelletierung), welche die Konversionsphase der anderen Kraftstoffkonzepte dominiert haben.

In Abbildung 81 sind die THG-Emissionen aller hier bilanzierten Kraftstoffkonzepte im Vergleich zu den entsprechenden fossilen Komparatoren dargestellt (vgl. 9.1.6). Die Treibhausgasemissionen von Bio-SNG werden mit THG-Emissionen aus der Bereitstellung und dem Einsatz von CNG, FT-Diesel mit fossilem Diesel und Bioethanol mit Benzin verglichen. Alle Pfade weisen deutlich geringere Werte als die entsprechenden fossilen Referenzen auf. Mit der Substitution der fossilen Kraftstoffe durch den Einsatz von Ethanol und Bio-SNG könnten bis zu 73 % der THG-Emissionen eingespart werden. Das FT-Diesel-Konzept erreicht einen potenziellen Einspareffekt von 86 %.

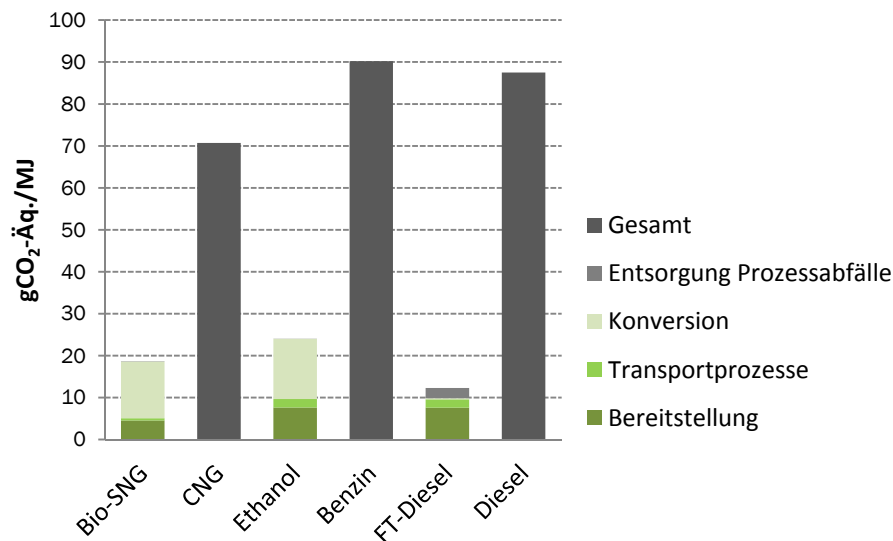


Abbildung 81: THG-Emissionen der Konzepte zur Kraftstoff-Bereitstellung und der fossilen Referenzen

9.2.4 Vergleich der Ergebnisse mit fossilen Referenzen

Der Vergleich der THG-Emissionen der strohbasierten Pfade mit den fossilen Referenzen zeigt für alle Pfade deutliche Einsparmöglichkeiten auf. In Abbildung 82 sind die Treibhausgasersparungen für alle hier bilanzierten Pfade pro MJ Endenergie dargestellt. Im Standardvergleich (Durchschnittsbetrachtung vgl. 9.1.6) liegen die THG-Einsparungen zwischen 52 gCO₂-Äq. pro MJ Bio-SNG und 126 gCO₂-Äq. pro MJ Strom für die Biogasanlage. Obwohl die Strom/KWK-Konzepte die höchsten THG-Emissionen aufweisen, können sie im Vergleich mit der fossilen Referenz die höchsten THG-Einsparungen erzielen. Verantwortlich für dieses Ergebnis ist der hohe Referenzwert für den deutschen Kraftwerkspark, der durch den Anteil von 32,4 % Stein- bzw. Braunkohle mit entsprechend hohen THG-Emissionen belastet ist. Der Referenzwert für die fossile Stromerzeugung kann erheblich schwanken, je nachdem welches Kraftwerk oder welcher Mix für den Vergleich herangezogen wird. Durch die Substitution von Strom aus einem Importsteinkohle-Kraftwerk kann bis zu 213 gCO₂-Äq./MJ eingespart werden. Ähnlich große Schwankungsbreiten gibt es auch hinsichtlich der fossilen Referenz zur Wärmebereitstellung. In der Durchschnittsbetrachtung kann durch den Betrieb der Strohfeuerungsanlage bis zu 80 gCO₂-Äq./MJ eingespart werden, dicht gefolgt von der Pelletsfeuerung. Die maximale potenzielle THG-Einsparung für die hier betrachteten Wärmekonzepte liegt bei 96,5 gCO₂-Äq./MJ. Die hier bilanzierten Kraftstoffpfade weisen die niedrigsten potenziellen THG-Einspareffekte pro Megajoule auf und liegen bei maximal 75 gCO₂-Äq./MJ bzw. zwischen 73 und 86 %. Wird der fossile Komparator aus der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie für einen Vergleich genutzt (83,8 gCO₂/MJ) liegen die THG-Einsparungen zwischen 71 und 85 %. Somit kann die für das Jahr 2017 geforderten THG-Einsparungen von 50 % erreicht werden.

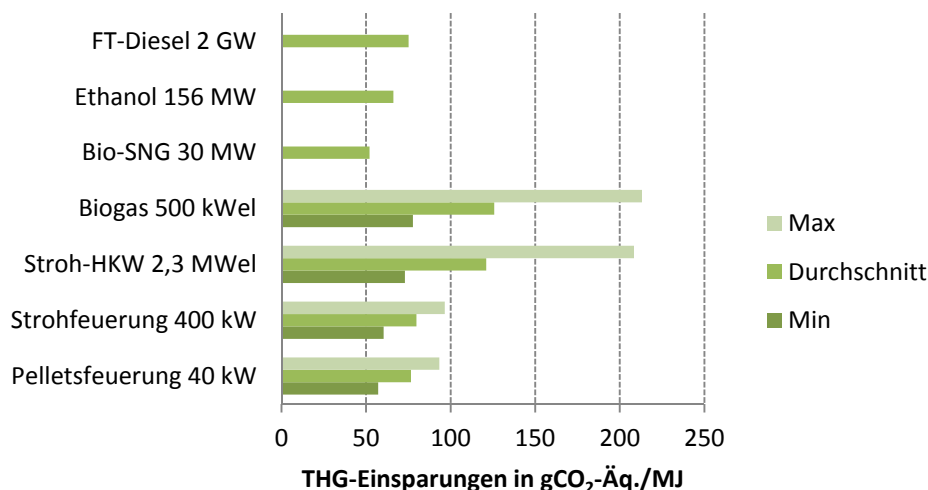


Abbildung 82: THG-Einsparungen für verschiedene Strohnutzungskonzepte im Vergleich zu fossilen Referenzen

Vergleich verschiedener Nutzungsoptionen

Um das in Kapitel 8 diskutierte Thema der Bilanzierung der entgangenen C-Sequestrierung wieder aufzugreifen und in den gesamten Lebenszyklus einzuordnen, wurde abschließend ein Vergleich zwischen der Strohsequestrierung und den verschiedenen energetischen Nutzungsoptionen nach verschiedenen Ansätzen durchgeführt.

Im Speziellen soll die Optionen Verbleib des Strohs auf dem Feld mit der energetische Nutzung von Stroh im Strom-, Kraftstoff-, und Wärmebereich miteinander verglichen werden. Die Nutzengleichheit der Systeme ist in diesem Vergleich allerdings nicht mehr gegeben. Die potenziellen THG-Emissionen werden auf die funktionelle Einheit 1 Tonne Stroh bezogen. In Tabelle 43 sind die Möglichkeiten für verschiedene Nutzungen und die Ansätze zur Bilanzierung dargestellt. In diese Berechnungen gehen die berechneten minimalen und maximalen THG-Emissionen für die verschiedenen Anlagenkonzepte sowie die THG-Emissionen aus den durchschnittlichen fossilen Referenzpfaden ein. Für den Strom/KWK-Pfad steht nur ein das Heizkraftwerk als Referenzwert, das Biogasanlagenkonzept konnte auf Grund des Einsatzes verschiedener Substrate nicht verglichen werden.

In diesem Vergleich wird die Wärme aus KWK-Prozessen energetisch alloziert, damit sich Wärme- und KWK-Anwendungen miteinander vergleichen lassen. Ein MJ Wärme aus einem KWK-Prozess ersetzt in diesem Vergleich die identische Menge an THG-Emissionen wie ein MJ aus einer reinen Wärmeanwendung.

Eine Option der Strohnutzung ist der 100 %ige Verbleib des Strohs auf dem Feld. Wenn die Koeffizienten nach VDLUFA herangezogen werden, können durch die Kohlenstoffsequestrierung zwischen 257-367 kg CO₂-Äq pro Tonne Stroh „eingespart“ werden. Gleichzeitig bedeutet diese Nutzung, dass kein fossiler Energieträger substituiert werden kann. Daher sind im Ergebnis für Option 1 auch die nicht-vermiedenen fossilen THG-Emissionen, die mit einer Tonne Stroh in den verschiedenen Bereichen möglich wären, als THG-Emissionen angerechnet worden. Bei einer Nutzung von Stroh außerhalb des Feldes, verbleibt immer ein Teil des Strohs auf dem Feld, der durch technische Restriktionen nicht geborgen werden kann. In dieser Studie wurde eine durchschnittliche Bergungsrate

von 66 % angenommen. Daher wird in der Option 2 a die Variante berechnet, dass 66 % des Strohs energetisch genutzt wird. Für diesen Teil des Strohs wird die maximal entgangene Sequestrierung als THG-Emission angerechnet. In Variante 2 a wird nur das Überschussstroh geborgen, welches im Durchschnitt 33 % des Strohaufwuchses entspricht. Für diesen Anteil wird wiederum der maximale Strohereproduktionswert genommen und der entgangene Kohlenstoff als Emission angerechnet. Option 3 zeigt die konventionelle Berechnungsvariante, in der entgangene Sequestrierung nicht bilanziert wird.

Tabelle 43: Vergleich verschiedener Nutzungen und methodischer Ansätze

Option	Option 1: Stroh verbleibt zu 100 % auf dem Feld	Option 2 a: Bergbarer Anteil (66%) des Strohs wird energ. genutzt	Option 2 b: Überschussstrohs (33 %) wird energetisch genutzt	Option 3: Bergbarer Anteil (66%) des Strohs wird energ. genutzt
Methodik	Humusbilanz integriert (nach VDLUFA, oberer Wert)			Keine Humusbilanz
Ergebnis (THG-Einsparungen)	Liegenlassen: 257-367 kg CO ₂ -Äq./t Stroh		Substitution fossiler Energie: 305-1501 kg CO ₂ -Äq./t Stroh	
	Kein Kraftstoff: 62 bis - 363 kg CO ₂ -Äq./t Stroh	Kraftstoffe: -27 bis 571 kg CO ₂ -Äq./t Stroh	Kraftstoffe: 137 bis 628 kg CO ₂ -Äq./t Stroh	Kraftstoffe: 224-685 kg CO ₂ -Äq./t Stroh
	Kein Strom/KWK: -1.134 kg CO ₂ -Äq./t Stroh	Strom/KWK: 1.107 kg CO ₂ -Äq./t Stroh	Strom/KWK: 1.237 kg CO ₂ -Äq./t Stroh	Strom/KWK: 1.367 kg CO ₂ -Äq./t Stroh
	Keine Wärme: -731 kg CO ₂ -Äq./t Stroh	Wärme: 563-737 kg CO ₂ -Äq./t Stroh	Wärme: 775-867 kg CO ₂ -Äq./t Stroh	Wärme: 958-997 kg CO ₂ -Äq./t Stroh

Durch den Vergleich der potenziellen Einspareffekte der Sequestrierung, welche sich in einer Bandbreite zwischen 257-367 kg CO₂-Äq./t Stroh bewegen, mit den THG-Einsparungen, die durch die Substitution der fossilen Energieträger möglich wären (305-1501 kg CO₂-Äq./t Stroh) zeigt sich bereits, in welchem Bereich die maximalen Einsparpotenziale liegen. Da die THG-Emissionen, die durch die Bereitstellung des Bioenergieträgers bilanziert worden sind vergleichsweise niedrig waren, kann mit der energetischen Anwendung eine signifikant höhere Einsparung pro Tonne Stroh erreicht werden. In Variante 2 a können bis zu 1.107 kg CO₂-Äq./t durch die Nutzung in einem Heizkraftwerk eingespart werden, wohingegen mit dem Verbleib des Strohs auf dem Feld maximal 62 kg CO₂-Äq./t eingespart werden können.

Aus dem Vergleich geht allerdings auch hervor, dass die energetischen Nutzungen nicht in jedem Fall vorteilhafter sind, sondern dass sich durch den Verbleib des Strohs auf dem Feld ggf. mehr THG-Emissionen einsparen lassen als durch die Nutzung als Kraftstoff.

Deutschlandweites Einsparpotenzial durch die Strohnutzung

Um die Frage zu beantworten, wie viel THG-Emissionen durch die energetische Nutzung des deutschlandweiten Strohpotenzials theoretisch eingespart werden könnten, werden die Ergebnisse aus der THG-Bilanzierung und der Potenzialanalyse miteinander verrechnet. Als Berechnungsgrundlage dienen also die im Projekt entwickelten Anlagen- und die Bereitstellungskonzepte, die wiederum auf mittleren Potenzialzahlen und durchschnittlichen Transportdistanzen basieren. Zudem sind die fossilen Standardreferenzen als Datengrundlage verwendet worden. Für diesen Vergleich wurden weder die entgangene Bodenkohlenstoffsequestrierung noch die entgangene Substitution eines fossilen Energieträgers berücksichtigt.

Wenn die nach VDLUFA (oberer Wert) bilanzierten Mengen von ca. 10 Mio. Tonnen (Frischmasse) Getreidestroh in die in dieser Studie betrachteten Anlagenkonzepte zur Kraftstoffbereitstellung eingehen würden, könnten jährlich zwischen 2,2 – -6,8 Mio. Tonnen CO₂ eingespart werden. Im Wärmebereich wäre eine jährliche Einsparung zwischen 9,5 bis 9,9 Mio. Tonnen CO₂ möglich. Die höchste THG-Einsparung ließe sich mit der Nutzung des Strohs in einem Heizkraftwerk erreichen. Bis zu 13,5 Mio. Tonnen CO₂ könnten pro Jahr eingespart werden. Im Vergleich dazu ist eine THG-Einsparung zwischen 2,5 – -3,6 Mio. Tonnen CO₂/a möglich, wenn das Stroh auf dem Feld liegengelassen wird. Dieser Effekt wäre dauerhaft nur möglich, wenn der Boden Kohlenstoff sequestrieren kann und sich nicht bereits im Bereich einer Sättigung befindet.

9.3 Diskussion

Die hier dargestellten Ergebnisse für THG-Emissionen und THG-Einsparungen verschiedener Strohnutzungspfade sind nicht als absolute Werte für einen bestimmten Konversionspfad zu verstehen, sondern sie repräsentieren beispielhafte Konzepte bzw. beispielhafte Referenzsysteme. Für die Nutzung von Stroh gibt es keine „typische“ Bioenergieanlage mit repräsentativen Anlagendaten sowie Stoff- und Energieströmen. In diesem Sinne müssen auch die Ergebnisse aus der berechneten THG-Gesamteinsparung verstanden werden, für die durchschnittliche Potenzialzahlen, durchschnittliche Referenzsysteme und beispielhaften THG-Einsparungen zu Grunde gelegt worden sind. Eine standortabhängige Bilanzierung kann nicht ersetzt werden.

Die Methodik zur Berechnung der THG-Emissionen und -einsparungen ist über alle Konzepte weitgehend harmonisiert worden, so dass die Wärme-, Strom/KWK- und Kraftstoffpfade einheitlich bilanziert worden sind und daher (eingeschränkt) miteinander verglichen werden können. Die Datengrundlagen für die Bilanzierung der Strohbereitstellung sind für alle Konzepte mit einheitlichen Modulen umgesetzt worden, so dass die Variationen in den Ergebnissen die Auswirkungen von unterschiedlichen Rohstoffbedarfen und Konversionseffizienz deutlich machen.

Im Vergleich zu der Datengrundlage auf der Anbauseite sind die Stoff- und Energieströme für die Anlagenkonzepte tendenziell mit größeren Unsicherheiten behaftet. Für die marktverfügbaren Anlagen ist die Datengrundlage durch die geringere Komplexität der Prozesse und der übersichtlichen Stoff- und Energieströme und durch das Vorhandensein anlagenspezifischen Kennwerte vergleichsweise robust. Die Sachbilanzdaten für den Kraftstoffbereich weisen größere Unsicherheiten auf, denn sie basieren auf Hochrechnungen und Simulationsergebnissen. In den folgenden Bereich sind kaum Mess- und Bilanzdaten verfügbar: Enzymproduktion für den Bioethanolfpfad, Emissionsdaten der Strohverbrennung bzw. Vergasung sowie zum Methanschlupf von Anlagen.

Trotz dieser Unsicherheiten bezüglich der Methodik und Datenbasis lassen sich einige generelle Schlussfolgerungen ableiten, die auf alle hier bilanzierten Konzepte zutreffen:

Es hat sich gezeigt, dass der Prozessschritt, der wesentlich zur THG-Emissionsfreisetzung beiträgt, der Konversionsprozess ist. Während dieser Phase ist die Prozessenergieversorgung in der Regel der entscheidende Parameter für die THG-Bilanz. Die Berechnungen der THG-Emissionen für die zukünftigen Kraftstoffe auf Basis von Stroh zeigen deutlich, welche Auswirkungen die Umstellung einer fossilen Prozessenergieversorgung auf Erneuerbare Energien haben kann. Aus THG-Sicht lässt sich eine Anlage optimieren, indem eine Prozessenergieversorgung auf Basis von Erneuerbaren Energien realisiert wird.

Ein ebenfalls wesentlicher Anteil der Gesamtemissionen ist in dieser Bilanzierung während der Bereitstellungsphase des Strohs und hier im Besonderen durch die Stickstoffkompensationsdüngung aufgetreten. Allerdings wurde in dieser Bilanz pauschal eine mineralische Ausgleichsdüngung angesetzt, die mit hohen Aufwendungen aus der Vorkette belastet ist. In der landwirtschaftlichen Praxis gibt es verschiedene Varianten, wie der Nährstoffentzug ausgeglichen werden kann. Aufgrund der potenziell hohen Wirkung auf die THG-Bilanz (bis ca. 8 gCO₂-Äq./MJ) sollte dieser Parameter jedoch mitbilanziert und geprüft werden, ob die in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie vorgeschlagene Methodik um diesen Aspekt erweitert werden sollte. Ebenso wichtig ist die Überprüfung des Parameters der entgangenen Bodenkohlenstoff-Sequestrierung. Dieser Parameter könnte einen erheblichen Einfluss auf die THG-Bilanz haben. Problematisch ist dabei die Tatsache, dass festgestellt werden müsste, ob ein Boden generell sequestrieren kann oder nicht. Eine methodische Herausforderung ist die Gestaltung der Verteilungsvorschriften für positive Effekte wie Bracheperioden, Wirtschaftsdüngerapplikationen oder Gründüngung.

Für Substrate mit geringer Energiedichte (bestimmte Reststoffe und Abfälle) treten häufig große Transportdistanzen auf, die sich in der Treibhausgasbilanz niederschlagen. In dieser Studie hat sich gezeigt, dass auch in den Konzepten mit Transportdistanzen bis über 100 km keine hohen THG-Emissionen in diesem Prozessschritt aufgetreten sind. Maximal wurden für Transportprozesse 2,24 gCO₂-Äq./MJ bilanziert. Die Limitierung der Einzugsradien für Bioenergieanlagen ist daher eher aus ökonomischer Perspektive gegeben (vgl. Kapitel 6). Trotzdem zeigt sich deutlich, dass durch dezentrale Konzepte (in dieser Studie die 400 KW Strohfeuerungsanlage) die Transport-bezogenen THG-Emissionen geringer ausfallen (0,04 gCO₂-Äq./MJ).

Bezüglich des Vergleichs der Konzepte hat sich gezeigt, dass die höchsten THG-Einsparungen mit den KWK-Pfaden erreicht werden können. Bis zu 126 gCO₂-Äq. pro MJ könnten im Vergleich mit dem durchschnittlichen deutschen Strommix eingespart werden. In dieser Studie standen die Anlagenkonzepte Biogas und Heizkraftwerk repräsentativ für diesen Pfad. Der deutschlandweite Vergleich zeigt, welches enorme Einsparpotenzial durch die Kombination der Mengen des nachhaltigen Strohpotenzials und der vorteilhaftesten Nutzungspfade erreicht werden könnten.

10 Fazit

Aus dem Blickwinkel der Bioenergie ist Getreidestroh einer der wichtigsten landwirtschaftlichen Reststoffarten, da es in sehr hohen Mengen produziert wird, bisher weitgehend ungenutzt und flexibel einsetzbar ist. In Deutschland steht ein erhebliches Strohpotenzial für die stoffliche und energetische Verwertung zur Verfügung. Stroh darf jedoch nur bei ausgeglichener Humusbilanz aus dem Kohlenstoffkreislauf entnommen werden. Die einzige fachlich begründete Methode zur Bestimmung der Menge des aus dem Kohlenstoffkreislauf der landwirtschaftlichen Nutzfläche zu entnehmenden Strohs ist die „Humusbilanzierung“. Da es bezüglich der Bilanzierungsmethodik Unsicherheiten und bezüglich der Reproduktionskoeffizienten Diskussionsbedarf gibt, wurden in dieser Studie drei unterschiedliche Bilanzierungsansätze verwendet.

Das **nachhaltige Strohpotenzial** Deutschlands beträgt in Abhängigkeit von der verwendeten Methode zwischen 8 bis 13 Mio. t_{FM}/a . Diese Zahlen entsprechen zwischen 27 bis 43 % der aufgewachsenen Getreidestrohmenge oder des so genannten theoretischen Strohpotenzials. In dieser Studie konnten sowohl Regionen mit hohen Strohüberschüssen als auch Landkreise, in denen sich aufgrund der Fruchtfolge die energetische Strohnutzung nicht eignet, eindeutig identifiziert werden. Für einige Regionen liefern die Bilanzierungen stabile und für andere Regionen variierende Ergebnisse. Alle Methoden zeigen, dass die größten Strohpotenziale bei allen drei verwendeten Methoden im Osten Schleswig-Holsteins und im Nordwesten Mecklenburg-Vorpommerns vorzufinden sind. Ebenfalls hohe Strohpotenziale sind im nördlichen Teil Nordrhein-Westfalens bis hinein ins angrenzende Niedersachsen vorhanden. Drastische Unterschiede zwischen den Methoden zeigen sich für weite Gebiete Sachsens und Sachsen-Anhalts. Nach beiden VDLUFA-Methoden werden dort hohe bis sehr hohe Potenziale ausgewiesen, wohingegen nach der dynamischen HE-Methode kaum bzw. kein Strohpotenzial vorhanden ist, da dieses zur Humusproduktion notwendig ist.

Aus **technisch-ökonomischer Perspektive** ist die Strohnutzung nur punktuell erprobt. Die ökonomische Analyse hat gezeigt, dass alle untersuchten Konzepte höhere Gestehungskosten als die konventionelle Bioenergiebereitstellung und die fossile Energiebereitstellung aufweisen. Unter anderem tragen die ermittelten Rohstoffbereitstellungskosten frei Anlage, die zwischen 63 und 92,5 €/t FM Stroh liegen, dazu bei, dass die Gesamtkosten höher ausfallen. Weiterhin spielen die Investitionskosten eine sehr große Rolle bei allen Konzepten. Die Gestehungskosten liegen zwischen ca. 9 und 15 ct/kWh für die Wärmekonzepte, um 25 ct/kWh für die Strom/KWK-Konzepte und zwischen ca. 15 und 27 ct/kWh für die Kraftstoffe. Kostensenkungspotenziale sind am wahrscheinlichsten durch Lernkurven in der Anlagentechnik bei vermehrter Marktdurchdringung zu erzielen. Dies betrifft vor allem die technisch komplexeren Anlagen. Da es sich bei der energetischen Nutzung von Stroh um einen neuen Markt handelt, sind hier Aussagen über die Preisentwicklung nur schwer möglich.

Neben diesen betriebswirtschaftlichen Betrachtungen erlaubt die Analyse der THG-Vermeidungskosten eine volkswirtschaftliche Sicht. Die aus dieser Perspektive vorteilhaftesten Anlagen sind die Wärmekonzepte, welche in dem analysierten Referenzspektrum die niedrigsten Werte aufweisen. So liegen im Vergleich mit einem durchschnittlichen Wärmemix aus Erdgas/Erdöl die THG-Vermeidungskosten der Pelletsfeuerung bei ca. 68 €/t CO_2 -Äq sowie die der Strohfuehrung sogar im negativen Bereich mit ca. -131 €/t CO_2 -Äq, da hier die Gestehungskosten der Referenzen höher als die

der Strohfeuerung sind. Mit steigendem technischen Komplexitätsgrad sowie vermehrtem Rohstoffbedarf der Anlagenkonzepte erhöhen sich die THG-Vermeidungskosten erheblich.

Aus Sicht der **Treibhausgasbilanzierung** ergaben alle untersuchten Anwendungen vergleichsweise niedrige THG-Emissionen, die in einer Bandbreite zwischen ca. 8 und 40 gCO₂-Äq./MJ liegen. Im Vergleich zu durchschnittlichen fossilen Referenzen können THG-Einsparungen in einem Bereich zwischen 52 und 126 gCO₂-Äq./MJ erreicht werden, wobei die KWK-Konzepte das größte Potenzial zur Treibhausgaseinsparung aufweisen. Durch die Substitution fossiler Energie kann in der Regel eine höhere CO₂-Einsparung erreicht werden, als durch die Sequestrierung des Strohs möglich ist. In einem Fall zeigte sich jedoch, dass die Optionen Verbleib des Strohs auf dem Feld im Vergleich zur Kraftstoffnutzung eine vorteilhaftere THG-Bilanz bewirken. Diese Erkenntnis gilt unter der Voraussetzung, dass der Boden Kohlenstoff als Humus sequestrieren kann und sich nicht bereits im Bereich einer Sättigung befindet. Durch die Nutzung des nachhaltigen Strohpotenzials könnte in Deutschland eine jährliche Einsparung von bis zu 13,5 Mio. Tonnen CO₂ erreicht werden.

Die absolute Gegenüberstellung der THG-Einsparungen zu den THG-Vermeidungskosten verdeutlicht noch einmal die Aussagen zu den THG-Einsparungen und den damit verbundenen Kosten. Liegen die beispielhaften Wärmepfade (jeweils gegen den Wärmemix gerechnet), bei den Vermeidungskosten sehr niedrig, so sind die erzielbaren THG-Einsparungen eher im Mittelfeld einzuordnen. Die KWK-Pfade weisen die höchste THG-Einsparung auf, aber auch höhere Kosten. Die Kraftstoffpfade kombinieren die geringsten THG-Einsparungen mit den höchsten Kosten.

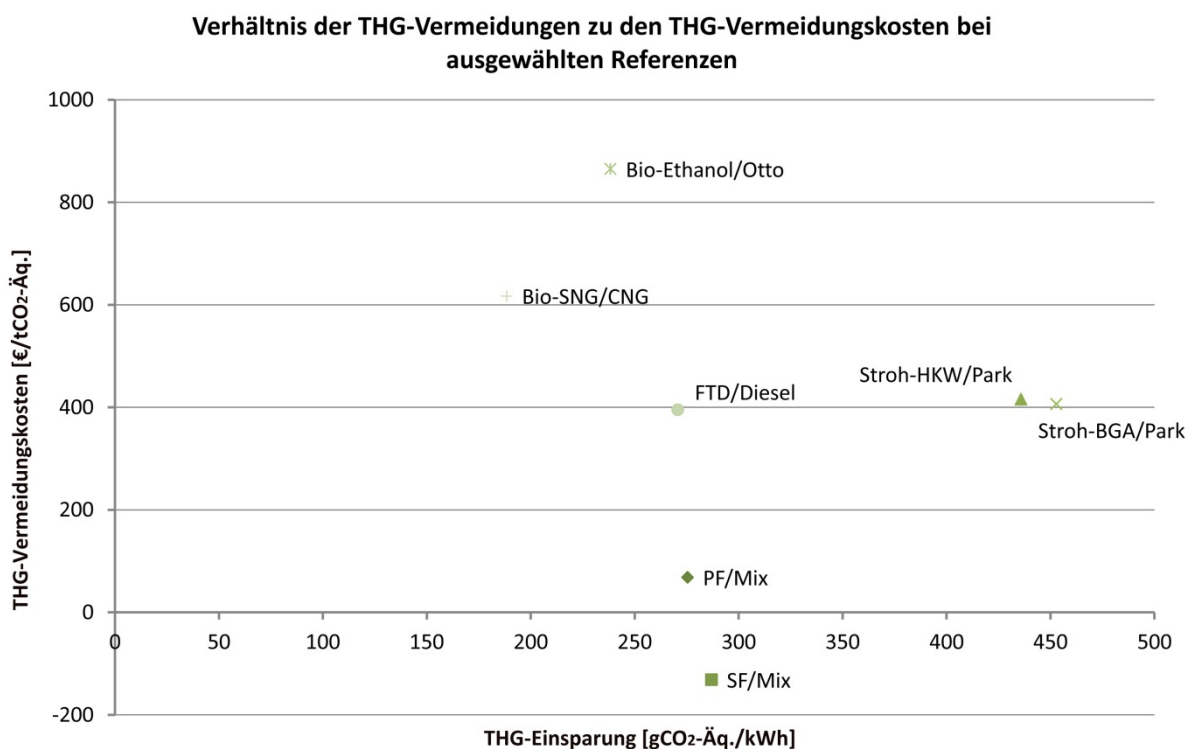


Abbildung 83: Verhältnis der THG-Vermeidungen zu den THG-Vermeidungskosten bei ausgewählten Referenzen. (BGA: Biogasanlage; CNG: Compressed Natural Gas; FTD: Fischer-Tropsch-Diesel ; HKW: Heizkraftwerk; Mix : durchschnittlicher Wärmemix in Deutschland ; Otto: Ottokraftstoff; Park: Durchschnitt des Kraftwerksparkes in Deutschland; PF: Pelletsfeuerung; SF: Strohfeuerung; SNG: Synthetic Natural Gas)

10.1 Empfehlungen zur Verwertung von Stroh aus acker- und pflanzenbaulichen Gesichtspunkten

Aus acker- und pflanzenbaulichen Gesichtspunkten sollte die energetische Verwertung von Stroh vorrangig in Biogasanlagen bzw. in Anlagen zur Ethanolherstellung erfolgen, da bei diesen Konversionspfaden der Stickstoff – und ein erheblicher Anteil des Kohlenstoffs – im acker- und pflanzenbaulichen Kreislauf verbleiben kann. Da sich diese Verfahren noch im Entwicklungs- bzw. Demonstrationsstadium befinden kann Stroh zwischenzeitlich thermisch genutzt werden, wenn die Aschen in den landwirtschaftlichen Kreislauf mit einer möglichst hohen Nährstoffverfügbarkeit zurückgeführt werden. Heizkraftwerke bzw. Vergasungsanlagen mit einem hohen Rohstoffbedarf sind vorrangig in Regionen zu etablieren, in denen ausreichend Stroh zur Verfügung steht.

Die Strohmenge variiert in den Regionen und Betrieben in Abhängigkeit von den natürlichen Standortbedingungen (Boden und Klima), der Fruchtfolge und dem Tierbesatz erheblich. Zur Ermittlung der aus dem Kreislauf entnehmbaren Strohmenge sind bei konkreten Projekten schlagbezogene Humusbilanzen zu erstellen.

Zur Steigerung des verfügbaren Potenzials ist über den Anbau humusmehrender Fruchtarten, z. B. mehrjähriges Ackerfutter, Zwischenfrüchte, bei gleichzeitiger Auflockerung der Fruchtfolgen mit positiven Aspekten für Biodiversität sowie Erosions- und Klimaschutz, möglich. Die zusätzlichen Kosten belaufen sich nach Hanff (2010) auf 16 (Ackergrasanbau) bis 34 (Zwischenfruchtanbau) Euro/t Stroh. Allerdings ist die Veränderung der Fruchtfolgen nicht unbedingt als flächenneutral zu betrachten, da die ausgetauschten Früchte nicht unbedingt eine Nutzungsäquivalenz zeigen. Der Aspekt möglicher Landnutzungsveränderungen durch Fruchtfolgeumgestaltung wurde in dieser Arbeit aber nicht weiter untersucht.

10.1.1 Handlungsbedarf für Wissenschaft und Forschung

Es ist dringend eine kurzfristige Empfehlung zur anzuwendenden Methodik (VDLUFA oder HE-Methode) für die landwirtschaftliche Praxis zu erarbeiten.

Um die Treffsicherheit der Humusbilanzen zu erhöhen ist es notwendig, die Datenbasis für die Eingangsgrößen zu präzisieren. Das Korn-Stroh-Verhältnis als wesentliche Größe zur Bestimmung des Strohertrages ist extrem abhängig von der Fruchtart und vom Standort (Boden und Witterung). Daher müssen die fruchtartenspezifischen Verhältnisse (Düngeverordnung) mit standortspezifischen Korrekturfaktoren untersetzt werden. Die Veränderung des Korn-Stroh-Verhältnisses über alle Druschfrüchte um 0,1 zieht eine Änderung des Strohpotenzials um ca. 4 Mio. t_{FM}/a nach sich. Dieses Ergebnis verdeutlicht die Sensitivität dieses Faktors.

Die Erfassung der Stroherträge aus den in den Ländern durchgeführten Sortenversuchen und den Wertprüfungen des Bundessortenamtes könnten einen wesentlichen Beitrag zur Präzisierung der sorten- und standortabhängigen Stroherträge liefern.

Die Humuswirkung von Gärresten bei unterschiedlicher Zusammensetzung der Rohstoffe zur Biogaserzeugung ist ungeklärt. Eine kurzfristige Ermittlung der Humusreproduktionskoeffizienten ist dringend erforderlich. Auch bedarf es einer abschließenden Klärung bzw. Festlegung des

Reproduktionskoeffizienten für Stroh. Die Spanne zwischen 70 und 110 kg Humus C beeinflusst wesentlich das Ergebnis der Humusbilanzierung.

Dringender Handlungsbedarf besteht zu dem in der Erfassung des aktuellen Bodenzustands hinsichtlich C-Sättigung.

Die Aufstallung bzw. der Weidegang haben einen enormen Einfluss auf die Art und die Menge des anfallenden tierischen Düngers und damit auf den Humusersatz. Eine Verbesserung der Datenbasis kann die Ergebnisse weiter absichern.

Eine mittelfristig realisierbare Maßnahme zur Erhöhung der Potenziale ist durch eine Züchtung auf „hohe Ganzpflanzenerträge“ möglich. Dazu sind standfeste Getreidesorten mit einem weiten Korn-Stroh-Verhältnis anzustreben. Allerdings sollten hohe Qualitäten, gepaart mit hohen Kornerträgen, weiter Vorrang haben. Auch sind Züchtungslinien mit Low-Input-Charakter, insbesondere bei der Nährstoff- und Wassereffizienz stärker zu berücksichtigen.

Die technische Bergbarkeit des Strohs liegt bei ca. zwei Drittel der aufgewachsenen Menge. Um eine gute Einarbeitung und Umsetzung des Strohs vor allem bei der in der landwirtschaftlichen Praxis weit verbreiteten Minimalbodenbearbeitung zu gewährleisten, wurden in der Vergangenheit Druschprinzipien favorisiert die das Stroh stark zerkleinert haben. Mittel- und langfristig ist über Drusch- bzw. Bergeprinzipien nachzudenken, die es ermöglichen einen möglichst großen Anteil des aufgewachsenen Strohs zu erfassen.

Die Untersuchung weiterer ökologischer Nachhaltigkeitskriterien, besonders die Auswirkungen des Strohentzugs auf die Nährstoffverfügbarkeit, Erosionsgefährdung, den Bodenwasserhaushalt sowie Biodiversitätswirkungen ist empfehlenswert.

10.1.2 Handlungsempfehlungen für die Politik

Bei der Ausweisung der potenziellen Standorte zur Strohverwertung ist in Regionalplänen bzw. den Planfeststellungsverfahren auf Grundlage der für die zur Verfügung stehende Strohmenge die Erstellung der Humusbilanzen zu fordern.

Bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Halmgutaschen sind die im Rahmen der Düngemittelverordnung geltenden Restriktionen zu beachten bzw. zu überprüfen:

- Die Nährstoffe in den Aschen müssen in pflanzenverfügbarer und staubgebundener Form vorliegen (keine Schlacke).
- Die Anwendung von Aschen (als Rein- oder Mischkomponente) kann generell nur erfolgen, wenn die Asche einem gelisteten Düngemitteltyp zugeordnet werden kann. Dabei sind je nach Zuordnung zu dem jeweiligen Düngemitteltyp bestimmte Mindestnährstoffgehalte bzw. Schadstofffreiheiten zu gewährleisten. In der Regel wird nur der Typ „Kalkdünger“ erreicht. Dieser sollte nach guter fachlicher Praxis nur zur pH-Wert-Regulierung eingesetzt werden.

10.2 Empfehlungen zur Verwertung von Stroh aus ökonomischer Perspektive und Sicht der THG-Bilanzierung

Wenn das Kriterium THG-Optimierung im Vordergrund einer Bewertung steht, sollte die Nutzung von Stroh in KWK-Anlagen priorisiert werden, denn in diesem Bereich ist das größte Potenzial zur Treibhausgaseinsparung vorhanden. In dieser Studie repräsentierten ein Strohheizkraftwerk und eine Biogasanlage diesen Pfad. Auch in den Wärmepfaden waren nach allen Bilanzierungsmethoden hohe THG-Einsparpotenziale zu erzielen. Wenn sich der Bilanzierungsansatz der Berücksichtigung der Bodenkohlenstoffeffekte durchsetzt, könnten sich die Konversionspfade als vorteilhaft darstellen, die einen bestimmten Anteil des Kohlenstoffs im acker- und pflanzenbaulichen Kreislauf zurückführen (Biogas- oder Bioethanolfpade). Dies gilt immer mit der Einschränkung, dass der Boden Kohlenstoff als Humus sequestrieren kann und sich nicht bereits im Bereich einer Sättigung befindet.

Hinsichtlich der Optimierung der THG-Bilanz für die energetische Strohnutzung sind eine Prozessenergieversorgung, die auf erneuerbaren Energien beruht und der Einsatz von effizienten Technologien die entscheidenden Faktoren. Für die Verwertung von Stroh könnte sich auch der Verzicht einer mineralischen Kompensationsdüngung positiv auf die THG-Bilanz auswirken. Aus Sicht der Treibhausgasbilanz ist eine Optimierung von Logistikketten und die Realisierung kurzer Transportwege prinzipiell zu befürworten. Für die in dieser Studie untersuchten Pfade ist das Optimierungspotenzial allerdings vergleichsweise gering, denn die THG-Emissionen aus den Transportprozessen wiesen in der Regel nur einen geringen Anteil an den Gesamtemissionen auf.

Aus ökonomischer Perspektive lassen sich anhand der Gestehungskosten keine direkten Empfehlungen zur zu priorisierenden Verwertung von Stroh ableiten. Es muss sich zeigen, inwieweit die hohen Gestehungskosten durch einen eventuellen im Vergleich zu den Referenzen höheren Marktwert der Produkte kompensiert werden können. Die Ergebnisse der Varianten zur ökonomischen Optimierung von Bereitstellungsketten zeigten, dass das entscheidende Kostensenkungspotenzial in der Anlagentechnik erwartet wird. Es ist aber wegen des hohen F&E-Grades nicht sicher abschätzbar. Aus Sicht der THG-Vermeidungskosten stellen sich die Wärmekonzepte als die volkswirtschaftlich günstigste Alternative dar.

10.2.1 Handlungsbedarf für Wissenschaft und Forschung

Die Technologien zur energetischen Strohnutzung sind teilweise nur auf dem Papier vorhanden und müssen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit erprobt werden. Das gilt vor allem für Verfahren mit hoher „Düngewirkung“ wie Ethanol- und Biogasanlagen. Im Zuge einer Demonstration muss auch die Datenbasis für Sachbilanzdaten erweitert und Emissionsdaten in den folgenden Bereichen präzisiert werden: Methanschlupf von Anlagen, THG-Emissionen aus der Verbrennung von Stroh und THG-Emissionen aus der Enzymproduktion.

Auch wenn hier nicht dezidiert untersucht, besteht F&E-Bedarf für die kostengünstige Mitnutzung von Stroh in Mischpellets, Mischfeuerungen oder als Cosubstrat in Biogasanlagen.

Es besteht zudem weiterer Forschungsbedarf bezüglich der potenziellen Sequestrierungseffekte von landwirtschaftlichen Reststoffen und deren Integration in eine THG-Bilanz. Ebenso wie im Bereich der Humusbilanzierung eine kurzfristige Empfehlung zur anzuwendenden Methodik (VDLUFÄ oder HE-Methode) für die landwirtschaftliche Praxis erarbeitet werden muss, muss auch bezüglich der

Treibhausgasbilanzierung entschieden werden, wie mit den potenziellen Sequestrierungseffekten von landwirtschaftlichen Reststoffen verfahren werden soll.

10.2.2 Handlungsempfehlungen für die Politik

Die Ergebnisse aus der Potenzialanalysen und THG-Bilanzen haben gezeigt, dass sehr große Einsparpotenziale durch die energetische Nutzung von Stroh möglich sind. Bis zu 13,5 Mio. Tonnen CO₂ könnten pro Jahr durch die energetische Nutzung von Getreidestroh eingespart werden. Wenn THG-Einsparung/MJ die höchste Priorität eingeräumt wird, dann sind HKW und Biogasanlagen auf Basis von Stroh die zu favorisierende Option. Aus der volkswirtschaftlichen Perspektive zeichnet sich bezüglich der THG-Vermeidungskosten der Wärmepfade eine relative Vorteilhaftigkeit ab. Für die Kraftstoffpfade zeigt sich aufgrund der hohen THG-Vermeidungskosten eher eine Nischenanwendung ab. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehrssektor momentan die einzige Alternative zur Nutzung fossiler Kraftstoffe darstellt. Für bestimmte Bereiche des Verkehrssektors (z. B. den Flugverkehr) werden sie auch langfristig die einzige Alternative darstellen. Diese Aspekte lassen sich nur schwer mit dem Bewertungskriterium THG-Bilanz fassen.

Aus ökonomischer Sicht ist es sinnvoll, durch weitere F&E-Maßnahmen die Anlagentechnik zu verbessern, um hier vor allem hohe Jahresvolllaststunden und eine Senkung der Investitionskosten zu erreichen. Eine stärkere Unterstützung der Markteinführung der bereits weiter entwickelten Wärmekonzepte würde zudem dem Markt für Stroh wichtige Impulse zur vermehrten energetischen Bereitstellung sowie zur Entwicklung und Transparenz von Marktpreisen geben, welche für eine Planung von weiteren F&E- sowie Markteinführungsprojekten relevant sind. Entsprechende Anreize zur energetischen Nutzung von Stroh bestehen bereits durch das EEG im Strom- und das Double Counting im Kraftstoffbereich, welche nicht am Markt auszugleichende Mehrkosten zumindest teilweise kompensieren sollen. Da diese Maßnahmen erst kürzlich eingeführt wurden, muss sich bei ihrer kommenden Entfaltung zeigen, inwieweit diese die Strohnutzung fördern. Zur Realisierung der negativen THG-Vermeidungskosten ist es zu empfehlen, den Einsatz von Strohfeuerungen zu etablieren. Im Vorfeld getätigte Untersuchungen müssen zeigen, welche absoluten Absatzzahlen zu erreichen sind sowie welche Technologien unter den Aspekten Kosten und THG-Einsparungen ersetzt werden können und sollten.

Es besteht Handlungsbedarf bezüglich der Unterstützung der Technologieerprobung und Verwirklichung von Demonstrationsprojekten von Biogasanlagen und Heizkraftwerken auf Basis von Stroh sowie bezüglich der Etablierung von Strohlogistikkonzepten und Aufbereitungsverfahren.

Um die thermische Verwertung von Halmgütern zu fördern, ist eine Gleichbehandlung in der Bundesimmissionsschutzgesetzgebung von Stroh und Holz im Leistungsbereich von 100 – 1000 kW anzustreben.

Zur Unterstützung der Einführung von Strohheizwerken und Strohheizkraftwerken in die Praxis sind Pilot- und Demonstrationsvorhaben bzw. ein Marktanzreizprogramm erforderlich.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Struktur des Projektes	3
Abbildung 2:	Anfall von primären und sekundären landwirtschaftlichen Reststoffen in Anlehnung an [11]	5
Abbildung 3:	Aufkommen landwirtschaftlicher Reststoffe (Mittelwert 1999-2007, eigene Berechnung).....	8
Abbildung 4:	Technisches Brennstoffpotenzial von Stroh in Deutschland; Literaturvergleich basierend auf [21][22][23][24][25][17]	10
Abbildung 5:	Emissionsschutzrechtliche Bestimmungen für Feuerungsanlagen	15
Abbildung 6:	Beziehungen zwischen der Masse an Ernte- und Wurzelrückständen (EWR) ausgewählter Fruchtarten und dem Gehalt des Bodens an umsetzbaren Kohlenstoff (Cums) im Durchschnitt von 22 Dauerfeldversuchen (Laufzeit der Versuche 20 –100 Jahre) [55].	20
Abbildung 7:	Schematische Darstellung zur Berechnung der Humusbilanzsalden in Humus-C [55].	21
Abbildung 8:	Standortbedingungen und Bewirtschaftungsstrukturen der Referenzkreise	28
Abbildung 9:	Flächenanteile nach Fruchtartengruppen in den Bundesländern im Mittel der Jahre 1999, 2003 und 2007 (%) [61][62]	29
Abbildung 10:	Beziehung zwischen Gesamt-Humusbedarf und Anteil von Kartoffel und Rübe in der Fruchtfolge.....	30
Abbildung 11:	Verteilung der Strohmenen in Deutschland	31
Abbildung 12:	Verteilung der Humussalden in Gruppen (Gruppengröße 100 kg Humus C), n = 397..	34
Abbildung 13:	Humussalden auf Landkreisebene nach verschiedenen Bilanzmethoden	36
Abbildung 14:	Anteil der organischen Dünger an der Humusreproduktion für die Bundesländer in % bei einer Humusreproduktion von 100 kg Humus C je t Stroh.....	37
Abbildung 15:	Nachhaltiges Strohpotenzial nach verschiedenen Humusbilanzmethoden (Mittelwert 1999-2007).....	38
Abbildung 16:	Ergebnisse der Szenarienrechnungen zum Getreidestrohpotential in Mio. t _{FM}	40
Abbildung 17:	Änderung der Humussalden in den Referenzkreisen bei gesteigerten Raps- und Weizenanbau.....	41
Abbildung 18:	Auswirkungen eines erweiterten Raps- und Weizenanbaus auf berechnete Strohpotenziale	42
Abbildung 19:	Auswirkung erhöhter Biogaserzeugung durch erweiterten Anbau von Silomais und GPS auf Humussalden	42
Abbildung 20:	Veränderungen der Strohpotenziale bei Ausweitung des Anbaus von Silomais und GPS	43
Abbildung 21:	Auswirkung eines verstärkten Anbaus von Luzerne und Klee auf die Humusbilanz....	43
Abbildung 22:	Änderungen in den Strohpotenzialen bei erhöhtem Luzerne- und Kleeanbau.....	44
Abbildung 23:	Auswirkungen einer verstärkten Etablierung von Kurzumtriebsplantagen auf den Humussaldo.....	44
Abbildung 24:	Auswirkung einer verstärkten Etablierung von Kurzumtriebsplantagen auf bestehende Strohpotenziale	45

Abbildung 25:	Veränderter Strohaufwuchs und abweichendes Strohpotential im Vergleich des Jahres 2003 und dem Durchschnitt der Jahre 1999, 2003 und 2007 (*aufgrund von Gebietsreformen sind die Ertragsdaten in 7 Kreisen Landesmittelwerte).....	46
Abbildung 26:	Auswirkung veränderter Humusreproduktion von Stroh auf die Humusbilanz (links) und das Getreidestrohpotenzial (rechts) nach VDLUFA unterer und oberer Wert im Landkreis Sömmerda	47
Abbildung 27:	Einfluss des Viehbesatzes auf die Zusammensetzung der Humusreproduktion und des Strohpotenzials.....	48
Abbildung 28:	Schematischer Aufbau und zugrundeliegende Informationen der Modellierung mit BETHY/DLR	57
Abbildung 29:	Bestimmung des Strohpotenzials aus modellierter Nettoprimärproduktion (Modell: BETHY/DLR, Auflösung 1 km ²) und transformierten statistischen Daten (Ertrag und Fläche auf Landkreisebene) (Quelle: eigene Darstellung).....	60
Abbildung 30:	Kartographische Darstellung der Strohpotenziale in den vier Modellkreisen für das Jahr 2007.....	62
Abbildung 31:	Strohpotenziale im Landkreis Uecker-Randow im zeitlichen Verlauf (2000 – 2007)...	63
Abbildung 32:	Elemente einer Bereitstellungskette	66
Abbildung 33:	Strohbergung.....	68
Abbildung 34:	Schema der räumlichen Struktur des Stroheinzugsgebiets einer Konversionsanlage [96]	72
Abbildung 35:	Übersicht über die verschiedenen Prozesskettenelemente	74
Abbildung 36:	Zusammensetzung der Bereitstellungskette am Beispiel des Anlagenkonzeptes zum Heizkraftwerk	75
Abbildung 37:	Schematische Darstellung der Strohpelletieranlage (FSP=Frischsubstanz Pellets).....	81
Abbildung 38:	Schematische Darstellung des Pelletskessels.....	82
Abbildung 39:	Verfahrensschema Strohfeuerungsanlage	83
Abbildung 40:	Verfahrensschema Strohheizkraftwerk	84
Abbildung 41:	Verfahrensschema Biogasgewinnung	85
Abbildung 42:	Verfahrensschema Bio-SNG.....	87
Abbildung 43:	Verfahrensschema Ethanolproduktion.....	88
Abbildung 44:	Verfahrensschema FT-Diesel Produktion.....	89
Abbildung 45:	Berechnung der Bergungskosten bzw. Preiskalkulationen verschiedener Autoren [110] [105][111][112][113].....	96
Abbildung 46:	Beziehung zwischen Zeitbedarf beim Strohpressen mit Quaderballenpresse und Schlaggröße und Maschinenkosten (Abschreibung, Zinsansatz, Versicherung, Reparaturen und Betriebsstoffe) und Schlaggröße bei einem Strohertrag von 4 t und einem Schwadabstand von 7m [107]	97
Abbildung 47:	Index der Einkaufspreise für landwirtschaftliche Betriebsmittel (ohne Umsatzsteuer) 2005 - 2010 [114].....	98
Abbildung 48:	Übersicht zur Methodik der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Bioenergieanlagen .101	
Abbildung 49:	Strohbereitstellungskosten der einzelnen Konversionspfade für die Logistikoptionen Basis und optimiert (Bezugsjahr 2010).....	105

Abbildung 50:	Gestehungskosten der Pelletsfeuerung 40 kW, der fossilen sowie der biogenen Referenz (Eingesetzte Biomasse bei Anlage Biomasse 25 - 50 kW: Holz; Kosten mit Bezugsjahr 2010)	108
Abbildung 51:	Sensitivitätsanalyse der Pelletsfeuerung (Kosten mit Bezugsjahr 2010)	109
Abbildung 52:	Gestehungskosten der Strohfeuerung 400 kW, der fossilen sowie der biogenen Referenz (Eingesetzte Biomasse bei Anlage Biomasse 50 – 500 kW: Holz; Kosten mit Bezugsjahr 2010)	110
Abbildung 53:	Sensitivitätsanalyse der Strohfeuerung (Kosten mit Bezugsjahr 2010)	111
Abbildung 54:	THG-Vermeidungskosten der Wärmepfade (Kosten auf Basis 2010)	112
Abbildung 55:	Gestehungskosten des Stroh-HKW 2,3 MW, der fossilen sowie der biogenen Referenz Bilanzierung der bereitstellungsbedingten Treibhausgasemissionen (Eingesetzte Biomasse Festbrennstoff-KWK: Holz; Kosten mit Bezugsjahr 2010)	115
Abbildung 56:	Sensitivitätsanalyse des Stroh-HKW 2,3 MW _{el} (Kosten mit Bezugsjahr 2010)	116
Abbildung 57:	Gestehungskosten der Biogasanlage sowie der Referenzen (Substratmix bei Biogas 500 kW _{el} : Weizenstrohsilage, Rindergülle, Klee-/Weidelgrassilage; Kosten mit Bezugsjahr 2010)	117
Abbildung 58:	Sensitivitätsanalyse der Biogasanlage (Kosten mit Bezugsjahr 2010)	118
Abbildung 59:	THG-Vermeidungskosten der KWK-Pfade (Kosten mit Bezugsjahr 2010)	119
Abbildung 60:	Gestehungskosten der Bio-SNG-Anlage sowie der Referenzen (Erdgas-Grenzübergangspreis inkl. vermiedener Netznutzungsentgelte; Kosten mit Bezugsjahr 2010)	121
Abbildung 61:	Sensitivitäten der Bio-SNG-Anlage (Kosten mit Bezugsjahr 2010)	122
Abbildung 62:	Gestehungskosten der FT-Diesel-Anlage sowie der Referenzen (Kosten mit Bezugsjahr 2010)	123
Abbildung 63:	Sensitivitäten der FT-Diesel-Anlage (Kosten mit Bezugsjahr 2010)	124
Abbildung 64:	Gestehungskosten der Ethanolanlage sowie der Referenzen Kosten mit Bezugsjahr 2010)	125
Abbildung 65:	Sensitivitäten der Ethanol-Anlage (Kosten mit Bezugsjahr 2010)	126
Abbildung 66:	THG-Vermeidungskosten der Kraftstoffpfade (Kosten mit Bezugsjahr 2010)	127
Abbildung 67:	Kohlenstoffkreislauf im Getreideanbau mit und ohne Strohentnahme	131
Abbildung 68:	Ertrag an Weizenkörnern und an Weizenstroh von 90 ha Anbaufläche eines Beispielbetriebs bei einer ausgeglichenen Humusbilanz	140
Abbildung 69:	Vergleich der THG-Bilanzen von Weizenkörnern und Weizenstroh für die Einbeziehung einer Humusbilanz nach VDLUFAo. HB = Humusbilanz, SN = Strohnutzung	141
Abbildung 70:	Vergleich der Stroherträge auf Basis der einzelnen Humusbilanzmethoden	148
Abbildung 71:	Vergleich der Treibhausgasemissionen für die einzelnen Fruchtfolge-Varianten auf Basis der drei betrachteten Humusbilanzmethoden	150
Abbildung 72:	Bereitstellungsbedingte Treibhausgasemissionen (gemittelt für die Fruchtfolge) für die Varianten des Beispielbetriebs mit Berücksichtigung der Humusbilanzierung (VDLUFAo)	150
Abbildung 73:	Bereitstellungsbedingte Treibhausgasemissionen für zwei verschiedene Bergungsarten – Rundballen und Quaderballen	151

Abbildung 74:	Bestandteile einer Ökobilanz nach ISO 14040 und 14044	155
Abbildung 75:	Übersicht über die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzierung für verschiedene Strohnutzungskonzepte	162
Abbildung 76:	THG-Emissionen der Wärmebereitstellung.....	163
Abbildung 77:	THG-Emissionen der biogenen und fossilen Wärmebereitstellung.....	164
Abbildung 78:	THG-Emissionen der Konzepte zur Strom/KWK-Bereitstellung.....	165
Abbildung 79:	THG-Emissionen der Konzepte zur Strom/KWK-Bereitstellung und der fossilen Referenzen	166
Abbildung 80:	THG-Emissionen der Konzepte zur Kraftstoffproduktion.....	167
Abbildung 81:	THG-Emissionen der Konzepte zur Kraftstoff-Bereitstellung und der fossilen Referenzen	169
Abbildung 82:	THG-Einsparungen für verschiedene Strohnutzungskonzepte im Vergleich zu fossilen Referenzen	170
Abbildung 83:	Verhältnis der THG-Vermeidungen zu den THG-Vermeidungskosten bei ausgewählten Referenzen. (BGA: Biogasanlage; CNG: Compressed Natural Gas; FTD: Fischer-Tropsch-Diesel; HKW: Heizkraftwerk; Mix: durchschnittlicher Wärmemix in Deutschland; Otto: Ottokraftstoff; Park: Durchschnitt des Kraftwerksparkes in Deutschland; PF: Pelletsfeuerung; SF: Strohfeuerung; SNG: Synthetic Natural Gas)	175

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufkommen und Nutzung verschiedener landwirtschaftlicher Reststoffarten, Mittelwert 1999-2007 (eigene Berechnung).....	7
Tabelle 2: Grenzwerte TA Luft	15
Tabelle 3: Emissionsbegrenzung für Heizkessel nach 1. BImSchV.....	16
Tabelle 4: Bilanzklassen zur Bewertung der Humussalden [58].....	22
Tabelle 5: Eingangsdaten für die Humusbilanzierung.....	24
Tabelle 6: Tierzahlen und Tierbesatz in den Bundesländern [61][64], (landwirtschaftliche Fläche (LF)	32
Tabelle 7: Anfall organischer Dünger in den Bundesländern (eigene Berechnungen, [66]).....	33
Tabelle 8: Statistische Maßzahlen der Humusbilanzen (Getreidefläche (GF).....	35
Tabelle 9: Statistische Maßzahlen der Strohpotenziale	39
Tabelle 10: Getreidestrohaufwuchs und -potenzial in den einzelnen Bundesländern	39
Tabelle 11: Kenndaten zu den Modellregionen.....	51
Tabelle 12: Zusammenfassung verschiedener Parameter der Telefonumfragen	55
Tabelle 13: Theoretische Strohpotenziale in t/LK*a der vier Modellregionen für die Jahre 2000-2007	61
Tabelle 14: Vergleich der Möglichkeiten der Strohpotenzialermittlung mittels Fernerkundung und basierend auf statistischen Daten.....	65
Tabelle 15: Technische Daten von Strohquaderballen	67
Tabelle 16: Charakterisierung der berücksichtigten Lagertypen (nach [92][94]).....	69
Tabelle 17: Beim Umschlag eingesetzte Maschinen und ihre Charakterisierung [95].....	69
Tabelle 18: Charakterisierung Ballenladewagen	70
Tabelle 19: Beim Transport eingesetzte Maschinen und ihre Charakterisierung [95].....	71
Tabelle 20: Strohbedarf und -verbrauch für die verschiedenen Anlagenkonzepte *(Bedarf + Lagerverluste).....	76
Tabelle 21: Einzugsgebiete und Transportdistanzen zur Konversionsanlage (KVA)	77
Tabelle 22: Parameter, Preise und Leistungen für die Strohbergung mit Quaderballenpresse (alle Preisangaben sind Nettobeträge ohne MwSt.) [104]	91
Tabelle 23: Erhöhung des Strohverkaufes und Humusbilanzausgleich durch Ackergrasanbau [110]	93
Tabelle 24: Verfahrenskosten und Arbeitsaufwand der Strohbergung mit Quaderballenpresse	94
Tabelle 25: Mindeststrohpreis bei Humusbilanzausgleich des Strohverkaufs durch Ackergrasanbau [110].....	95
Tabelle 26: Mindeststrohpreis bei Humusbilanzausgleich des Strohverkaufs durch Kompostdüngung [110].....	95
Tabelle 27: Vergleich organischer Dünger und Nebenernteprodukte [115][91]	99
Tabelle 28: Strohbereitstellungskosten für die verschiedenen Anlagenkonzepte (FM: Frischmasse, Bezugsjahr 2010).....	104

Tabelle 29: Parameter der Gestehungskostenberechnung – Wärmekonzepte (Kosten mit Bezugsjahr 2010).....	106
Tabelle 30: Parameter der Gestehungskostenberechnung – KWK-Konzepte (Kosten mit Bezugsjahr 2010).....	113
Tabelle 31: Parameter der Gestehungskostenberechnung – Kraftstoffkonzepte (Kosten mit Bezugsjahr 2010).....	120
Tabelle 32: Humus-bedingte THG-Freisetzung und -Bindung für den Weizenanbau mit und ohne Strohentnahme – Ergebnisse aller drei Methoden	133
Tabelle 33: Kennwerte und Rechenschritte für die humusbedingte THG-Freisetzung und -Bindung für den Weizenanbau mit und ohne Strohentnahme.....	133
Tabelle 34: Überblick zum Bilanzrahmen (Umlagesystem).....	136
Tabelle 35: Emissionsfaktoren für Inputs bei Anbau und Ernte nach unterschiedlichen Quellen.....	138
Tabelle 36: Auswirkung der unterschiedlichen Emissionsfaktoren am Beispiel des Weizenanbaus (ohne Humus)	139
Tabelle 37: Bereitstellungsbedingte Treibhausgasemissionen für Weizenkörner und –stroh mit Berücksichtigung der Humusbilanzierung (VDLUF _{Au} , VDLUF _{Ao} , HE-Methode) und zweier Logistikvarianten zur Strohbearbeitung. Die Strohentnahme basiert auf einer ausgeglichenen Humusbilanz. Der Anbau ist nicht in eine Fruchtfolge eingegliedert.	142
Tabelle 38: Varianten zur Optimierung des Beispielbetriebs	144
Tabelle 39: Anbauflächen des Beispielbetriebs und der Varianten. Die Strohentnahme basiert auf einer ausgeglichenen Humusbilanz nach VDLUF _{Ao} (organischer Dünger: siehe Text und Tabelle 40).....	145
Tabelle 40: Eingangsdaten für die Analyse (Variante IST-Stroh). Die Strohentnahme basiert auf einer ausgeglichenen Humusbilanz nach VDLUF _{Ao} (organischer Dünger: siehe auch Text). ...	146
Tabelle 41: Bereitstellungsbedingte Treibhausgasemissionen für Weizenkörner und –stroh mit Berücksichtigung der Humusbilanzierung (VDLUF _{Au} , VDLUF _{Ao} , HE-Methode; Variante IST-Stroh). Die Strohentnahme basiert auf einer ausgeglichenen Humusbilanz. Der Anbau ist in eine Fruchtfolge eingegliedert	147
Tabelle 42: Treibhausgasemissionen für die verschiedenen fossilen Referenzsysteme nach [131][144].....	160
Tabelle 43: Vergleich verschiedener Nutzungen und methodischer Ansätze.....	171

Literaturverzeichnis

- [1] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen WBGU: *Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung*; Berlin, 2008, (ISBN: 978-3-936191-21-9)
- [2] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC
- [3] Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) Konsolidierte (unverbindliche) Fassung des Gesetzestextes in der ab 1. Januar 2012 geltenden Fassung *
- [4] Lal, R.: World crop residues production and implications of its use as a biofuel; *Environment International*, Bd. 31 (2005), Nr. 4, S. 575–584, (doi:10.1016/j.envint.2004.09.005)
- [5] Vetter, A.: Qualitätsanforderungen an halmgutartige Bioenergieträger hinsichtlich der energetischen Verwertung. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe; *Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse. Stand der Technik und Perspektiven für den ländlichen Raum.*, S. 36–50, Gülzow, 2001, Bd. 17, Gülzower Fachgespräche
- [6] Rode, M. u. a.: *Naturschutzverträgliche Erzeugung und Nutzung von Biomasse zur Wärme- und Stromgewinnung*; Bonn, 2005, BfN-Skripten 136, ([http://www.naturschutzstandards-erneuerbarer-energien.de/images/literatur/BfN_skript136\[1\].pdf](http://www.naturschutzstandards-erneuerbarer-energien.de/images/literatur/BfN_skript136[1].pdf))
- [7] RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien
- [8] COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES.: COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE COUNCIL AND THE EUROPEAN PARLIAMENT on the Interpretative Communication on waste and by-products
- [9] Europäisches Komitee für Normung.: Feste Biobrennstoffe - Terminologie, Definition und Beschreibungen, EN 14588; 2010
- [10] Mahro, B.; Timm, M.: Potential of Biowaste from the Food Industry as a Biomass Resource; *Engineering in Life Sciences*, Bd. 7 (2007), Nr. 5, S. 457–468, (doi:10.1002/elsc.200620206)
- [11] Hoogwijk, M. u. a.: Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy; *Biomass and Bioenergy*, Bd. 25 (2003), Nr. 2, S. 119–133, (doi:10.1016/S0961-9534(02)00191-5)
- [12] Leibnitz, E., (Hrsg.): *Brockhaus-abc Landwirtschaft*; Brockhaus VEB, Leipzig, 1974, Bd. 2
- [13] Vis, M.W. u. a.: *Best Practices and Methods Handbook*; November 2010, Harmonization of biomass resource assessments, (<http://www.eu-bee.com/>)
- [14] Smeets, E.M.W. u. a.: A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050; *Progress in Energy and Combustion Science*, Bd. 33 (2007), Nr. 1, S. 56–106, (doi:10.1016/j.peccs.2006.08.001)
- [15] Berndes, G.; Hoogwijk, M.; van den Broek, R.: The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies; *Biomass and Bioenergy*, Bd. 25 (2003), Nr. 1, S. 1–28, (doi:10.1016/S0961-9534(02)00185-X)
- [16] Rettenmaier, N. u. a.: *Status of Biomass Resource Assessments*; Version 1, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, Dezember 2008, (<http://www.eu-bee.com/>)
- [17] *Globale und regionale räumliche Verteilung von Biomassepotenzialen - Status Quo und Möglichkeit der Präzisierung*; Endbericht, November 2010, BMVBS-Online-Publikation, (<http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2010/ON272010.html>)
- [18] Edwards, R.A.H. u. a.: GIS-Based Assessment of Cereal Straw Energy Resource in the European Union; *Proceedings of the 14th European Biomass Conference & Exhibition. Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*, Florenz, München, 2005, (ISBN: 88-89407-07-7)

- [19] Ericsson, K.; Nilsson, L.J.: Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach; *Biomass and Bioenergy*, Bd. 30 (2006), Nr. 1, S. 1–15, (doi:10.1016/j.biombioe.2005.09.001)
- [20] Scarlet, N.; Martinov, M.; Dallemand, J.-F.: Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use; *Waste Management*, Bd. 30 (2010), Nr. 10, S. 1889–1897, (doi:10.1016/j.wasman.2010.04.016)
- [21] Leible, L. u. a.: *Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen: Bereitstellung und energetische Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte als Einkommensalternative für die Land- und Forstwirtschaft – Möglichkeiten, Chancen und Ziele*; Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft - Institut für Technikabschätzung und Systemanalyse, Karlsruhe, Juli 2003, Wissenschaftliche Berichte, (<http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2003/leua03a.pdf>)
- [22] Kaltschmitt, M.; Merten, D.; Fröhlich, N.: *Energiegewinnung aus Biomasse*; *Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit*, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen WBGU, Berlin, 2003, (ISBN: 3-936191-01-8)
- [23] Fritsche, U.R. u. a.: *Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse*; Endbericht F&E-Vorhaben, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Darmstadt, Berlin, Mai 2004, (http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/doc/5961.php)
- [24] Nitsch, J. u. a.: *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland*; Endbericht, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Technische Thermodynamik, Institut für Energie- und Umweltforschung, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal, März 2004, (http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Oekologisch_optimierter_Ausbau_Langfassung.pdf)
- [25] Beckmann, G.; Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, (Hrsg.): Regionale Potenziale ausgewählter biogener Reststoffe; *Informationen zur Raumentwicklung*, Bd. 2 (2006), Nr. 1, S. 23–33
- [26] Gauder, M.; Graeff-Hönninger, S.; Claupein, W.: Identifying the regional straw potential for energetic use on the basis of statistical information; *Biomass and Bioenergy*, Bd. 35 (2011), Nr. 5, S. 1646–1654, (doi:10.1016/j.biombioe.2010.12.041)
- [27] Der Rat der Europäischen Union: Verordnung (EG) Nr. 73/2009 vom 19. Januar 2009, Amtsblatt der Europäischen Union; 2009
- [28] Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung vom 4. November 2004 (BGBl. I S. 2778), die zuletzt durch die Verordnung vom 20. April 2010 geändert worden ist
- [29] Direktzahlungen-Verpflichtungengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. April 2010 (BGBl. I S. 588)
- [30] Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 100-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das zuletzt durch das Gesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2248) geändert worden ist
- [31] Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 9. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3214) geändert worden ist
- [32] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV): Position der Bundesregierung, Weiterentwicklung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) nach 2013; 2010
- [33] Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik.: *EU Agrarpolitik nach 2013 – Plädoyer für eine neue Politik für Ernährung, Landwirtschaft und ländliche Räume*; Veröffentlichungen des Wissenschaftlichen Beirats, 2010
- [34] European Commission: *Report from the Commission to the Council and the European Parliament on sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling SEC(2010)*; Brussels, 2010, (http://ec.europa.eu/energy/renewables/transparency_platform/doc/2010_report/com_2010_0011_3_report.pdf)
- [35] Bundesrepublik Deutschland: Nationaler Aktionsplan für erneuerbare Energie gemäß der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen; 2010

- [36] Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz vom 7. August 2008 (BGBl. I S. 1658), das durch Artikel 2 Absatz 68 des Gesetzes vom 22. Dezember 2011 (BGBl. I S. 3044) geändert worden ist; 2011
- [37] Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 26. September 2002 (BGBl. I S. 3830), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist
- [38] Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes- Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV); 2010
- [39] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.: Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe in Deutschland 2011; 2011
- [40] Kögel-Knabner, I.: Humusqualität und Standorteigenschaften; in: Bayrische Akademie der Wissenschaften, (Hrsg.): : *Humus in Böden: Garant der Fruchtbarkeit, Substrat für Mikroorganismen, Speicher von Kohlenstoff*, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, 2009, Bd. 35, 1. Aufl., Rundgespräche der Kommission für Ökologie, (ISBN: 978-3899370911)
- [41] Körschens, M.; Schulz, E.: *Die organische Bodensubstanz – Dynamik - Reproduktion-ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte*; Helmholtz Zentrum für Umweltforschung, Halle, 1999, UFZ Berichte 1994-1999
- [42] Dalal, R.C. u. a.: A framework to monitor sustainability in the grains industry; *Australian Journal of Experimental Agriculture*, Bd. 39 (1999), Nr. 5, S. 605–620
- [43] Sauerbeck, D.; Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, (Hrsg.): Funktionen und Bedeutung der organischen Substanz für die Bodenfruchtbarkeit - ein Überblick; *Berichte über Landwirtschaft*, Bd. (1992), S. 13–29
- [44] Doran, J.W.: Einfluss verschiedener Bewirtschaftungs- und Bearbeitungssysteme auf die organische Bodensubstanz und die Bodenfruchtbarkeit; Bd. (1992), S. 155–167
- [45] Leithold, G.: *Untersuchung der Beziehungen zwischen ackerbaulichen Maßnahmen, Ertrag und Humusreproduktion sowie Erarbeitung einer Methode zur Berechnung des Bedarfs des Bodens an organischer Substanz*; Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 1984
- [46] Hance, R.J.; Fuhr, E.: Rolle der organischen Bodensubstanz bei der Festlegung und Entgiftung von Xenobiotika; Bd. (1992), S. 82–96
- [47] Cole, C.V. u. a.: Global estimates of potential mitigation of greenhouse gas emissions by agriculture; Bd. 49 (1997), S. 221–228
- [48] Kirschbaum, M.U.F.: Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming?; *Biogeochemistry*, Bd. 48 (2000), Nr. 1, S. 21–51, (doi:10.1023/A:1006238902976)
- [49] Ehlers, W.: Wirkung von Bearbeitungssystemen auf gefügeabhängige Eigenschaften verschiedener Böden; Bd. (1991), S. 118–138
- [50] Schröder, D.: Ursachen und Ausmaß der Erosion; Bd. (1991), S. 16–27
- [51] Schnitzer, M.: Bedeutung der organischen Bodensubstanz für die Bodenbildung, Transportprozesse in Böden und die Bodenstruktur; Bd. (1992), S. 63–81
- [52] Scheffer, F.; Schachtschabel, P.; Blume, H.-P.: *Lehrbuch der Bodenkunde*; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg; Berlin, 2002
- [53] Schloter, M.: Mikrobielle Prozesse als Basis für die Emission klimarelevanter Spurengase aus landwirtschaftlich genutzten Böden; *Humus in Böden Garant der Fruchtbarkeit, Substrat für Mikroorganismen, Speicher von Kohlenstoff*, S. 69–78, Verlag Dr. Friedrich Zeil, München, 2009, Bd. 35, Rundgespräche der Kommission für Ökologie
- [54] Leithold, G. u. a.: Humusbilanzierung – Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator; *Initiativen zum Umweltschutz*, S. 43–54, Zeller Verlag, Osnabrück, 1997, 5
- [55] Körschens, M.; Rogasik, J.; Schulz, E.: *Bilanzierung und Richtwerte organischer Bodensubstanz*; 2005, Landbauforschung Völknerode
- [56] Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, (Hrsg.): Standpunkt Humusbilanzierung - Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland; Eigenverlag, 2004
- [57] Autorenkollektiv, (Hrsg.): Empfehlungen zur effektiven Versorgung der Böden mit organischer Substanz; Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR; 1977

- [58] Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA): *Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden Einflußfaktoren und deren Auswirkungen*; Mitteilungen, 2009, Bd. 1
- [59] Hülsbergen, K.-J.: *Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Unternehmen.*; Shaker Verlag Aachen, 2003, (ISBN: 3-86010-600-7)
- [60] Brock, C. u. a.: Modellbasierte Humusbilanzierung mit HUMOD; *Modellierung des Systems Nutzpflanze-Boden Herausforderungen des 21. Jahrhunderts*, S. 7–11, Göttingen, 2009, Bd. 4, Berichte der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, (ISBN: 978-3-00-028239-3)
- [61] Thüringer Landesamt für Statistik: *Bodennutzung 2007*; Statistischer Bericht, Erfurt, 2008
- [62] Thüringer Landesamt für Statistik: *Ernte- und Betriebsberichterstattung Feldfrüchte und Grünland 2007*; Statistischer Bericht, Erfurt, 2008
- [63] Bundesamt für Statistik: *Landwirtschaftliche Bodennutzung, Bodennutzung der Betriebe (Anbau von Landwirtschaftlichen Zwischenfrüchten) - Agrarstrukturerhebung 2007*; Statistischer Bericht, Wiesbaden, 2008
- [64] Thüringer Landesamt für Statistik: *Viehbestände am 3. Mai 2007*; Statistischer Bericht, Erfurt, 2008
- [65] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.: *Wirtschaftsdüngeranfall in den Bundesländern 2007* (schriftliche Mitteilung, unveröffentlicht); 2009
- [66] Thüringer Landesamt für Statistik: *Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in Thüringen 2007*; Statistischer Bericht, Erfurt, 2008
- [67] Vetter, A. u. a.: *Untersuchungen zum Einfluss der Brennstoffart und -qualität auf die Zusammensetzung der Reststoffe und deren Verwertung am Strohheizwerk Schkölen zur Sicherung der Umweltverträglichkeit*; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, 1995
- [68] Osterburg, B.; Dämmgen, U.: *Annahmen für die Prognose der Gasemissionen aus der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2010, 2015 und 2020*; Bd. (2009), Nr. Sonderheft 324, S. 397–410
- [69] Haenel, H.-D.: *Kreisweise Haltungsformen von Tierarten und -kategorien zur Berechnung der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft* (Schriftliche Mitteilung); 2010
- [70] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: *Basisdaten für die Ermittlung des Düngedarfs und der Umsetzung der Düngeverordnung – Stand Juli 2009*; 2009, (www.lfl.bayern.de/iab/duengung/mineralisch/10536/basisdaten2010.pdf)
- [71] Deutscher Bundestag: *Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 18 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist*; 2006
- [72] Haenel, H.-D.: *Berechnungen der Emissionen aus der Landwirtschaft – Nationaler Emissionsbericht 2009 für 2007, Tabellen*; *Landbauforschung*; Sonderheft 324a, 2009
- [73] Kolbe, H.: *Prüfung der VDLUFA Bilanzierungsmethode für Humus durch langjährige Dauerversuche*; Bd. 51 (2005), Nr. 2, S. 221–239, *Archives of Agronomy and Soil Science*
- [74] Kolbe, H.: *Einfache Verfahren zur Berechnung der Humusbilanz für konventionelle und ökologische Anbaubedingungen*; 2008
- [75] Capriel, P.; Rippel, R.: *Humusbilanzmethode für Beratung in Bayern*; Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising, 2007, (http://www.lfl.bayern.de/iab/bodenschutz/12458/linkurl_0_13.pdf)
- [76] Reinhold, G.; Zorn, W.: *Eigenschaften und Humuswirkung von Biogasgülle*; *Erhöhte Biomassenachfrage eine Herausforderung für die Landwirtschaft*, S. 404–409, Jena, 2008, Bd. 64
- [77] Dominik, P. u. a.: *Wie wirken NaWaRo-Gärreste auf den organischen Bodenkohlenstoff?*; *Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven*, S. 210–222, Gülzow, 2009, Bd. 32
- [78] Breitschuh, T.; Gernand, U.: *Bewertung der Humusbilanzierung in landwirtschaftlichen Betrieben und insbesondere beim Energiepflanzenanbau*; *Schlussbericht zum F&E-Vorhaben „Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden und deren Auswirkungen“*, S. 7–11, Speyer, 2010

- [79] Vetter, A. u. a.: *Regionale Biomassepotenziale zur energetischen Nutzung im Freistaat Thüringen*; (www.tll.de/ainfo/pdf/bioe0510.pdf)
- [80] Raussen, T. u. a.: *Biomassepotentialstudie Hessen . Stand und Perspektiven der energetischen Biomassenutzung in Hessen – Materialband*; 2010, (www.biomassehessen.de/pdf/Materialband_Biomassepotentialstudie_Endfassung_2010.)
- [81] Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt: *Biomassepotentialstudie*; 2007, (www.sachsen-anhalt.de/index.php?id=29327.)
- [82] Statistische Ämter des Bundes und der Länder: Regionaldatenbank Deutschland; 1999, (Zugegriffen 8.3.2011 auf: <https://www.regionalstatistik.de>)
- [83] Tum, M.: *Variabilitätsuntersuchungen der NPP von Energiepflanzen für das Gebiet Deutschland – Österreich*; Diplomarbeit im Fachgebiet Geographie, Universität Göttingen, 2009
- [84] Günther, K.P.; Schroedter-Homscheidt, M.: *Deriving Biomass using Remote Sensing Products*; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2008
- [85] Tum, M. u. a.: A new validation approach to assess the quality of modelled agricultural biomass potentials using BETHY/DLR; 24th International Conference on Informatics for Environmental Protection, Köln, 2010
- [86] Köhler, B.; Kolbe, H.: *Nährstoffgehalte der Fruchtarten im ökologischen Landbau. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft*; Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 2007, Schriftreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft
- [87] Bolinder, M.A.; Angers, D.A.; Dubuc, J.P.: Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops; *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Bd. 63 (1997), Nr. 1, S. 61–66, (doi:doi: 10.1016/S0167-8809(96)01121-8)
- [88] Jackson, R.B. u. a.: A global analysis of root distributions for terrestrial biomes; Bd. (1996), Nr. 108, S. 389–411
- [89] Krausmann, F. u. a.: Global patterns of socioeconomic biomass flows in the year 2000: A comprehensive assessment of supply, consumption and constraints; *Ecological Economics*, Bd. 65 (2008), Nr. 3, S. 471–487, (doi:10.1016/j.ecolecon.2007.07.012)
- [90] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL): Strohbergungsrate abhängig vom Mähdreschertyp; Schriftliche Mitteilung, 2010
- [91] Hartmann, H.: Produktion, Bereitstellung und Eigenschaften biogener Festbrennstoffe; *Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen*, Gülzow, 2007
- [92] Eltrop, L. u. a.: *Leitfaden Bioenergie: Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen*; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2005, 2., aktualis. Aufl. Aufl., (ISBN: 3000153896)
- [93] Härdtlein, M.; Eltrop, L.; Thrän, D.: *Voraussetzung zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe*; Landwirtschaftsvlg Münster, 2004, Bd. 23, Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe, (ISBN: 9783784332963)
- [94] Allen, J. u. a.: Logistics management and costs of biomass fuel supply; *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Bd. 28 (1998), Nr. 6, S. 463–477, (doi:10.1108/09600039810245120)
- [95] KTBL: *Betriebsplanung Landwirtschaft 2010/11: Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft*; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 2010, 22., Aufl., (ISBN: 3941583387)
- [96] Seiffert, M.: *Methodische Vorgehensweise zur Standortidentifikation und Planung der Biomassebereitstellung für Konversionsanlagen am Beispiel von Bio-SNG-Produktionsanlagen*; Technische Universität Hamburg-Harburg, Leipzig, 2010
- [97] BLT Wieselburg: *Pelletsfeuerung Heizkessel - AGROFIRE 30*; Prüfbericht
- [98] Hargassner GmbH, (Hrsg.): Datenblatt AgroFire 25 - 40 kW
- [99] LIN-KA ENERGY, (Hrsg.): Handbuch LIN-KA Feuerungsanlage; 2009
- [100] Nikolaisen, L. et al.: Straw for Energy Production in Denmark, Proceeding 1. Internationale Fachtagung – Strohenergie 2008; Jena, 2008

- [101] CADDET, (Hrsg.): Straw – fired CHP plant in Rudkøbing– Providing environmentally – friendly energy; 1998
- [102] BIOENER APS, (Hrsg.): Rudkøbing CHP plant – The first Generation of Straw – Fired Plants;
- [103] Obernberger, I.; Thek, G.: *Herstellung und energetische Nutzung von Pellets: Produktionsprozess, Eigenschaften, Feuerungstechnik, Ökologie und Wirtschaftlichkeit*; Graz, 2009, 1. Aufl. Aufl.
- [104] Degner, J.: Excel basiertes Modell zur Berechnung der Maschinenkosten und des Arbeitsaufwandes bei verschiedenen Strohbergeverfahren mit Quaderballenpresse; Schriftliche Mitteilungen, 2010
- [105] Degner, J.: Kosten und Arbeitsaufwand der Strohbergung mit Quaderballenpresse bei Feldrandfreilagerung;
- [106] Degner, J.: Was kostet Stroh? Kosten der Strohbergung mit Freilandlagerung; Bd. (2008), Nr. 1, S. 27–28
- [107] KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.): Kalkulationsdaten - Feldarbeitsrechner; 2010, (Zugegriffen auf: <http://daten.ktbl.de/feldarbeit/entry.html>)
- [108] DLG (Deutsche Landwirtschafts Gesellschaft e.V.): *Acrusin Ballenladewagen*; DLG – Prüfbericht 5195F, (<http://www.dlg-test.de/pbdocs/5195F.pdf>)
- [109] Ude, B.-M.: *Möglichkeiten einer monetären Bewertung organischer Substanz für die Betriebszweigabrechnung im ökologischen Landbau*; Diplomarbeit, Universität Kassel, 2006
- [110] Hanff, H.: Was Stroh kosten muss; Bd. (2010), Nr. 3, S. 22–25, DLG Mitteilungen
- [111] Lorenz, F.: Was ist Stroh Wert - ein Versuch der Wertermittlung, zitiert in Abel, J.; Bd. (1011), Acker plus
- [112] Schindler, M.: Wertermittlung bei Koppelprodukten im Ackerbau; Energetische Verwertung von Koppelprodukten, Schladen, 2008
- [113] Wagner, K.: Ableitung eines sachgerechten Stroheinkaufspreises; Eichhof, 2011
- [114] DESTATIS (Statistisches Bundesamt Deutschland): Index der Einkaufspreise landwirtschaftlicher Betriebsmittel
- [115] Schattauer, A.; Weiland, P.: Beschreibung ausgewählter Substrate; *Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung*, Gülzow, 2009
- [116] *Auktionierung. Versteigerung von Emissionsberechtigungen in Deutschland. Periodischer Bericht: Drittes Quartal 2011*; Deutsche Emissionshandels (DEHSt), Berlin, (http://www.dehst.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Auktionierung_2011_Quartal_03.pdf?__blob=publicationFile)
- [117] European Energy Exchange: EU Emission Allowances | Spot; (Zugegriffen 23.1.2012 auf: <http://www.eex.com/en/Market%20Data/Trading%20Data/Emission%20Rights/EU%20Emission%20Allowances%20%7C%20Spot>)
- [118] DLR; Fraunhofer IWES; Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE): *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global „Leitstudie 2010“*; Dezember 2010, (http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf)
- [119] Joachim Nitsch u. a.: *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global „Leitstudie 2010“*. Datenanhang II; Dezember 2010
- [120] Stefan Rönsch; Franziska Müller-Langer; Martin Kaltschmitt.: Produktion des Erdgassubstitutes Bio-SNG im Leistungsbereich um 30 MWBWL – Eine techno-ökonomische Analyse und Bewertung; Bd. (2009), Nr. 81, No. 9, S. 1417 – 1428, Chemie Ingenieur Technik, (doi:10.1002/cite.200900041)
- [121] *Biomass to Liquid – BtL Realisierungsstudie. Zusammenfassung*; Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin, Dezember 2006, (http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Publikationen/mobilitaet/Biomass_to_Liquid_Zusammenfassung_.pdf)
- [122] Port of Rotterdam Authority - Home; (Zugegriffen 18.8.2011 auf: <http://www.portofrotterdam.com/en/Pages/default.aspx>)
- [123] *EU-27 Annual Biofuels Report*; The Hague, GAIN Report, (http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Biofuels%20Annual_The%20Hague_EU-27_6-22-2011.pdf)

- [124] Sultana, A.; Kumar, A.; Harfield, D.: Development of agri-pellet production cost and optimum size; *Bioresource Technology*, Bd. 101 (2010), Nr. 14, S. 5609 – 5621, (doi:DOI: 10.1016/j.biortech.2010.02.011)
- [125] C.A.R.M.E.N -Energie/Pelletpreise - der Pellet-Preis-Index; (Zugegriffen 4.8.2011 auf: <http://www.carmen-ev.de/dt/energie/pellets/pelletpreise.html>)
- [126] DEPV e.V. - Pellets Preisentwicklung; (Zugegriffen 4.8.2011 auf: <http://www.depv.de/startseite/marktdaten/pelletspreise/>)
- [127] FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., (Hrsg.): *Pelletheizungen. Marktübersicht*; Gülzow, 2010, 6. überarbeitete. Aufl.
- [128] Kubessa, M.: *Energiekennwerte. Handbuch für Beratung, Planung, Betrieb*; 1998
- [129] Struschka, M. u. a.: *Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung*; Universität Stuttgart, Stuttgart
- [130] FNR: *Leitfaden Bioenergie. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen*; Gülzow, 2007
- [131] Daniela Thrän u. a.: *Methodenhandbuch Methoden zur stoffstromorientierten Beurteilung für Vorhaben im Rahmen des BMU-Förderprogramms*; 2010
- [132] DBFZ: *Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. 5. Zwischenbericht.*; Zwischenbericht, BMU, Berlin, März 2011
- [133] German Council on Global Change (WBGU).: *World in Transition - Future Bioenergy and Sustainable Land Use*; Berlin, 2009
- [134] Hamelinck, C.N. u. a.: *Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation, and development potential.*; *Energy*, 2004
- [135] Straub, F.J.: *Nutzung von Abwärme aus einem Dampf-Heizkraftwerk zur energieoptimierten Trocknung von Grüngut*; TU München, München, 2002
- [136] Zhu, Y. u. a.: *Analysis of the Effects of Compositional and Configurational Assumptions on Product Costs for the Thermochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Mixed Alcohols*; U.S. Department of Energy, Richland, 2008, (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135411000925>)
- [137] Leible, L.; Kälber, G.; Kappler, G.: *Kraftstoff, Strom und Wärme aus Stroh und Waldrestholz: eine systemanalytische Untersuchung*; Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, 2007, (ISBN: 0947-8620)
- [138] P.C.A. Bergman u. a.: *Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations „BIOCOAL“*; Final Report, ECN, Petten, Juli 2005, (<ftp://kernenergie.nl/pub/www/library/report/2005/c05013.pdf>)
- [139] Bartone Jr., L.M.; White, J.: *Industrial Size Gasification for Syngas, Substitute Natural Gas and Power Production*; NETL, April 2007, (<http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/refshelf/PubDetails.aspx?Action=View&PubId=178>)
- [140] H.P. Loh; Jennifer Lyons; White, III, C.W.: *Process Equipment Cost Estimation*; Final Report, U.S. Department of Energy, Pittsburgh, Januar 2002, (<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/797810-Hmz80B/native/797810.pdf>)
- [141] Craig, K.R.; Mann, M.K.: *Cost and Performance Analysis of Biomass-based Integrated Gasification Combined-cycle (BIGCC) Power Systems*; National Renewable Energy Laboratory, 1996
- [142] Wene, C.O.: *Experience curves for energy technology policy*; OECD, Paris, 2000
- [143] Homepage des Mineralölwirtschaftsverband e.V.; (Zugegriffen 15.12.2011 auf: <http://www.mwv.de/index.php>)
- [144] Edwards, R. u. a.: *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*; EUCAR, CONCAWE, JRC/IES, 2008, TANK-to-WHEELS Report, (<http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW>)
- [145] Hüttel, R.F.; Prechtel, A.; Bens, O.: *Humusversorgung von Böden in Deutschland*; 2008, (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3710.pdf>)
- [146] Bessou, C. u. a.: *Biofuels, greenhouse gases and climate change. A review*; *Agron. Sustain. Dev.*, Bd. (2010), , (doi:10.1051/agro/2009039)

- [147] Cherubini, F.; Ulgiati, S.: Crop residues as raw materials for biorefinery systems - A LCA case study; *Applied Energy*, Bd. 87 (2010), Nr. 1, S. 47–57, (doi:doi: 10.1016/j.apenergy.2009.08.024)
- [148] Gabrielle, B.; Gagnaire, N.: Life-cycle assessment of straw use in bio-ethanol production: A case study based on biophysical modelling; *Biomass and Bioenergy*, Bd. 32 (2008), Nr. 5, S. 431–441, (doi:doi: 10.1016/j.biombioe.2007.10.017)
- [149] Brandao, M.; Mila i Canals, L.; Clift, R.: Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: Implications for GHG balances and soil quality for use in LCA; *Biomass and Bioenergy*, Bd. 35 (2011), Nr. 6, S. 2323–2336, (doi:doi: 10.1016/j.biombioe.2009.10.019)
- [150] Björn Küstermann; Christen, O.; Hülsbergen, K.-J.: Modelling nitrogen cycles of farming systems as basis of site- and farm-specific nitrogen management; *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Bd. 135 (2010), Nr. 1-2, S. 70–80, (doi:doi: 10.1016/j.agee.2009.08.014)
- [151] Eggleston, H.S. u. a.: *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*; IGES, Japan, 2006, (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>)
- [152] Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (LLFG) Sachsen-Anhalt, (Hrsg.): Richtwerte für die Untersuchung und Beratung sowie zur fachlichen Umsetzung der Düngeverordnung (DüV); 2008
- [153] Kalk, Wolf-Dieter et al.: Kohlenstoffbilanzen landwirtschaftlicher Betriebe unterschiedlicher Produktionsintensität; *Biologische Senken für atmosphärischen Kohlenstoff in Deutschland - Tagungsband*, S. 164, Braunschweig, 2005, Bd. Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 280, (ISBN: 3-86576-004-X)
- [154] KTBL: *Faustzahlen für die Landwirtschaft*; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 2009, 14. Aufl., (ISBN: 3939371912)
- [155] ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Deutsche und Englische Fassung; DIN EN ISO 14040: 2006; 2006
- [156] ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz- Anforderungen und Anleitungen, Deutsche und Englische Fassung, DIN EN ISO 140 44: 2006; 2006
- [157] Sachverständigenrat für Umweltfragen: *100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar*; Stellungnahme, Mai 2010, (http://www.umweltrat.de/cae/servlet/contentblob/1001596/publicationFile/63817/2010_05_Stellung_15_erneuerbareStromversorgung.pdf)
- [158] Finnveden, G. u. a.: Recent developments in Life Cycle Assessment; *Journal of Environmental Management*, Bd. 91 (2009), Nr. 1, S. 1–21, (doi:10.1016/j.jenvman.2009.06.018)
- [159] Neeft, J.: BIOGRACE; *Biograce Harmonised Calculation of Biofuel Greenhouse Gas Emissions in Europe*, (Zugegriffen 18.1.2012 auf: <http://www.biograce.net/content/ghgcalculationtools/standardvalues>)
- [160] *Wachstum und Ernte – Feldfrüchte - April 2009*; Statistisches Bundesamt Deutschland, Wiesbaden, Juni 2009, Fachserie 3: Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Reihe 3.2.1, (<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/LandForstwirtschaft/ErnteFeldfruechte/FeldfruechteApril2030321112014,property=file.pdf>)
- [161] Dämmgen, U., (Hrsg.): *Berechnungen der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft - Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2009 für 2007: Tabellen*; vTI Johann-Heinrich-von-Thünen-Institut, Braunschweig, 2009, Bd. 2/2
- [162] Wilfried Zorn u. a.; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, (Hrsg.): *Düngung in Thüringen 2007 nach „Guter fachlicher Praxis“*; Jena, 2007, Bd. Heft 7, Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen
- [163] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL): Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas; 2010, (Zugegriffen auf: <http://daten.ktbl.de/biogas/startseite.do;jsessionid=018C2E86FEEB873E5060C8EF3F9A277B>)
- [164] Europäisches Komitee für Normung.: Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements, EN 14961-1; 2010

A.1 Steckbriefe landwirtschaftliche Reststoffe

Tabelle A 1: Steckbrief Exkrementa Nutztierhaltung

Exkrementa aus der Nutztierhaltung					
Definition	Exkrementa aus der Nutztierhaltung sind Kot und Harn, die je nach Aufstellungsart der Nutztiere zusammen mit Einstreumaterialien als Festmist oder ohne sonstige Zusatzstoffe als Gülle bezeichnet wird.				
	Tierzahlen in Mio. Mai/Nov. 2009 [160]	Gülle Mio. m ³ /a (10 %TS)	Festmist Mio. t/a (TS 25%)		
Rinder	12,9	94	20		
Schweine	26,8	28	2,7		
Geflügel	125 ^a	-	4 ^b		
Schafe	2,3	-	0,8		
Pferde	0,54 ^a	-	2		
Haltungsformen [161]					
	Strohbasierte Systeme (%)	Güllebasierte Systeme (%)	Weidegang (d)		
Rinder ohne Milchkühe	37,8	62,2	-		
Milchkühe	16,5	83,5	152		
Schweine	13,1	86,9	-		
Substratzusammensetzung Beispiel Mischgülle (Rind, Schwein)					
Wassergehalt	%	92			
Trockenmasse	%	8			
Organische Trockenmasse	%	7			
Nährstoffgehalte von Mischgülle (Rind, Schwein) in der Frischmasse (kg/m ³) [162]					
N	kg/m ³	5,7	K	kg/m ³	4,31
P	kg/m ³	1,46	Mg	kg/m ³	0,55
Biogaserträge für oben genanntes Beispiel, Mittelwerte für Biogas- und Methanerträge [163]					
Biogasertrag	IN/ kg oTM	345			
Biomethanertrag	IN/ kg oTM	200			
Bisherige Nutzung					
Düngung; 20-23 Mio. Tonnen als Biogassubstrat					

Tabelle A 2: Steckbrief Getreidestroh

Getreidestroh					
Definition	Halmgutartiges Nebenernteprodukt von verschiedenen Getreidearten wie Weizen, Gerste, Roggen, Triticale, Mais u. a.				
	Anbaufläche 09 (Mio. ha)[160]	Kornertrag (5 Jahresmittel) (dt/ha) ¹	Mengen (Mio t/a)	Haupternte- und Nebenernteprodukt- Verhältnis [71]	
Weizen (<i>Triticum aestivum</i>)	3,23	74,1	23,9	1:0,8	
Roggen (<i>Secale cereale</i>)	0,74	49,3	3,7	1:0,9	
Gerste (<i>Hordeum vulgare</i>)	1,88	58,4	11,0	1:0,7	
Triticale (<i>Triticum secale</i>)	0,4	56,6	2,27	1:0,9	
Körnermais (<i>Zea mays</i>) + Corn Cob Mix	0,46	89,1	4,13	1:1,0	
Hafer (<i>Avena sativa</i>)	0,16	46,0	0,75	1:1,1	
Technische Parameter					
Bergungsrate (%)	66	Ballendichte (kg/m ³)	120-160		
Substratzusammensetzung					
TM (%)	86	oTM (%)	81		
Nährstoffgehalte von Winterweizenstroh [71],[162]					
N	kg/dt	0,5	K	kg/dt	1,16
P	kg/dt	0,13	Mg	kg/dt	0,12
Elementargehalte (typische Werte für Getreide-, Roggen- und Gerstenstroh) [164]					
C	Ma.-% TM	47	Fe	mg/kg TM	100
H	Ma.-% TM	6	K	mg/kg TM	10.000
O	Ma.-% TM	41	Mg	mg/kg TM	700
N	Ma.-% TM	0,5	Mn	mg/kg TM	40
S	Ma.-% TM	0,1	Na	mg/kg TM	500
Cl	Ma.-% TM	0,4	P	mg/kg TM	1.000
F	Ma.-% TM	0,0005	Si	mg/kg TM	10.000
Al	mg/kg TM	50	Ti	mg/kg TM	70
Ca	mg/kg TM	4000			
Brennstoffeigenschaften (typische Werte für Getreide, Roggen und Gerstenstroh) [164], *Biogasertag für Weizenstroh [163]					
Heizwert (Hu, wf)	MJ/kg TM	16,7	Biogasertag*	IN/ kg oTM	369
Aschegehalt	Ma.-% TM	5	Biomethanertag*	IN/ kg oTM	188
Bisherige Nutzung					
Gründünger; Futtermittel und Einstreu in der Tierhaltung (ca. 5 Mio t.), Stoffliche Nutzung (wenige Prozent)					

Tabelle A 3: Steckbrief Ölsaaten- und Körnerleguminosenstroh

Ölsaaten- und Körnerleguminosenstroh					
Definition	Halmgutartiges Nebenernteprodukt von Ölfrüchten wie Raps oder Sonnenblume bzw. von Körnerleguminosen. Körnerleguminosen ist der Sammelbegriff für landwirtschaftlich genutzte Arten aus der Familie Hülsenfrüchtl. Im betriebswirtschaftlichen Sinne rechnet man zu den Hülsenfrüchten nur die großsamigen Arten wie Ackerbohne, Buschbohne, Erbse, Lupine, Sojabohne und Wicke.				
	Anbaufläche 09 (Mio. ha) [160]	Korntrag (5 Jahresmittel) (dt/ha)	Mengen (t/a)	Haupternte- und Nebenernteprodukt- Verhältnis [71]	
Raps	1,46	36,4	5,33	1:1,7	
Sonnenblume	0,024	21,6	0,051	1:2,0	
Ackerbohne	0,012	35,2	0,042	1:1,0	
Futtererbse	0,048	31,4	0,151	1,1,0	
Andere Körnerleguminosen: Nutzung als Ganzpflanze					
Technische Parameter					
Bergungsrate Rapsstroh (%)	50-80	Bergungsrate Sonnenblume:	Keine Erfahrungen		
Substratzusammensetzung					
Wassergehalt (%)	14				
Trockenmasse (%)	86				
Nährstoffgehalte (kg/dt Frischmasse) von Rapsstroh [71],[162]					
N	kg/dt	0,7	K	kg/dt	2,08
P	kg/dt	0,17	Mg	kg/dt	0,09
Chemische Parameter (typische Werte für Rapsstroh) [164]					
C	Ma.-% TM	48	Ca	mg/kg TM	15.000
H	Ma.-% TM	6	Fe	mg/kg TM	100
O	Ma.-% TM	41	K	mg/kg TM	10.000
N	Ma.-% TM	0,8	Mg	mg/kg TM	700
S	Ma.-% TM	0,3	Na	mg/kg TM	500
Cl	Ma.-% TM	0,5	P	mg/kg TM	1.000
Al	mg/kg TM	50	Si	mg/kg TM	1.000
Brennstoffeigenschaften (typische Werte für Raps) [164]					
Heizwert (Hu, wf)	MJ/kg TM	16,7			
Aschegehalt	Ma.-% TM	5			
Bisherige Nutzung					
Gründüngung					

Tabelle A 4: Steckbrief Reststoffe von Hackfrüchten

Reststoffe von Hackfrüchten					
Definition	Die beim Anbau von Hackfrüchten (Rüben, Kartoffeln u. a.) anfallenden Nebenernteprodukte wie Blätter und Kraut.				
	Anbaufläche 2009 (Mio. ha) [160]	Hektarertrag (5 Jahresmittel) (dt/ha) [160]	Ertrag (Mio. t/a)	Haupternte- und Nebenernteprodukt- Verhältnis [71]	
Zuckerrüben	0,38	595,0	5,31	1:0,7	
Kartoffeln	0,26	405,3	10,7	1:0,2	
Feldgemüse	0,13	zu heterogen	zu heterogen	zu heterogen	
Technische Parameter					
Bergungsrate Rübenblatt	%	50-80			
Kartoffelkraut	Wird in der Regel nicht praktiziert				
Substratzusammensetzung Rübenblatt					
Wassergehalt (%)	82				
TM (%)	18				
Nährstoffgehalte Zuckerrübenblatt [71],[162]					
N	kg/dt	0,4	K	kg/dt	0,5
P	kg/dt	0,05	Mg	kg/dt	0,06
Biogaserträge Richtwert Rübenblatt (Zucker- und Futterrübe) [163]					
Biogasertrag*	IN/ kg oTM	600			
Biomethanertrag	IN/ kg oTM	324			
Bisherige Nutzung					
Rübenblätter	Gründünger, Zuckerrübenblätter werden teilweise siliert und in der Rinderfütterung eingesetzt				
Kartoffelkraut	Verbleibt (immer) auf dem Feld				

A.2 Experteninterview Fernerkundung

Mit Markus Tum und Kurt Günther vom DLR

Kann die bei der Potenzialermittlung bisher übliche räumliche Auflösung von Strohpotenzialen auf Kreisebene durch die Fernerkundung verbessert werden?

Die Fernerkundung gekoppelt mit Prozessmodellen wie beispielsweise BETHY/DLR bietet grundsätzlich die Möglichkeit Potenzialermittlungen mit höherer Auflösung als auf Landkreisebene (NUTS-3) durchzuführen, da sie nicht von politischen Grenzen unterbrochen wird. Potenzialermittlungen mit räumlicher Auflösung von 1km x 1km, 300m x 300m oder auf Schlagebene sind denkbar und wurden bzw. werden derzeit in experimentellen Studien getestet.

Kann die Aktualität der Daten durch die Fernerkundung im Vergleich zu statistischen Methoden verbessert werden?

Die Aktualität von Fernerkundungsdaten liegt im Tages-, Wochen-, und Monatsbereich und kann aufgrund ihrer flächendeckenden Informationsquelle direkt die Auswirkungen des Wetters / Klimas auf landwirtschaftliche Ertragsflächen wiedergeben. Durch die Ableitung von Vegetationsindices wie dem Blattflächenindex (engl.: Leaf Area Index, LAI) oder dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) kann beispielsweise auf den Zustand und Entwicklung der Vegetation geschlossen werden und somit direkt Abschätzungen über das aktuelle Potenzial getroffen werden.

Statistische Methoden stützen ihre Aussage auf mittlere Ertragsstatistiken, um Vorrassagen über den Ernteertrag und somit über das Energiepotenzial zu treffen. Kleinräumige klimatische Variabilitäten können mit dieser Methode nicht oder nur schwer erfasst werden.

Mit welchen Kosten ist die Bereitstellung hoch aufgelöster und aktueller Daten verbunden? Welche Kosten und welcher Datenbedarf entstünden bei einer deutschlandweiten Modellierung (1km x 1km)?

Das derzeitige Modelsetup benötigt sowohl meteorologische Zeitreihen als auch Produkte die, aus Fernerkundungsdaten abgeleitet wurden. Hierzu zählt eine Landnutzungs- / Landbedeckungsklassifikation (eng.: Land Cover Classification, LCC) und Zeitreihen über den LAI. Die Zeitreihen des LAI stammen aus der frei zugänglichen Datenbank von VEGETATION und werden mit dem Instrumentarium der Zeitreihenanalyse für die Ansprüche des BETHY/DLR Modells aufbereitet. Die VEGETATION Datenbank beinhaltet außerdem das global verfügbare LCC Produkt „Global Land Cover 2000“ (GLC2000). Beide Datensätze haben eine räumliche Auflösung von 1km x 1km.

Meteorologische Daten wie Niederschlag, Temperatur 2m über Grund und Windgeschwindigkeit werden vom European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) bereitgestellt.

Weitere Eingangsdatensätze wie eine Bodenartenklassifikation und ein Höhenmodell sind ebenfalls frei verfügbar.

Da für eine flächendeckende Modellierung Deutschlands ein nicht unerhebliches Datenvolumen bereitgestellt und Ergebnisdaten erzeugt werden müssen, ist mit einem Arbeitsaufwand von etwa 3 Monaten zu rechnen, um für die Agrarflächen Deutschlands aktualisierte Daten zu produzieren.

Welche Unsicherheiten gibt es durch die Nutzung von C-Modellen? Welche default-Werte sind in der Berechnung enthalten?

Beim Gebrauch von Vegetationsmodellen wie dem BETHY/DLR spielt die Fehlerfortpflanzung eine zentrale Rolle. Modellintern werden einige wenige pflanzenphysiologische Parameter als konstante Werte angenommen. Auch wird die Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre bisher als konstant angenommen. Untersuchungen haben gezeigt, dass beispielsweise eine Variation der maximal zulässigen Elektronentransportrate, einem maßgeblichem Parameter zur Beschreibung der Photosynthese, um 50% eine Veränderung des Ergebnisses von bis zu 30% hervorrufen kann.

Weitere Unsicherheiten ergeben sich aus den verwendeten Eingangsdaten. Analysen haben gezeigt, dass beispielsweise die minimale und maximale Tagestemperatur in den verwendeten ECMWF Daten um bis zu 28% unterschätzt wird. Die Niederschlagsdaten weisen sogar noch größere Fehler auf. Weitere Analysen über die Genauigkeit der verwendeten Eingangsdaten wurden noch nicht durchgeführt.

Welchen Beitrag kann die Fernerkundung leisten, um nachhaltige Potenziale zu generieren (in denen z. B. Fragen des Humushaushalts berücksichtigt werden)?

Die Methodik der Fernerkundung stellt aufgrund seiner hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung einen wichtigen Stellenwert zur Erfassung von Landoberflächenveränderungen und der Ableitung von Vegetationsparametern dar. Durch die Kopplung von Fernerkundungsdaten mit hochentwickelten Vegetationsmodellen wie dem BETHY/DLR können detaillierte Produkte generiert werden. Diese werden in naher Zukunft zum einen erlauben, Vorhersagen über zu erwartende Energiepotenziale zu treffen, zum anderen können auch wirtschaftliche Fragestellungen wie Transportwege und Primärnutzung von Reststoffen berücksichtigt werden.

Welche Entwicklungen sind im Bereich der LCLU-Erfassung zu erwarten (Klassifizierung von Feldfrüchten und direkte Zuweisung von Potenzialen)?

Im Bereich der Generierung regionaler oder globaler LCLU Produkte ist davon auszugehen, dass bestehende Produkte weiterverfolgt und sukzessive aktualisiert werden, insbesondere im Rahmen der GMES-Projekte geoland, geoland2, gse-land and gse-forest-monitoring. Bisher existieren lediglich wenige globale (GLC2000, MODIS Landcover, GlobCover) oder regionale (CORINE) Produkte, die im besten Falle im Fünf-Jahres-Zyklus aktualisiert werden. Wünschenswert wäre es auf mittelaufgelöste (z. B. 300m x 300m) LCCs mit jährlicher Aktualisierung zurückgreifen zu können.

Die direkte Klassifizierung von Feldfrüchten erweist sich derzeit noch als schwer, da zur Ableitung eines LCC Produktes wenige Satellitenbilder eines oder mehrerer Referenzjahre genutzt werden, um anhand von spektralen Signaturen Vegetationstypen unterscheiden zu können. Eine Klassifikation von speziellen Feldfrüchten erscheint nur dann als möglich, wenn hoch aufgelöste Zeitreihen (z. B. 100m x 100m) über den LAI oder NDVI oder weiterer Indices genutzt werden, um über die Entwicklung der Vegetation Aussagen zu treffen. Auch hierbei besteht das Problem, dass Feldfrüchte unterschiedlicher Art teilweise sehr ähnliche Signale produzieren und daher schwer zu unterscheiden sind. So weist der Winterweizen

und die Wintergerste, aufgrund der Anbaupraktiken, eine nahezu gleich verlaufende Phänologie auf. Gleiches gilt für die Kartoffel, Zuckerrübe und den Mais. Jedoch ist im Rahmen des GMES-geoland Projekts und speziell im Teilprojekt Agri-Environmental-Monitoring zu erwarten, dass mit hochaufgelösten Fernerkundungssensoren die landwirtschaftliche Praxis erfassbar wird.

Eine einfache bereits bestehende Methode, um direkt aus Fernerkundungsdaten auf Energiepotenziale schließen zu können, ist die Methode des kumulativen NDVI. Hierbei wird für jede Grid-Zelle die gemessene Zeitreihe des NDVIs aufsummiert, um eine Aussage darüber zu treffen wie grün es über das gesamte Jahr war. Der Wert kann direkt in Bezug zur hinzu gewachsenen Biomasse gesetzt werden, muss jedoch für jedes Untersuchungsgebiet wieder neu justiert werden.

Welcher Trend, welche Entwicklungen sind im Bereich der Potenzialermittlung mittels Fernerkundung zukünftig zu erwarten?

Momentane Produkte zu Energiepotentialen enthalten meist Informationen auf nationaler Skala oder auf Länderebene. Aktuelle Arbeiten ermitteln für einzelne Länder die Potentiale auf Landkreisebene. Einen direkten Vergleich in hoher Auflösung aller Agrarländer Europas beispielsweise gibt es bisher noch nicht. Die voranschreitende Technik der Fernerkundung gemeinsam mit den Entwicklungen der Computertechnik ermöglicht es, künftig solche großskaligen Berechnungen in höherer Auflösung durchzuführen. Dadurch kann die Planbarkeit und Entscheidungsfindung im Bereich der Bioenergiewirtschaft unterstützt werden.

Was sind die Pros und Contras von dynamischen vs. mechanischen Modellansätzen (Kosten, Aufwand, Datengrundlage, Erfahrungswerte, Vergleichbarkeit, Belastbarkeit, Fehlerquelle, etc.)?

Der grundsätzliche Unterschied zwischen dynamischen und mechanistischen Modellen ist der Grad der Komplexität der Formulierung. Dynamische Modelle bedienen sich eines Zusammenspiels zwischen klimatischen Bedingungen und phänologischer Entwicklung in deren Abhängigkeit die photosynthetischen Prozesse zeitlich hoch aufgelöst (1h) berechnet werden. Somit kann mit dynamischen Modellen ein Tages-, Wochen-, Monats- oder Jahresgang der Bindung von Biomasse dargestellt werden.

In mechanistischen Modellen hingegen wird der Kohlenstoffumsatz der Pflanzen in linearer Abhängigkeit von Eingangsgrößen wie Blattflächenindex oder einfallender Solarstrahlung aus empirischen Beziehungen berechnet. Daher ist hier die räumliche und zeitliche Auflösung der Modellergebnisse gegeben durch die Auflösung der Eingangsdaten. Eingangsdaten wie der Blattflächenindex sind in der Regel als Komposite mehrerer Tage, Wochen oder Monate verfügbar. Daher ist eine Berechnung des Tages- oder Wochenganges mit diesen Modellen nicht möglich. Die Schwachstelle, die sich daraus ergibt, ist die Vernachlässigung der kurzfristigen Auswirkung von Stressfaktoren auf die Produktivität der Pflanze.

Aufgrund der höheren Komplexität von dynamischen Modellen ist hier auch mit einem höheren zeitlichen Aufwand für die Anwendung zu rechnen. Mit der höheren zeitlichen Auflösung der Berechnung werden auch vor allem die klimatologischen Eingangsdaten in entsprechend hoher Auflösung benötigt, oder in geeigneter Weise auf die nötige Auflösung interpoliert.

Zum Vergleich der Ergebnisse der beiden Ansätze müssen die Resultate zunächst in eine einheitliche zeitliche Auflösung gebracht werden. Bei Wochen oder Monatssummen gibt es dann Abweichungen,

wenn wie oben beschrieben kurzfristige klimabedingte Störungen in den mechanistischen Betrachtungen nicht berücksichtigt werden. Bei Betrachtung von Jahressummen mitteln sich in der Regel diese Unter- oder Überschätzungen des Zuwachses der Biomasse statistisch heraus, womit hier die Ergebnisse der beiden Ansätze vergleichbar werden.

Wurden die Ergebnisse (z. B. die Potenzial-Allokation im 1km-Raster) von BETHY validiert/ vor Ort untersucht?)

Die modellierte NPP wurde anhand von statistischen Daten über den Kornertrag und die Flächennutzung ausgewählter Feldfrüchte validiert. Die Daten wurden vom Statistischen Bundesamt für Statistik bereitgestellt und liegen auf NUTS-3 Ebene vor. Mit Hilfe geeigneter Konversionsfaktoren über das Verhältnis Korn-zu-Stroh wurde zunächst auf die oberirdische Biomasse geschlossen. In einem zweiten Schritt wurde wiederum mit Hilfe von Konversionsfaktoren über das Verhältnis unterirdische-zu-oberirdische Biomasse auf die Gesamtpflanze geschlossen. Nach Subtraktion des spezifischen Wassergehaltes und der Nicht-Kohlenstoffanteile jeder Feldfrucht konnte so direkt die modellierte NPP validiert werden. Somit konnte für die Ackerflächen Deutschlands eine leichte Unterschätzung der modellierten NPP mit einer Korrelation von bis zu 0.79 bestimmt werden.

Zur Ableitung des Strohpotentials wurde ein reziproker Weg gewählt, um von der NPP mithilfe der gleichen Konversionsfaktoren (unterirdischer-zu-oberirdischer Biomasse und Korn-zu-Stroh) auf das theoretische Strohpotential auf NUTS-3 zu schließen.

Mit Hilfe von statistischen Methoden wurden anschließend die aggregierten Werte wieder auf die höhere Auflösung von 1km x 1km allokiert. Eine Validation dieser Methode hat nicht stattgefunden.

A.3 Bereitstellungsketten

Tabelle A 5: Bereitstellungskette *Basis* für Anlagenkonzept Heizwerk (245 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil <i>a</i> am Prozessschritt und Zeitbedarf <i>t</i> für die Arbeiterledigung in h je t (atro)			
	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
Vorkonzentrieren	$a = 0,6 \quad t = 0,0371$	$a = 0,2 \quad t = 0,0379$	$a = 0,2 \quad t = 0,0379$	
Umschlag Feld - Transportmittel	$a = 0,6 \quad t = 0,0584$	$a = 0,2 \quad t = 0,0591$	$a = 0,2 \quad t = 0,0591$	
Transport Feld - Lager Konversionsanlage	Standardtraktor mit Plattformanhänger $a = 1,0 \quad t = 0,0170$			
Umschlag Transportmittel - Lager Konversionsanlage	Teleskoplader $a = 0,6 \quad t = 0,0428$	Radlader $a = 0,4 \quad t = 0,0428$		

Tabelle A 6: Bereitstellungskette *Basis* für Anlagenkonzept Biogasanlage (1 943 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil <i>a</i> am Prozessschritt und Zeitbedarf <i>t</i> für die Arbeiterledigung in h je t (atro)			
	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
Vorkonzentrieren	$a = 0,6 \quad t = 0,0371$	$a = 0,2 \quad t = 0,0379$	$a = 0,2 \quad t = 0,0379$	
Umschlag Feld - Transportmittel	$a = 0,6 \quad t = 0,0584$	$a = 0,2 \quad t = 0,0591$	$a = 0,2 \quad t = 0,0591$	
Transport Feld - Lager Konversionsanlage	Standardtraktor mit Plattformanhänger $a = 1,0 \quad t = 0,0478$			
Umschlag Transportmittel - Lager Konversionsanlage	Teleskoplader $a = 0,6 \quad t = 0,0428$	Radlader $a = 0,4 \quad t = 0,0428$		

Tabelle A 7: Bereitstellungskette *Basis* für Anlagenkonzept Heizkraftwerk (12 900 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil <i>a</i> am Prozessschritt und Zeitbedarf <i>t</i> für die Arbeiterledigung in h je t (atro)			
	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
Vorkonzentrieren	$a = 0,6 \quad t = 0,0371$	$a = 0,2 \quad t = 0,0379$	$a = 0,2 \quad t = 0,0379$	
Umschlag Feld - Transportmittel	$a = 0,6 \quad t = 0,0584$	$a = 0,2 \quad t = 0,0591$	$a = 0,2 \quad t = 0,0591$	
Transport Feld - Zwischenlager	Standardtraktor mit Plattformanhänger $a = 1,0 \quad t = 0,0174$			
Umschlag Transportmittel - Zwischenlager	Standardtraktor mit Frontlader $a = 0,6 \quad t = 0,0432$	Teleskoplader $a = 0,2 \quad t = 0,0435$	Radlader $a = 0,2 \quad t = 0,0435$	
Lagerung	Offene Feldmiete $a = 0,2$	Feldmiete mit Folienabdeckung $a = 0,6$	Scheune (Altbau) $a = 0,1$	Leichtbauhalle $a = 0,1$
Umschlag Zwischenlager - Transportmittel	Standardtraktor mit Frontlader $a = 0,6 \quad t = 0,0432$	Teleskoplader $a = 0,2 \quad t = 0,0435$	Radlader $a = 0,2 \quad t = 0,0435$	

Transport Zwischenlager - Konversionsanlage	LKW im Plattform- Gliederzug	LKW im Plattform- Sattelzug	
	a = 0,5 t = 0,0633	a = 0,5 t = 0,0633	
Umschlag Trans- portmittel - Lager Konversionsanlage	Teleskoplader	Radlader	
	a = 0,6 t = 0,0428	a = 0,4 t = 0,0428	

Tabelle A 8: Bereitstellungskette Basis für Anlagenkonzept Pelletieranlage (40 000 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil a am Prozessschritt und Zeitbedarf t für die Arbeiterledigung in h je t (atro)			
Vorkonzentrieren	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	a = 0,6 t = 0,0371	a = 0,2 t = 0,0379	a = 0,2 t = 0,0379	
Umschlag Feld - Transportmittel	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	a = 0,6 t = 0,0584	a = 0,2 t = 0,0591	a = 0,2 t = 0,0591	
Transport Feld - Zwischenlager	Standardtraktor mit Plattformanhänger			
	a = 1,0 t = 0,0174			
Umschlag Transportmittel - Zwischenlager	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	a = 0,6 t = 0,0432	a = 0,2 t = 0,0435	a = 0,2 t = 0,0435	
Lagerung	Offene Feldmiete	Feldmiete mit Folienabdeckung	Scheune (Altbau)	Leichtbauhalle
	a = 0,2	a = 0,6	a = 0,1	a = 0,1
Umschlag Zwischenlager - Transportmittel	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	a = 0,6 t = 0,0432	a = 0,2 t = 0,0435	a = 0,2 t = 0,0435	
Transport Zwischenlager - Konversionsanlage	LKW im Plattform- Gliederzug	LKW im Plattform- Sattelzug		
	a = 0,5 t = 0,1245	a = 0,5 t = 0,1245		
Umschlag Trans- portmittel - Lager Konversionsanlage	Portalkran			
	a = 1,0 t = 0,0157			

Tabelle A 9: Bereitstellungskette Basis für Anlagenkonzept Pyrolyseanlage (200 000 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil a am Prozessschritt und Zeitbedarf t für die Arbeiterledigung in h je t (atro)			
Vorkonzentrieren	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	a = 0,6 t = 0,0371	a = 0,2 t = 0,0379	a = 0,2 t = 0,0379	
Umschlag Feld - Transportmittel	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	a = 0,6 t = 0,0584	a = 0,2 t = 0,0591	a = 0,2 t = 0,0591	
Transport Feld - Zwischenlager	Standardtraktor mit Plattformanhänger			
	a = 1,0 t = 0,0174			
Umschlag Transportmittel - Zwischenlager	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	a = 0,6 t = 0,0432	a = 0,2 t = 0,0435	a = 0,2 t = 0,0435	
Lagerung	Offene Feldmiete	Feldmiete mit Folienabdeckung	Scheune (Altbau)	Leichtbauhalle
	a = 0,2	a = 0,6	a = 0,1	a = 0,1
Umschlag Zwischenlager - Transportmittel	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	a = 0,6 t = 0,0432	a = 0,2 t = 0,0435	a = 0,2 t = 0,0435	

Transport Zwischenlager - Konversionsanlage	LKW im Plattform- Gliederzug	LKW im Plattform- Sattelzug	
	$a = 0,5$ $t = 0,2979$	$a = 0,5$ $t = 0,2979$	
Umschlag Trans- portmittel - Lager Konversionsanlage	Portalkran		
	$a = 1,0$ $t = 0,0157$		

Tabelle A 10: Bereitstellungskette *Basis* für Anlagenkonzept Ethanolanlage (300 000 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil a am Prozessschritt und Zeitbedarf t für die Arbeitserledigung in h je t (atro)			
Vorkonzentrieren	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	$a = 0,6$ $t = 0,0371$	$a = 0,2$ $t = 0,0379$	$a = 0,2$ $t = 0,0379$	
Umschlag Feld - Transportmittel	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	$a = 0,6$ $t = 0,0584$	$a = 0,2$ $t = 0,0591$	$a = 0,2$ $t = 0,0591$	
Transport Feld - Zwischenlager	Standardtraktor mit Plattformanhänger			
	$a = 1,0$ $t = 0,0174$			
Umschlag Transportmittel - Zwischenlager	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	$a = 0,6$ $t = 0,0432$	$a = 0,2$ $t = 0,0435$	$a = 0,2$ $t = 0,0435$	
Lagerung	Offene Feldmiete	Feldmiete mit Folienabdeckung	Scheune (Altbau)	Leichtbauhalle
	$a = 0,2$	$a = 0,6$	$a = 0,1$	$a = 0,1$
Umschlag Zwischenlager - Transportmittel	Standardtraktor mit Frontlader	Teleskoplader	Radlader	
	$a = 0,6$ $t = 0,0432$	$a = 0,2$ $t = 0,0435$	$a = 0,2$ $t = 0,0435$	
Transport Zwischenlager - Konversionsanlage	LKW im Plattform- Gliederzug	LKW im Plattform- Sattelzug		
	$a = 0,6$ $t = 0,3683$	$a = 0,2$ $t = 0,3683$		
Umschlag Trans- portmittel - Lager Konversionsanlage	Portalkran			
	$a = 1,0$ $t = 0,0157$			

Tabelle A 11: Bereitstellungskette *Optimiert* für Anlagenkonzept Heizwerk (245 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil a am Prozessschritt und Zeitbedarf t für die Arbeitserledigung in h je t (atro)	
Vorkonzentrieren		
Umschlag Feld - Transportmittel	Standardtraktor mit Ballensammelwagen	
Transport Feld - Lager Konversionsanlage		
Umschlag Trans- portmittel - Lager Konversionsanlage		
		$a = 1,0$ $t = 0,1144$

Tabelle A 12: Bereitstellungskette *Optimiert* für Anlagenkonzept Biogasanlage (1 943 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil am Prozessschritt und Zeitbedarf für die Arbeitserledigung in h je t (atro)	
Vorkonzentrieren	Teleskoplader	
	$a = 1,0$ $t = 0,0379$	
Umschlag Feld - Transportmittel	Teleskoplader	
	$a = 1,0$ $t = 0,0591$	
Transport Feld - Lager Konversionsanlage	LKW im Plattform-Gliederzug	
	$a = 1,0$ $t = 0,0299$	
Umschlag Transportmittel - Lager Konversionsanlage	Teleskoplader	
	$a = 1,0$ $t = 0,1622$	

Tabelle A 13: Bereitstellungskette *Optimiert* für Anlagenkonzept Heizkraftwerk (12 900 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil am Prozessschritt und Zeitbedarf für die Arbeitserledigung in h je t (atro)	
Vorkonzentrieren		
Umschlag Feld - Transportmittel	Standardtraktor mit Ballensammelwagen	
Transport Feld - Zwischenlager		
Umschlag Transportmittel - Zwischenlager		
		$a = 1,0$ $t = 0,1278$
Lagerung	Offene Feldmiete	
Umschlag Zwischenlager - Transportmittel	Teleskoplader	
		$a = 1,0$ $t = 0,0435$
Transport Zwischenlager - Konversionsanlage	LKW im Plattform-Gliederzug	
		$a = 0,5$ $t = 0,0633$
Umschlag Transportmittel - Lager Konversionsanlage	Teleskoplader	
		$a = 1,0$ $t = 0,0428$

Tabelle A 14: Bereitstellungskette *Optimiert* für Anlagenkonzept Pelletieranlage (40 000 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil am Prozessschritt und Zeitbedarf für die Arbeitserledigung in h je t (atro)	
Vorkonzentrieren	Standardtraktor mit Ballensammelwagen	

Umschlag Feld - Transportmittel		
Transport Feld - Zwischenlager		
Umschlag Transportmittel - Zwischenlager	$a = 1,0$ $t = 0,1278$	
Lagerung	Offene Feldmiete $a = 1,0$	
Umschlag Zwischenlager - Transportmittel	Teleskoplader $a = 1,0$ $t = 0,0435$	
Transport Zwischenlager - Konversionsanlage	LKW im Plattform- Gliederzug $a = 0,5$ $t = 0,1245$	
Umschlag Trans- portmittel - Lager Konversionsanlage	Portalkran $a = 1,0$ $t = 0,0157$	

Tabelle A 15: Bereitstellungskette *Optimiert* für Anlagenkonzept Pyrolyseanlage (200 000 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil am Prozessschritt und Zeitbedarf für die Arbeitserledigung in h je t (atro)	
Vorkonzentrieren		
Umschlag Feld - Transportmittel	Standardtraktor mit Ballensammel-wagen	
Transport Feld - Zwischenlager		
Umschlag Transportmittel - Zwischenlager		$a = 1,0$ $t = 0,1278$
Lagerung	Offene Feldmiete $a = 1,0$	
Umschlag Zwischenlager - Transportmittel	Teleskoplader $a = 1,0$ $t = 0,0435$	
Transport Zwischenlager - Konversionsanlage	LKW im Plattform- Gliederzug $a = 0,5$ $t = 0,2979$	
Umschlag Trans- portmittel - Lager Konversionsanlage	Portalkran $a = 1,0$ $t = 0,0157$	

Tabelle A 16: Bereitstellungskette *Optimiert* für Anlagenkonzept Ethanolanlage (300 000 t (atro))

Prozessschritte	Eingesetzte Maschinen(kombinationen) mit jeweiligem Anteil am Prozessschritt und Zeitbedarf für die Arbeitserledigung in h je t (atro)	
Vorkonzentrieren	Standardtraktor mit Ballensammel-wagen	

Umschlag Feld - Transportmittel		
Transport Feld - Zwischenlager		
Umschlag Transportmittel - Zwischenlager	$a = 1,0 \quad t = 0,1278$	
	Offene Feldmiete	
Lagerung	$a = 1,0$	
Umschlag Zwischenlager - Transportmittel	Teleskoplader $a = 1,0 \quad t = 0,0435$	
Transport Zwischenlager - Konversionsanlage	LKW im Plattform- Gliederzug $a = 0,5 \quad t = 0,3683$	
Umschlag Trans- portmittel - Lager Konversionsanlage	Portalkran $a = 1,0 \quad t = 0,0157$	

A.4 Anhang THG

Tabelle A 17: Heizwert und Masseanteile für Haupt- und Nebenprodukte laut Düngeverordnung [71] für Fruchtarten

	Heizwert (MJ/kg _{TS})	Quelle	HEP* TS an FM	NEP** TS an FM	HEP/NEP
Körnermais	16,51	TU Wien (1993)	0,86	0,86	1
Weizenkörner	17,00	FNR 2005	0,86	0,86	0,8
Weizenstroh	17,20	FNR 2005	0,86	0,86	0,8
Roggenkörner	17,10	FNR 2005	0,86	0,86	0,9
Roggenstroh	17,40	FNR 2005	0,86	0,86	0,9
Gerstenkörner	17,00	wie Weizen...	0,86	0,86	0,7
Gerstenstroh	17,50	FNR 2005	0,86	0,86	0,7
Gerstenkörner (Braugerste)	17,00	wie Weizen...	0,86	0,86	0,7
Gerstenstroh (Braugerste)	17,50	FNR 2005	0,86	0,86	0,7
Haferkörner	17,00	wie Weizen...	0,86	0,86	1,1
Haferstroh	17,01	TU Wien (1993)	0,86	0,86	1,1
Triticalekörner	16,90	FNR 2005	0,86	0,86	0,9
Triticalestroh	17,10	FNR 2005	0,86	0,86	0,9
Raps (Körner)	26,50	FNR 2005	0,91	0,86	1,7
Kartoffeln	17	Schätzwert	0,22	0,15	0,2
Zuckerrüben	16,40	nach FNR	0,23	0,18	0,7
Futtererbsen	17	Schätzwert	0,86	0,86	1
Ackerbohnen	17	Schätzwert	0,86	0,86	1
Silomais	16,00	KTBL (2006)	0,28		
Klee, Klee gras und Klee-Luzerne-Gemisch	17,29	TU Wien (1993)	0,2		
Luzerne / Luzernegras	16	Schätzwert	0,2		
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	16,5	FNR 2005	0,2		
Winterzwischenfrucht	-		0,15		
Brache, Selbstbegrünung ab Herbst	-				

- Keine Entnahme, *HEP : Haupternte produkt, ** NEP Nebenernte produkte

Tabelle A 18: Bodenkohlenstoff-Koeffizienten (Anbau) für VDLUFAu, VDLUFAo und HE-Methode (nach REPRO)

	VDLUFAu		VDLUFAo		HE-Methode (nach REPRO)			Stroh: C-Humus kg/ tTS
	Anbau: C-Humus	Stroh: C-Humus	Anbau: C-Humus	Stroh: C-Humus	Anbau: C-Humus	„Standard“	Max.	
	kg/ha	kg/tFM	kg/ha	kg/ tFM	kg/ha	kg/ha	kg/ha	
Körnermais	-560	100	-800	100	-203	-406	-609	92,8
Weizenkörner (W)	-280	100	-400	100	-203	-406	-609	92,8
Weizenstroh (W)	0	-100	0	-100	0	0	0	-92,8
Weizenkörner (S)	-280	100	-400	100	-203	-406	-609	92,8
Weizenstroh (S)	0	-100	0	-100	0	0	0	-92,8
Roggenkörner	-280	100	-400	100	-203	-406	-609	81,2
Roggenstroh	0	-100	0	-100	0	0	0	-81,2
Gerstenkörner (W)	-280	100	-400	100	-203	-406	-609	81,2
Gerstenstroh (W)	0	-100	0	-100	0	0	0	-81,2
Gerstenkörner	-280	100	-400	100				
Braugerste					-203	-406	-609	81,2
Gerstenstroh	0		-100	0				
(Braugerste)					0	0	0	-81,2
Haferkörner	-280	100	-400	100	-203	-406	-609	81,2
Haferkörner	0	-100	0	-100	0	0	0	-81,2
Triticalekörner	-280	100	-400	100	-203	-406	-609	81,2
Triticalestroh	-280	100	-400	100	0	0	0	-81,2

Raps (Körner)	-280	100	-400	100	-203	-406	-609	69,6
Kartoffeln	-760	0	-1000	0	-522	-1044	-1566	43,5
Zuckerrüben	-760	8	-1300	8	-667	-1334	-2001	43,5
Futtererbsen	160	0	240	0	43,5	87	130,5	69,6
Ackerbohnen	160	0	240	0	43,5	87	130,5	69,6
Silomais	-560	0	-800	0	-391,5	-783	-1174,5	0
Klee, Klee gras	600	16	800	16				
Klee-Luzerne-Gemisch					522	1044	1566	58
Luzerne	600	16	800	16				
Luzerne gras					435	870	1305	58
Feld gras	600	16	800	16				
Grasanbau auf dem Ackerland					261	522	783	58
Winterzwischenfrucht	120	16	160	16	145	290	435	58
Brache,	180	16	180	16				
Selbstbegrünung ab Herbst					43,5	87	130,5	58

Tabelle A 19: Bodenkohlenstoff-Koeffizienten (organischer Dünger) für VDLUFA_n, VDLUFA₀ und HE-Methode (nach REPRO).

Organischer Dünger	Koeffizient	Einheit
VDLUFA		
Stallmist frisch TM 20	28	kg Humus-C / tFM
Stallmist frisch TM 30	40	kg Humus-C / tFM
Stallmist verrottet TM 25	40	kg Humus-C / tFM
Stallmist verrottet TM 35	56	kg Humus-C / tFM
Stallmist kompostiert TM 35	62	kg Humus-C / tFM
Stallmist kompostiert TM 55	96	kg Humus-C / tFM
Gülle Schwein TM 4	4	kg Humus-C / tFM
Gülle Schwein TM 8	8	kg Humus-C / tFM
Gülle Rind TM 4	6	kg Humus-C / tFM
Gülle Rind TM 7	9	kg Humus-C / tFM
Gülle Rind TM 10	12	kg Humus-C / tFM
Geflügel (Kot) TM 15	12	kg Humus-C / tFM
Geflügel (Kot) TM 25	22	1 kg Humus-C / tFM
Geflügel (Kot) TM 35	30	kg Humus-C / tFM
Geflügel (Kot) TM 45	38	kg Humus-C / tFM
REPRO	145	kg Humus-C / tFM
Stallmist frisch Rind	116	kg Humus-C / tFM
Stallmist frisch Schwein	162,4	kg Humus-C / tFM
Stallmist verrottet Rind	145	kg Humus-C / tFM

Stallmist verrottet Schwein	174	kg Humus-C / tFM
Stallmist kompostiert Rind	116	kg Humus-C / tFM
Gülle Rind	104,4	kg Humus-C / tFM
Gülle Schwein	116	kg Humus-C / tFM
Geflügel	145	kg Humus-C / tFM

Tabelle A 20: Variante IST-ohne. Übersicht der der Bilanzierung.

Variante IST-ohne	Fläche		Ertrag				THG-Bilanz (g CO ₂ -Äq./MJ)											
	(ha)	Masse (t _{TS} /ha)	Masse (t _{TS})	Heizwert (MJ/ha)	Heizwert (MJ)	Anbau					Humus						THG TOTAL	
						Diesel + Umlage	Dünger	Pesti- zide	Lach- gas	Gesamt o.Humus	HP	Umlage Brache	Umlage WZF	Umlage org. Dün.	HP mit Umlage	NP		Humus gesamt
VDLUFau																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,25	-0,22	-2,26	-2,15	4,62	-20,08	-15,46	5,98
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	8,79	-0,21	-2,15	-2,04	4,39	-17,57	-13,18	2,87
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	9,37	-0,23	-2,29	-2,17	4,68	-27,61	-22,93	-11,28
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,29	20,62	0,64	14,31	38,87	13,32	-0,32	-3,25	-3,09	6,65	-25,87	-19,22	19,65
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	10,27	-0,09	-0,92	-0,88	8,38	-5,45	2,93	14,04
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	8,8	1402,0	149,0	23.661	2,01	8,14	0,35	6,00	16,50	9,78	-0,17	-1,69	-1,60	6,33	-13,91	-7,58	8,92
VDLUFao																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	13,21	-0,22	-2,58	-2,15	8,26	-20,08	-11,82	9,62
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	12,55	-0,21	-2,45	-2,04	7,85	-17,57	-9,73	6,33
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	13,39	-0,23	-2,62	-2,17	8,37	-27,61	-19,24	-7,59
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,29	20,62	0,64	14,31	38,87	19,02	-0,32	-3,72	-3,09	11,89	-25,87	-13,98	24,89
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	17,57	-0,09	-1,06	-0,88	15,54	-5,45	10,09	21,21
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	8,8	1402,0	149,0	23.661	2,01	8,14	0,35	6,00	16,50	15,27	-0,17	-1,93	-1,60	11,57	-13,91	-2,33	14,17
HE-Methode																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,77	-0,18	-1,12	-2,11	6,36	-16,03	-9,67	11,77
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	11,10	-0,17	-1,07	-2,00	7,86	-12,27	-4,41	11,64
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	17,08	-0,18	-1,14	-2,14	13,63	-19,28	-5,66	6,00
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,29	20,62	0,64	14,31	38,87	16,00	-0,26	-1,62	-3,03	11,09	-16,39	-5,30	33,57
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	21,16	-0,07	-0,46	-0,86	19,77	-6,81	12,95	24,07
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	8,8	1402,0	149,0	23.661	2,01	8,14	0,35	6,00	16,50	15,42	-0,13	-0,84	-1,57	12,88	-11,86	1,02	17,52

Tabelle A 21: Variante IST-Stroh. Übersicht der der Bilanzierung.

Variante IST-Stroh	Fläche	Ertrag				THG-Bilanz (g CO ₂ -Äq./MJ)												
	(ha)	Masse (t _{TS} /ha)	Masse (t _{TS})	Heizwert (MJ/ha)	Heizwert (MJ)	Anbau					Humus						THG TOTAL	
						Diesel + Umlage	Dünger	Pesti- zide	Lach- gas	Gesamt o.Humus	HP	Umlage Brache	Umlage WZF	Umlage org. Dün.	HP mit Umlage	NP		Humus gesamt
VDLUFau																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,25	-0,22	-2,26	-2,15	4,62	-20,08	-15,46	5,98
Weizenstroh (W)	90	3,5	310,6	59,4	5.342	0,23	1,72	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,81	24,81	26,76
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	8,79	-0,21	-2,15	-2,04	4,39	-17,57	-13,18	2,87
Gerstenstroh (W)	12,25	3,2	38,9	55,6	681	0,25	1,69	0,00	0,00	1,94	0,00	0,00	0,00	0,00	24,39	24,39	26,32	
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	9,37	-0,23	-2,29	-2,17	4,68	-27,61	-22,93	-11,28
Haferstroh	10	4,7	46,8	79,7	797	0,17	1,74	0,00	0,00	1,91	0,00	0,00	0,00	0,00	25,09	25,09	27,00	
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,29	20,62	0,64	14,31	38,87	13,32	-0,32	-3,25	-3,09	6,65	-25,87	-19,22	19,65
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	10,27	-0,09	-0,92	-0,88	8,38	-5,45	2,93	14,04
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	11,3	1798,3	192,0	30.481	1,61	6,70	0,27	4,66	13,24	7,59	-0,13	-1,31	-1,24	4,91	-5,25	-0,33	12,91
VDLUFao																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	13,21	-0,22	-2,58	-2,15	8,26	-20,08	-11,82	9,62
Weizenstroh (W)	37,502	3,5	129,4	59,4	2.226	0,23	1,72	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	24,81	24,81	26,76	
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	12,55	-0,21	-2,45	-2,04	7,85	-17,57	-9,73	6,33
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	13,39	-0,23	-2,62	-2,17	8,37	-27,61	-19,24	-7,59
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,29	20,62	0,64	14,31	38,87	19,02	-0,32	-3,72	-3,09	11,89	-25,87	-13,98	24,89
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	17,57	-0,09	-1,06	-0,88	15,54	-5,45	10,09	21,21
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Summe	158,75	9,6	1531,4	163,1	25.887	1,85	7,59	0,32	5,49	15,25	13,95	-0,15	-1,76	-1,46	10,58	-10,58	0,00	15,25
HE-Methode																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,77	-0,18	-1,12	-2,11	6,36	-16,03	-9,67	11,77
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	11,10	-0,17	-1,07	-2,00	7,86	-12,27	-4,41	11,64
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	17,08	-0,18	-1,14	-2,14	13,63	-19,28	-5,66	6,00
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,29	20,62	0,64	14,31	38,87	16,00	-0,26	-1,62	-3,03	11,09	-16,39	-5,30	33,57
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	21,16	-0,07	-0,46	-0,86	19,77	-6,81	12,95	24,07
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Summe	158,75	8,8	1402,0	149,0	23.661	2,01	8,14	0,35	6,00	16,50	15,42	-0,13	-0,84	-1,57	12,88	-11,86	1,02	17,52

Tabelle A 22: Variante WZF-ohne. Übersicht der der Bilanzierung.

Variante WZF-ohne	Ertrag		THG-Bilanz (g CO ₂ -Äq./MJ)															
	(ha)	Masse (t _{TS} /ha)	Masse (t _{TS})	Heizwert (MJ/ha)	Heizwert (MJ)	Anbau					Humus						THG TOTAL	
						Diesel + Umlage	Dünger	Pesti- zide	Lach- gas	Gesamt o.Humus	HP	Umlage Brache	Umlage WZF	Umlage org. Dün.	HP mit Umlage	NP		Humus gesamt
VDLUFau																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,88	10,15	0,45	8,03	21,51	9,25	-0,22	-2,84	-2,15	4,04	-20,08	-16,05	5,47
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,06	7,62	0,40	6,03	16,12	8,79	-0,21	-2,70	-2,04	3,83	-17,57	-13,74	2,38
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,93	5,45	0,03	4,31	11,73	9,37	-0,23	-2,88	-2,17	4,09	-27,61	-23,52	-11,80
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,39	20,62	0,64	14,31	38,97	13,32	-0,32	-4,09	-3,09	5,81	-25,87	-20,06	18,91
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,21	5,88	0,27	3,78	11,14	10,27	-0,09	-1,16	-0,88	8,14	-5,45	2,69	13,83
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	8,8	1402,0	149,0	23.661	2,06	8,14	0,35	6,00	16,55	9,78	-0,17	-2,12	-1,60	5,90	-13,91	-8,01	8,54
VDLUFao																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,88	10,15	0,45	8,03	21,51	13,21	-0,22	-3,25	-2,15	7,59	-20,08	-12,49	9,02
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,06	7,62	0,40	6,03	16,12	12,55	-0,21	-3,09	-2,04	7,21	-17,57	-10,36	5,76
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,93	5,45	0,03	4,31	11,73	13,39	-0,23	-3,29	-2,17	7,69	-27,61	-19,92	-8,19
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,39	20,62	0,64	14,31	38,97	19,02	-0,32	-4,68	-3,09	10,93	-25,87	-14,94	24,03
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,21	5,88	0,27	3,78	11,14	17,57	-0,09	-1,33	-0,88	15,27	-5,45	9,82	20,96
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	8,8	1402,0	149,0	23.661	2,06	8,14	0,35	6,00	16,55	15,27	-0,17	-2,42	-1,60	11,08	-13,91	-2,83	13,72
HE-Methode																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,88	10,15	0,45	8,03	21,51	9,77	-0,18	-1,41	-2,11	6,07	-16,03	-9,96	11,55
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,06	7,62	0,40	6,03	16,12	11,10	-0,17	-1,34	-2,00	7,59	-12,27	-4,69	11,43
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,93	5,45	0,03	4,31	11,73	17,08	-0,18	-1,43	-2,14	13,33	-19,28	-5,95	5,78
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,39	20,62	0,64	14,31	38,97	16,00	-0,26	-2,04	-3,03	10,67	-16,39	-5,72	33,25
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,21	5,88	0,27	3,78	11,14	21,16	-0,07	-0,58	-0,86	19,65	-6,81	12,83	23,97
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	8,8	1402,0	149,0	23.661	2,06	8,14	0,35	6,00	16,55	15,42	-0,13	-1,05	-1,57	12,66	-11,86	0,80	17,36

Tabelle A 23: Variante WZF-Stroh. Übersicht der der Bilanzierung.

Variante WZF-Stroh	Fläche	Ertrag				THG-Bilanz (g CO ₂ -Äq./MJ)												
	(ha)	Masse (t _{TS} /ha)	Masse (t _{TS})	Heizwert (MJ/ha)	Heizwert (MJ)	Anbau					Humus						THG TOTAL	
						Diesel + Umlage	Dünger	Pesti- zide	Lach- gas	Gesamt o.Humus	HP	Umlage Brache	Umlage WZF	Umlage org. Dün.	HP mit Umlage	NP		Humus gesamt
VDLUFau																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,88	10,15	0,45	8,03	21,51	9,25	-0,22	-2,84	-2,15	4,04	-20,08	-16,05	5,47
Weizenstroh (W)	90	3,5	310,6	59,4	5.342	0,23	1,72	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,81	24,81	26,76
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,06	7,62	0,40	6,03	16,12	8,79	-0,21	-2,70	-2,04	3,83	-17,57	-13,74	2,38
Gerstenstroh (W)	12,25	3,2	38,9	55,6	681	0,25	1,69	0,00	0,00	1,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,39	24,39	26,32
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,93	5,45	0,03	4,31	11,73	9,37	-0,23	-2,88	-2,17	4,09	-27,61	-23,52	-11,80
Haferstroh	10	4,7	46,8	79,7	797	0,17	1,74	0,00	0,00	1,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,09	25,09	27,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,39	20,62	0,64	14,31	38,97	13,32	-0,32	-4,09	-3,09	5,81	-25,87	-20,06	18,91
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,21	5,88	0,27	3,78	11,14	10,27	-0,09	-1,16	-0,88	8,14	-5,45	2,69	13,83
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	11,3	1798,3	192,0	30.481	1,65	6,70	0,27	4,66	13,28	7,59	-0,13	-1,65	-1,24	4,58	-5,25	-0,67	12,62
VDLUFao																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,88	10,15	0,45	8,03	21,51	13,21	-0,22	-3,25	-2,15	7,59	-20,08	-12,49	9,02
Weizenstroh (W)	45,475	3,5	156,9	59,4	2.699	0,23	1,72	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,81	24,81	26,76
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,06	7,62	0,40	6,03	16,12	12,55	-0,21	-3,09	-2,04	7,21	-17,57	-10,36	5,76
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,93	5,45	0,03	4,31	11,73	13,39	-0,23	-3,29	-2,17	7,69	-27,61	-19,92	-8,19
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,39	20,62	0,64	14,31	38,97	19,02	-0,32	-4,68	-3,09	10,93	-25,87	-14,94	24,03
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,21	5,88	0,27	3,78	11,14	17,57	-0,09	-1,33	-0,88	15,27	-5,45	9,82	20,96
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	9,8	1558,9	166,0	26.360	1,87	7,48	0,31	5,39	15,06	13,70	-0,15	-2,17	-1,44	9,94	-9,94	0,00	15,06
HE-Methode																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,88	10,15	0,45	8,03	21,51	9,77	-0,18	-1,41	-2,11	6,07	-16,03	-9,96	11,55
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,06	7,62	0,40	6,03	16,12	11,10	-0,17	-1,34	-2,00	7,59	-12,27	-4,69	11,43
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,93	5,45	0,03	4,31	11,73	17,08	-0,18	-1,43	-2,14	13,33	-19,28	-5,95	5,78
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,39	20,62	0,64	14,31	38,97	16,00	-0,26	-2,04	-3,03	10,67	-16,39	-5,72	33,25
Zuckerrüben	38,8	16,6	642,5	271,6	10.537	1,21	5,88	0,27	3,78	11,14	21,16	-0,07	-0,58	-0,86	19,65	-6,81	12,83	23,97
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	8,8	1402,0	149,0	23.661	2,06	8,14	0,35	6,00	16,55	15,42	-0,13	-1,05	-1,57	12,66	-11,86	0,80	17,36

Tabelle A 24: Variante R-ZR-ohne. Übersicht der der Bilanzierung.

Variante R-ZR-ohne	Ertrag		THG-Bilanz (g CO ₂ -Äq./MJ)															
	(ha)	Masse (t _{TS} /ha)	Masse (t _{TS})	Heizwert (MJ/ha)	Heizwert (MJ)	Anbau					Humus						THG TOTAL	
						Diesel + Umlage	Dünger	Pesti- zide	Lach- gas	Gesamt o.Humus	HP	Umlage Brache	Umlage WZF	Umlage org. Dün.	HP mit Umlage	NP		Humus gesamt
VDLUFau																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,25	-0,22	-2,26	-1,66	5,10	-20,08	-14,98	6,46
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	8,79	-0,21	-2,15	-1,58	4,85	-17,57	-12,72	3,33
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	9,37	-0,23	-2,29	-1,68	5,17	-27,61	-22,44	-10,79
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	17,7	2,9	51,5	77,2	1.366	3,55	19,54	0,64	13,56	37,30	13,32	-0,32	-3,25	-2,39	7,35	-25,87	-18,52	18,78
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	10,27	-0,09	-0,92	-0,68	8,57	-5,45	3,13	14,24
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	8,0	1265,5	136,8	21.717	2,17	8,80	0,37	6,53	17,87	9,85	-0,18	-1,84	-1,35	6,48	-15,39	-8,91	8,96
VDLUFao																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	13,21	-0,22	-2,58	-1,66	8,74	-20,08	-11,34	10,11
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	12,55	-0,21	-2,45	-1,58	8,31	-17,57	-9,27	6,79
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	13,39	-0,23	-2,62	-1,68	8,86	-27,61	-18,75	-7,10
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	17,7	2,9	51,5	77,2	1.366	3,55	19,54	0,64	13,56	37,30	19,02	-0,32	-3,72	-2,39	12,59	-25,87	-13,28	24,02
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	17,57	-0,09	-1,06	-0,68	15,74	-5,45	10,29	21,40
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	8,0	1265,5	136,8	21.717	2,17	8,80	0,37	6,53	17,87	15,11	-0,18	-2,10	-1,35	11,48	-15,39	-3,91	13,96
HE-Methode																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,77	-0,18	-1,12	-2,11	6,36	-16,03	-9,67	11,78
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	11,10	-0,17	-1,07	-2,00	7,86	-12,27	-4,41	11,64
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	17,08	-0,18	-1,14	-2,13	13,63	-19,28	-5,66	6,00
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	17,7	2,9	51,5	77,2	1.366	3,55	19,54	0,64	13,56	37,30	16,00	-0,26	-1,62	-3,03	11,09	-16,39	-5,30	32,00
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	21,16	-0,07	-0,46	-0,86	19,77	-6,81	12,95	24,07
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	8,0	1265,5	136,8	21.717	2,17	8,80	0,37	6,53	17,87	14,72	-0,15	-0,91	-1,71	11,95	-12,65	-0,70	17,17

Tabelle A 25: Variante R-ZR-Stroh. Übersicht der Bilanzierung.

Variante R-ZR-Stroh	Fläche		Ertrag				THG-Bilanz (g CO ₂ -Äq./MJ)											
	(ha)	Masse (t _{TS} /ha)	Masse (t _{TS})	Heizwert (MJ/ha)	Heizwert (MJ)	Anbau					Humus							THG TOTAL
						Diesel + Umlage	Dünger	Pesti- zide	Lach- gas	Gesamt o.Humus	HP	Umlage Brache	Umlage WZF	Umlage org. Dün.	HP mit Umlage	NP	Humus gesamt	
VDLUFau																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,25	-0,22	-2,26	-1,66	5,10	-20,08	-14,98	6,46
Weizenstroh (W)	90	3,5	310,6	59,4	5.342	0,23	1,72	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,81	24,81	26,76
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	8,79	-0,21	-2,15	-1,58	4,85	-17,57	-12,72	3,33
Gerstenstroh (W)	12,25	3,2	38,9	55,6	681	0,25	1,69	0,00	0,00	1,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,39	24,39	26,32
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	9,37	-0,23	-2,29	-1,68	5,17	-27,61	-22,44	-10,79
Haferstroh	10	4,7	46,8	79,7	797	0,17	1,74	0,00	0,00	1,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,09	25,09	27,00
Raps (Körner)	17,7	2,9	51,5	77,2	1.366	3,55	19,54	0,64	13,56	37,30	13,32	-0,32	-3,25	-2,39	7,35	-25,87	-18,52	18,78
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	10,27	-0,09	-0,92	-0,68	8,57	-5,45	3,13	14,24
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	10,5	1661,8	179,8	28.537	1,71	7,11	0,28	4,97	14,06	7,49	-0,14	-1,40	-1,03	4,93	-5,79	-0,85	13,21
VDLUFao																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	13,21	-0,22	-2,58	-1,66	8,74	-20,08	-11,34	10,11
Weizenstroh (W)	57,627	3,5	198,9	59,4	3.421	0,23	1,72	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,81	24,81	26,76
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	12,55	-0,21	-2,45	-1,58	8,31	-17,57	-9,27	6,79
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	13,39	-0,23	-2,62	-1,68	8,86	-27,61	-18,75	-7,10
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	17,7	2,9	51,5	77,2	1.366	3,55	19,54	0,64	13,56	37,30	19,02	-0,32	-3,72	-2,39	12,59	-25,87	-13,28	24,02
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	17,57	-0,09	-1,06	-0,68	15,74	-5,45	10,29	21,40
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	9,2	1464,4	158,3	25.137	1,91	7,84	0,32	5,64	15,70	13,06	-0,16	-1,81	-1,16	9,92	-9,92	0,00	15,70
HE-Methode																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,77	-0,18	-1,12	-2,11	6,36	-16,03	-9,67	11,78
Weizenstroh (W)	12,88	3,5	44,4	59,4	765	0,23	1,72	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,80	19,80	21,75
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	11,10	-0,17	-1,07	-2,00	7,86	-12,27	-4,41	11,64
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	17,08	-0,18	-1,14	-2,13	13,63	-19,28	-5,66	6,00
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	17,7	2,9	51,5	77,2	1.366	3,55	19,54	0,64	13,56	37,30	16,00	-0,26	-1,62	-3,03	11,09	-16,39	-5,30	32,00
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	21,16	-0,07	-0,46	-0,86	19,77	-6,81	12,95	24,07
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	0	6,0	0,0	99,0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	158,75	8,3	1309,9	141,6	22.481	2,11	8,56	0,36	6,31	17,33	14,22	-0,14	-0,88	-1,65	11,54	-11,54	0,00	17,33

Tabelle A 26: Variante AG-ZR-ohne. Übersicht der der Bilanzierung.

Variante	Fläche (ha)	Ertrag				THG-Bilanz (g CO ₂ -Äq./MJ)												
		Masse (t _{TS} /ha)	Masse (t _{TS})	Heizwert (MJ/ha)	Heizwert (MJ)	Anbau					Humus						THG TOTAL	
						Diesel + Umlage	Dünger	Pesti- zide	Lach- gas	Gesamt o.Humus	HP	Umlage Brache	Umlage WZF	Umlage org. Dün.	HP mit Umlage	NP		Humus gesamt
VDLUFau																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,25	-0,22	-2,26	-1,66	5,10	-20,08	-14,98	6,46
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	8,79	-0,21	-2,15	-1,58	4,85	-17,57	-12,72	3,33
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	9,37	-0,23	-2,29	-1,68	5,17	-27,61	-22,44	-10,79
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,55	18,07	0,64	12,54	34,80	13,32	-0,32	-3,25	-2,39	7,35	-25,87	-18,52	16,28
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	10,27	-0,09	-0,92	-0,68	8,57	-5,45	3,13	14,24
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	10	6,0	60,0	99,0	990	1,51	8,37	0,00	6,62	16,50	-22,24	-0,25	-2,54	-1,86	-26,89	0,00	-26,89	-10,40
Summe	158,75	8,2	1296,4	138,2	21.935	2,09	8,36	0,34	6,26	17,06	8,28	-0,18	-1,82	-1,33	4,94	-14,33	-9,38	7,67
VDLUFao																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	13,21	-0,22	-2,58	-1,66	8,74	-20,08	-11,34	10,11
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	12,55	-0,21	-2,45	-1,58	8,31	-17,57	-9,27	6,79
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	13,39	-0,23	-2,62	-1,68	8,86	-27,61	-18,75	-7,10
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,55	18,07	0,64	12,54	34,80	19,02	-0,32	-3,72	-2,39	12,59	-25,87	-13,28	21,52
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	17,57	-0,09	-1,06	-0,68	15,74	-5,45	10,29	21,40
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	10	6,0	60,0	99,0	990	1,51	8,37	0,00	6,62	16,50	-29,66	-0,25	-2,90	-1,86	-34,67	0,00	-34,67	-18,17
Summe	158,75	8,2	1296,4	138,2	21.935	2,09	8,36	0,34	6,26	17,06	12,95	-0,18	-2,08	-1,33	9,36	-14,33	-4,97	12,09
HE-Methode																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,77	-0,18	-1,12	-2,11	6,36	-16,03	-9,67	11,77
Weizenstroh (W)	0	3,5	0,0	59,4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	11,10	-0,17	-1,07	-2,00	7,86	-12,27	-4,41	11,64
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	17,08	-0,18	-1,14	-2,14	13,63	-19,28	-5,66	6,00
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,55	18,07	0,64	12,54	34,80	16,00	-0,26	-1,62	-3,03	11,09	-16,39	-5,30	29,50
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	21,16	-0,07	-0,46	-0,86	19,77	-6,81	12,95	24,07
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	10	6,0	60,0	99,0	990	1,51	8,37	0,00	6,62	16,50	-11,40	-0,20	-1,26	-2,36	-15,22	0,00	-15,22	1,27
Summe	158,75	8,2	1296,4	138,2	21.935	2,09	8,36	0,34	6,26	17,06	13,50	-0,15	-0,90	-1,69	10,75	-11,95	-1,19	15,87

Tabelle A 27: Variante AG-ZR-Stroh. Übersicht der der Bilanzierung.

Variante AG-ZR-Stroh	Fläche		Ertrag				THG-Bilanz (g CO ₂ -Äq./MJ)											THG TOTAL
	(ha)	Masse (t _{TS} /ha)	Masse (t _{TS})	Heizwert (MJ/ha)	Heizwert (MJ)	Anbau					Humus							
						Diesel + Umlage	Dünger	Pesti- zide	Lach- gas	Gesamt o.Humus	HP	Umlage Brache	Umlage WZF	Umlage org. Dün.	HP mit Umlage	NP	Humus gesamt	
VDLUFau																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,25	-0,22	-2,26	-1,66	5,10	-20,08	-14,98	6,46
Weizenstroh (W)	90	3,5	310,6	59,4	5.342	0,23	1,72	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,81	24,81	26,76
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	8,79	-0,21	-2,15	-1,58	4,85	-17,57	-12,72	3,33
Gerstenstroh (W)	12,25	3,2	38,9	55,6	681	0,25	1,69	0,00	0,00	1,94	0,00	0,00	0,00	0,00	24,39	24,39	26,32	
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	9,37	-0,23	-2,29	-1,68	5,17	-27,61	-22,44	-10,79
Haferstroh	10	4,7	46,8	79,7	797	0,17	1,74	0,00	0,00	1,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,09	25,09	27,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,55	18,07	0,64	12,54	34,80	13,32	-0,32	-3,25	-2,39	7,35	-25,87	-18,52	16,28
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	10,27	-0,09	-0,92	-0,68	8,57	-5,45	3,13	14,24
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	10	6,0	60,0	99,0	990	1,51	8,37	0,00	6,62	16,50	-22,24	-0,25	-2,54	-1,86	-26,89	0,00	-26,89	-10,40
Summe	158,75	10,7	1692,7	181,1	28.755	1,65	6,79	0,26	4,77	13,47	6,31	-0,14	-1,39	-1,02	3,77	-5,05	-1,28	12,20
VDLUFao																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	13,21	-0,22	-2,58	-1,66	8,74	-20,08	-11,34	10,11
Weizenstroh (W)	73,975	3,5	255,3	59,4	4.391	0,23	1,72	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,81	24,81	26,76
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	12,55	-0,21	-2,45	-1,58	8,31	-17,57	-9,27	6,79
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	13,39	-0,23	-2,62	-1,68	8,86	-27,61	-18,75	-7,10
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,55	18,07	0,64	12,54	34,80	19,02	-0,32	-3,72	-2,39	12,59	-25,87	-13,28	21,52
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	17,57	-0,09	-1,06	-0,68	15,74	-5,45	10,29	21,40
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	10	6,0	60,0	99,0	990	1,51	8,37	0,00	6,62	16,50	-29,66	-0,25	-2,90	-1,86	-34,67	0,00	-34,67	-18,17
Summe	158,75	9,8	1551,7	165,8	26.326	1,78	7,25	0,29	5,21	14,54	10,79	-0,15	-1,73	-1,11	7,80	-7,80	0,00	14,54
HE-Methode																		
Weizenkörner (W)	90	6,5	588,2	111,1	10.000	2,81	10,15	0,45	8,03	21,44	9,77	-0,18	-1,12	-2,11	6,36	-16,03	-9,67	11,77
Weizenstroh (W)	22,227	3,5	76,7	59,4	1.319	0,23	1,72	0,00	0,00	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,80	19,80	21,75
Gerstenkörner (W)	12,25	6,9	84,3	117,0	1.433	2,00	7,62	0,40	6,03	16,05	11,10	-0,17	-1,07	-2,00	7,86	-12,27	-4,41	11,64
Gerstenstroh (W)	0	3,2	0,0	55,6	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Haferkörner	10	6,5	64,5	109,7	1.097	1,86	5,45	0,03	4,31	11,66	17,08	-0,18	-1,14	-2,14	13,63	-19,28	-5,66	6,00
Haferstroh	0	4,7	0,0	79,7	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Raps (Körner)	7,7	2,9	22,4	77,2	594	3,55	18,07	0,64	12,54	34,80	16,00	-0,26	-1,62	-3,03	11,09	-16,39	-5,30	29,50
Zuckerrüben	28,8	16,6	476,9	271,6	7.822	1,19	5,88	0,27	3,78	11,11	21,16	-0,07	-0,46	-0,86	19,77	-6,81	12,95	24,07
Feldgras / Grasanbau auf dem Ackerland	10	6,0	60,0	99,0	990	1,51	8,37	0,00	6,62	16,50	-11,40	-0,20	-1,26	-2,36	-15,22	0,00	-15,22	1,27
Summe	158,75	8,6	1373,1	146,5	23.254	1,99	7,98	0,32	5,90	16,20	12,73	-0,14	-0,85	-1,60	10,14	-10,14	0,00	16,20

Bisher erschienene DBFZ Reports

DBFZ Report Nr. 1

Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungsanlagen

Autoren: Volker Lenz, Daniela Thrän, Hans Hartmann, Peter Turowski, Frank Ellner-Schubert (TFZ), Joachim Gerth (TUHH)

DBFZ Report Nr. 2

Methodische Vorgehensweise zur Standortidentifikation und Planung der Biomassebereitstellung für Konversionsanlagen am Beispiel von Bio-SNG-Produktionsanlagen

Autor: Michael Seiffert

DBFZ Report Nr. 3

Feinstaubminderung im Betrieb von Scheitholzaminöfen unter Berücksichtigung der toxikologischen Relevanz

Autor: Volker Lenz

DBFZ Report Nr. 4

Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der Biomassenutzung

Autoren: Daniela Thrän, Matthias Edel, Janine Pfeifer, Jens Ponitka, Michael Rode / Silke Knispel (iup)

DBFZ Report Nr. 5

Optimierung und Bewertung von Anlagen zur Erzeugung von Methan, Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen

Autor: Stefan Rönsch

DBFZ Report Nr. 6

Katalytisch unterstützte Minderung von Emissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen

Autoren: Ingo Hartmann, Volker Lenz, Marian Schenker, Christian Thiel, Markus Kraus, Mirjam Matthes, Ulf Roland (UFZ), René Bindig, Wolf-Dietrich Einicke (Universität Leipzig)

DBFZ Report Nr. 7

Final Report - Global and Regional Spatial Distribution of Biomass Potentials - Status quo and options for specification -

Autoren: DBFZ / ZALF / DLR / ILB / vTI

DBFZ Report Nr. 8 - Kompakt -

Autoren: Ulrike Seyfert, Katja Bunzel, Daniela Thrän, Eric Mauky, Barbara Fritsche, André Schreiber, Jan Liebetrau, Thomas Schmidt, Tobias Ulbricht, Volker Lenz

DBFZ Report Nr. 9

Analyse und Bewertung ausgewählter zukünftiger Biokraftstoffoptionen auf der Basis fester Biomasse

Autorin: Franziska Müller-Langer

DBFZ Report Nr. 10

Ermittlung des Verbrauchs biogener Festbrennstoffe im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD-Sektor) - Endbericht

Autoren: Cornelia Viehmann, Tanja Westerkamp, Andre Schwenker, Marian Schenker, Daniela Thrän, Volker Lenz, Marcel Ebert (IE)

DBFZ Report Nr. 11

Monitoring Biokraftstoffsektor

Autoren: Karin Naumann, Katja Oehmichen, Martin Zeymer, Franziska Müller-Langer, Mattes Scheftelowitz, Philipp Adler, Kathleen Meisel, Michael Seiffert

DBFZ Report Nr. 12

Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse

Autoren: Janet Witt, Daniela Thrän, Nadja Rensberg, Christiane Hennig, Karin Naumann, Eric Billig, Philipp Sauter, Jaqueline Daniel-Gromke, Alexander Krautz (DBFZ), Christian Weiser, Gerd Reinhold, Torsten Graf (TLL)

Sonderheft zum DBFZ Report

Bioenergie heute und morgen - 11 Bereitstellungskonzepte -

Autoren: Daniela Thrän, Katja Bunzel, Cornelia Viehmann, Daniel Büchner, Erik Fischer, Elmar Fischer, Arne Gröngroft, Christiane Hennig, Franziska Müller-Langer, Katja Oehmichen, Stefan Rönsch, Frank Scholwin

Weitere Informationen: <http://www.dbfz.de/web/referenzen-publikationen>



**DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH**
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434-112
Fax: +49 (0)341 2434-133
info@dbfz.de

www.dbfz.de