



# Basisinformationen

für eine nachhaltige Nutzung  
landwirtschaftlicher Reststoffe zur  
Bioenergiebereitstellung



**Energetische  
Biomassenutzung**



# Energetische Biomassenutzung

Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms  
„Energetische Biomassenutzung“  
**BAND 2**

## Basisinformationen

für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher  
Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung

Herausgegeben von der Programmbegleitung des  
BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“

### **Autoren**

Vanessa Zeller  
Christian Weiser  
Klaus Hennenberg  
Frank Reinicke  
Kay Schaubach  
Daniela Thrän  
Armin Vetter  
Bernhard Wagner

Gefördert vom



Ein Förderprogramm der



Koordiniert vom



Wissenschaftlich  
begleitet vom



## Impressum

### Autoren

Vanessa Zeller, Christian Weiser, Klaus Hennenberg, Frank Reinicke,  
Kay Schaubach, Daniela Thrän, Armin Vetter, Bernhard Wagner

### Herausgeber

Deutsches BiomasseForschungsZentrum gGmbH (DBFZ)  
Torgauer Str. 116  
04347 Leipzig  
Tel.: +49(0)341 2434-554  
Fax: +49(0)341 2434-133  
www.dbfz.de

### Redaktion

Programmbegleitung des BMU-Förderprogramms  
„Energetische Biomassenutzung“  
www.energetische-biomassenutzung.de

### Fotos

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft  
Deutsches BiomasseForschungsZentrum  
Pixelio, Fotolia

### Layout & Herstellung

Steffen Kronberg  
Angela Gröber  
Marén Heintzmann

### Druck

Fischer Druck, Leipzig,  
www.fischerdruck.com

### Förderung

Erstellt mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums  
für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit,  
Berlin (BMU)

ISSN 2192-1806

Für die Ergebnisdarstellung mit entsprechenden Konzepten, Schlussfolgerungen und fachlichen Empfehlungen sind ausschließlich die Autoren zuständig. Dies beinhaltet auch die Wahrung etwaiger Autorenrechte Dritter. Daher können mögliche Fragen, Beanstandungen, Rechtsansprüche u.ä.m. nur von den Autoren bearbeitet werden. Die aufgeführten Meinungen, Bewertungen oder Vorschläge geben nicht die Meinung des Herausgebers wieder.

Alle Rechte vorbehalten.

© DBFZ 2011



## Inhaltsverzeichnis

Grußwort	6
Vorstellung des Projektteams	8
Hintergrund und Projektziele	10
Räumliche Auflösung nachhaltiger Strohpotenziale in Deutschland	14
Entwicklung von Strohpotenzialen gemäß verschiedener Varianten der Bioenergienutzung	22
Bereitstellungs- und Anlagenkonzepte für die Nutzung von Stroh	29
Bilanzierung der bereitstellungsbedingten Treibhausgasemissionen für Stroh	34
Bilanzierung der Treibhausgasemissionen verschiedener Strohnutzungskonzepte	39
Vergleich der Gestehungskosten verschiedener Strohnutzungskonzepte	47



## Grüßwort

**Energetische Nutzung von Reststoffen gewinnt weiter an Bedeutung beim Ausbau der Bioenergie**

**Liebe Leserinnen, lieber Leser,**

der Ausbau von erneuerbaren Energien ist ein wesentlicher Baustein auf dem Weg zu einer nachhaltigen und sicheren Energieversorgung und zur Minderung von Treibhausgasemissionen. Auf europäischer und nationaler Ebene hat sich die Bundesregierung zur Umsetzung einer Reihe von energie- und klimapolitischen Zielen verpflichtet. Der Anteil von erneuerbaren Energien soll bis zum Jahr 2020 auf mindestens 18 Prozent und im Verkehrssektor auf mindestens 10 Prozent des Endenergieverbrauchs steigen. Bioenergie und Biokraftstoffe spielen hier eine wichtige Rolle.

Um die gesellschaftliche Akzeptanz für den Ausbau von Bioenergie sicherzustellen, muss die Nutzung von Biomasse nachhaltig erfolgen. Im Bereich Bioenergie sind die europaweite zügige Umsetzung der Nachhaltigkeitsanforderungen für Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe sowie deren kontinuierliche Weiterentwicklung im Lichte neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse wichtig.

Die Nutzung von – bislang ungenutzten – Rest- und Abfallstoffen im Bereich Biokraftstoffe bietet Vorteile: eine günstigere Klimabilanz sowie die Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen und indirekten Landnutzungsänderungen.



Stroh gehört zu den Reststoffen mit dem größten bislang ungenutzten Potenzial: In Deutschland fallen im langjährigen Durchschnitt insgesamt rund 30 Millionen Tonnen Getreidestroh pro Jahr an, wenngleich die Verfügbarkeit sich in den Regionen unterscheidet und vereinzelt regionale Knappheiten auftreten können. Ein Großteil des Getreidestrohs ist noch ungenutzt und bietet eine große Chance für die energetische Nutzung.

Aus diesem Grund wird die Mobilisierung dieser Ressourcen von der Bundesregierung unterstützt, unter anderem durch die doppelte Gewichtung von Biokraftstoffen, die aus Reststoffen wie Stroh produziert werden.

Die nachfolgenden Beiträge sollen weitergehende Informationen über landwirtschaftliche Reststoffe (Potenzial nachhaltig verfügbarer Reststoffe, Strohnutzungskonzepte, ökonomische Aspekte) vermitteln.

### Ich wünsche Ihnen eine angenehme Lektüre

Ministerialdirektor Hubert Steinkemper  
Leiter der Abteilung IG  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

## Vorstellung des Projektteams

Das Projekt „Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung“ (FKZ: 03KB021) ist ein Verbundvorhaben aus den vier Instituten DBFZ, TLL, INL und dem Öko-Institut. Um die komplexen Fragestellungen über eine nachhaltige energetische Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe beantworten zu können, wurde agrarwissenschaftliche, ökologische und technisch-ökonomische Expertise in einem zweijährigen Forschungsprojekt zusammengebracht.

### Deutsches BiomasseForschungsZentrum (DBFZ)



Das DBFZ koordinierte das Vorhaben und bearbeitete inhaltlich die Fragestellung der energetischen Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen. In den Fachabteilungen des Forschungsinstituts sind die Logistik- und Anlagenkonzepte für die Bereitstellung von Wärme, Strom (gekoppelt mit Wärme) und Kraftstoffen auf Basis von Stroh erarbeitet worden. Diese wurden anschließend hinsichtlich technisch-ökonomischer und ökologischer Kriterien untersucht. Eine Gesamtschau über landwirtschaftliche Reststoffmengen und -qualitäten, ein Vergleich verschiedener Gestehungskosten und Treibhausgasbilanzen sind die Ergebnisse der zweijährigen Projektarbeit.

Ansprechpartnerin: Dr. Daniela Thrän  
 Mail: Daniela.Thrän@dbfz.de  
 Tel.: 0341 2434-435



### Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)

Die Untersuchungen der TLL konzentrieren sich auf die agrarwissenschaftlichen Aspekte. Den Schwerpunkt bildet die Bestimmung der Reststoffpotenziale in der Landwirtschaft, insbesondere des deutschlandweiten Getreidestrohpotenzials unter Berücksichtigung der Humusbilanz. Um mittelfristige Prognosen (bis 2020) ableiten zu können, wurden die Ergebnisse durch Szenarienrechnungen komplettiert. Die Bewertung einzelner Biomassekonversionsformen im Hinblick auf veränderte Fruchtfolgen und Stoffkreisläufe ergänzen diese Betrachtungen. Weitere Untersuchungen umfassen die Bestimmung der Strohbereitstellungskosten sowie die monetäre Bewertung von Humusersatzmaßnahmen.

Ansprechpartner: Dr. Armin Vetter  
 Mail: armin.vetter@tll.thueringen.de  
 Tel.: 034627 868-122



### Institut für Nachhaltige Landbewirtschaftung e.V. (INL)

Das INL e.V. beschäftigte sich im Rahmen des Verbundprojektes mit der Quantifizierung von Strohpotenzialen, die unter nachhaltigen Produktionsbedingungen in Deutschland potenziell zur Verfügung gestellt werden können. Der Fokus lag hierbei auf einem Strohpotenzial, welches unter der Berücksichtigung einer ausgeglichenen Humusbilanz, ermittelt mit der dynamischen Humuseinheiten-Methode, zur Verfügung gestellt werden kann.

Alle Basisdaten sowie die Ergebnisse der Humusbilanzierungen wurden in eine Datenbank überführt. Auf Grundlage dieser Datenbank wurde ein Präsentationstool entwickelt, welches es ermöglicht, auf regionaler und überregionaler Ebene die nachhaltig nutzbaren Strohpotenziale Deutschlands auszuweisen.

Im Partnervereinbund untersuchte das INL e.V. anhand von Szenarien die Auswirkungen sich ändernder Rahmenbedingungen in der Landwirtschaft sowie konkurrierender Energieträger auf das prognostizierte nachhaltige Strohpotenzial.

Ansprechpartner: Bernhard Wagner  
 Mail: bernhard.wagner@repro-agrar.de  
 Tel.: 0345 5522-603



### Öko-Institut

Der thematische Arbeitsschwerpunkt des Öko-Instituts sind Fragestellungen zu bereitstellungsbedingten Klimagasemissionen des Reststoffs Stroh. Dabei liegt der Fokus auf der Integration der Humusbilanz in die Treibhausgas-Bilanzierung unter Betrachtung einer vollständigen Fruchtfolge. Des Weiteren wurden die Bereitstellungsketten bewertet und Vorschläge zu deren ökologischer Optimierung erarbeitet.

Ansprechpartner: Dr. Klaus Hennenberg  
 Mail: k.hennenberg@oeko.de  
 Tel.: 06151 8191-77

Übersicht über die im Projekt verwendeten Modelle und Methoden

Modelle und Methoden	Beschreibung	Links
Humusbilanzierung nach VDLUFA (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten)	Statistische Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland	<a href="http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/08-humusbilanzierung.pdf">http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/08-humusbilanzierung.pdf</a>
Humusbilanzierung nach der dynamischen Humus-Einheiten-Methode (HE-Methode)	Dynamische Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland	
Treibhausgasbilanzierung mit dem Globalen Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)	Instrument zur vergleichenden Analyse von Umwelteffekten der Energiebereitstellung und -nutzung	<a href="http://www.oeko.de/service/gemis/">http://www.oeko.de/service/gemis/</a>
Ökobilanzierung mit Umberto 5.5 auf Basis von Ecoinvent V2.2	Datenbank mit Sachbilanzdaten zu Landwirtschaft, Energieversorgung und Transport u.a.	<a href="http://www.ecoinvent.org/database/">http://www.ecoinvent.org/database/</a>
Logistikmodelle basierend auf DBFZ- und TLL- internen Berechnungsprogrammen	Datenbanken zur Spezifizierung von Prozesskettenelementen für die Strohbergung (TLL), Lagerung und Transport (DBFZ)	
Gestehungskostenberechnung basierend auf Richtlinie VDI 6025	Konversionspfadspezifische Berechnungsprogramme mit Daten des DBFZ sowie aus externen Quellen	

## Hintergrund und Projektziele

### Aufkommen landwirtschaftlicher Reststoffe



Landwirtschaftliche Reststoffe sind Stoffe, die bei der Produktion, Ernte oder Verarbeitung von Hauptprodukten in landwirtschaftlichen Betrieben als Nebenprodukte anfallen. Dazu gehören Nebenernteprodukte wie zum Beispiel verschiedene Stroharten oder Ernterückstände von Hackfrüchten, aber auch Reststoffe aus der Viehhaltung wie Gülle und Festmist. Das Aufkommen dieser landwirtschaftlichen Reststoffe ist in Tabelle 1 dargestellt und summiert sich auf etwa 215 Millionen Tonnen Frischmasse pro Jahr. Davon beträgt der Anteil der tierischen Exkremente über 70 Prozent. Mit durchschnittlich

30 Millionen Tonnen Frischmasse pro Jahr macht Getreidestroh den größten Anteil an den Nebenernteprodukten aus. Ein signifikanter Anteil entfällt mit 19 Millionen Tonnen auf die Ernterückstände von Hackfrüchten.

In Abbildung 1 ist die Verteilung der Reststoffmengen in Bezug auf die Trockenmasse zu sehen. Der Anteil der organischen Trockenmasse und die Zusammensetzung bestimmen das Energiepotenzial der Reststoffe. Getreidestroh hat mit 42 Prozent den größten Anteil am Gesamtaufkommen. Insgesamt weisen die Ernterückstände mit einem Trockenmassanteil von 63 Prozent ein sehr hohes theoretisches Potenzial für eine energetische Nutzung auf.

Tabelle 1: Aufkommen verschiedener landwirtschaftlicher Reststoffarten, Mittelwert 1999-2007

Reststoffart	Menge (Mio. t FM)	Wassergehalt (%)
Getreidestroh (Winter-, Sommerweizen, Roggen, Winter-, Sommergerste, Triticale und Hafer)	30	14
Rapsstroh	7,5	14
Körnermaisstroh	4	14
Ernterückstände Hackfrüchte (Kartoffel und Zuckerrübe)	19	82-85
Rapspresskuchen	3	10
Rinder- und Schweinegülle	122	90 (88-97)
Festmist (Rinder-, Schweine-, Pferde-, Schafs- und Geflügelmist inkl. Hühnertrockenkot)	30	75 (40-75)
<b>Summe</b>	<b>215</b>	

t FM: Tonnen Frischmasse

Millionen Tonnen Trockenmasse

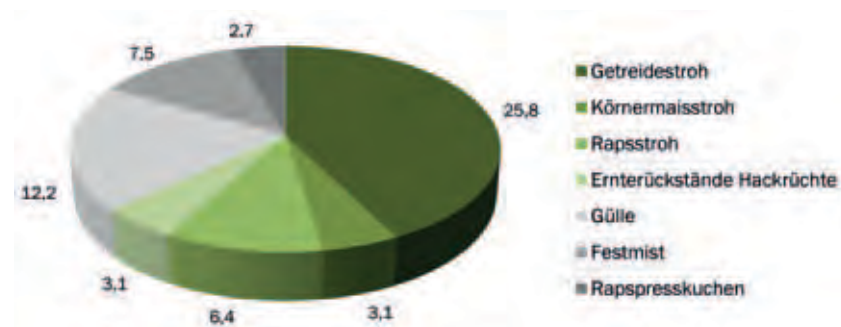


Abbildung 1: Aufkommen verschiedener landwirtschaftlicher Reststoffarten, Mittelwert 1999-2007

### Energetische und stoffliche Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen

Einige landwirtschaftliche Nebenprodukte werden bereits in erheblichem Umfang für die stoffliche oder energetische Nutzung verwendet. Zum Beispiel werden etwa drei Millionen Tonnen Rapspresskuchen zum größten Teil als Futtermittel und etwa fünf Millionen Tonnen Stroh als Einstreumaterial in Stallungen eingesetzt. Raps- und Körnermaisstroh 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. Darüber hinaus werden aktuell 25 bis 50 (Klein)Feuerungsanlagen in Deutschland auf der Basis von Stroh betrieben.

Die bisherige Nutzung schöpft das energetische Potenzial der landwirtschaftlichen Reststoffe noch nicht aus. Betrachtet man die hohen Mengen von Nebenernteprodukten, insbesondere von Getreidestroh, so erscheint dieser Reststoff als ein aussichtsreiches Substrat für die energetische Nutzung. Im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Reststoffen wie den tierischen Exkrementen sind die Einsatzmöglichkeiten von Stroh als Bioenergeträger vielfältiger: Neben der Nutzung von Stroh als Festbrennstoff zur Wärmebereitstellung sind verschiedene Konversionspfade zur Strom- und Kraftstoffproduktion möglich.



### Bedeutung landwirtschaftlicher Reststoffe für die Humusbilanz

In ackerbaulichen Böden wird der Abbau von organischer Bodensubstanz durch den Anbau von humuszehrenden Fruchtarten verursacht. Um den Verlust von Humus-Kohlenstoff auszugleichen, wird eine Humusersatzwirtschaft betrieben. Dabei verbleiben landwirtschaftliche Reststoffe wie Ernterückstände direkt auf den Äckern oder Wirtschaftsdünger (Gülle, Festmist) werden auf die Flächen ausgebracht. Dadurch gelangt organische Materie wieder in den Boden. Mit dem Humussaldo kann das Verhältnis zwischen eingebrachter und entnommener beziehungsweise abgebauter organischer Materie beschrieben werden.

Die Bedeutung des Humussaldos liegt in der komplexen Beeinflussung nahezu aller Bodeneigenschaften und -funktionen durch die organische Bodensubstanz. Die Humusversorgung ackerbaulich genutzter Böden dient nicht nur der Ertragssicherung. Sie hat insbesondere durch die Steuerung des Kohlenstoff- und Stickstoffumsatzes auch eine ökologische Relevanz als Speicher und Transformator von Nährstoffen, als Filter und Puffer, als  $\text{CO}_2$ -Senke, durch die Förderung der bodenbiologischen Aktivität oder beim Aufbau eines günstigen Bodengefüges. Kennzahlen zur Humusversorgung werden daher als wichtige Agrar-Umweltindikatoren angesehen. Aufgrund der vielfältigen Wirkungen ist eine geordnete, standortangepasste Humusersatzwirtschaft in landwirtschaftlichen Betrieben eine wesentliche Grundlage für eine nachhaltige Pflanzenproduktion.

### Forschungsziele des Vorhabens

Zentrales Ziel des Projektes ist es, regionalen Agrarstrukturen in eine Humusbilanz zu übersetzen und damit regionale Informationen über die nachhaltigen Potenziale der landwirtschaftlichen Reststoffe zu liefern. Neben der Frage wie hoch das Strohpotenzial in Deutschland unter Berücksichtigung von Humusbilanzen ist und wie sich die räumliche Auflösung darstellt, soll im Projekt auch die Frage beantwortet werden, die für die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit essentiell ist: Wie wirkt sich die Entnahme von Reststoffen auf den Bodenkohlenstoffhaushalt aus und wie lassen sich diese Effekte in einer Treibhausgasbilanz ausdrücken? Um eine vergleichende Aussage zwischen der Treibhausgasbilanz



von Reststoffen und den Emissionen aus der fossilen Energiebereitstellung ableiten zu können, müssen neben den Anbaueffekten auch die Konversionsprozesse berücksichtigt werden. Ein weiteres Ziel des Vorhabens ist daher, verschiedene Konversionspfade der Strom-, Wärme- und Kraftstoffbereitstellung hinsichtlich ihres THG-Einsparpotenzials zu vergleichen.

Reststoffe weisen im Vergleich zu Anbaubiomassen in der Regel geringere Energiedichten auf. Daher sind für eine Einschätzung der realistischen Umsetzung ihres Potenzials, Aussagen zum Aufwand der Bereitstellung ebenso wichtig wie ökologische Aspekte. Welche Technologien sind heute zur Strobergung und zum -transport verfügbar und wie hoch sind die Kosten für verschiedene Bereitstellungsketten? Eine Betrachtung bis zur Feldkante reicht in diesem Fall nicht aus. Aus der Perspektive des Anlagenbetreibers ist die Frage wichtig, wie sich die Bereitstellungskosten für Anlagen mit geringem Rohstoffeinsatz und geringen Transportdistanzen von Konzepten für zentrale Anlagen mit sehr hohem Rohstoffbedarf absetzen. Letztlich sollen auf der Ebene eines Vergleichs von Anlagenkonzepten die Gesteigungskosten für verschiedene Bioenergieträger auf der Basis von Stroh ermittelt werden, um so die bisherigen Betrachtungen durch diesen technisch-ökonomischen Aspekt zu vervollständigen.

#### 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 Gesteigungskosten
- Die Formulierung von Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Erschließung landwirtschaftlicher Reststoffe.

# Räumliche Auflösung nachhaltiger Strohpotenziale in Deutschland



Böden sind fundamentaler Bestandteil landwirtschaftlicher Produktionssysteme. Sie sind begrenzt verfügbar und unterliegen unterschiedlichen Ansprüchen. Eine effiziente und nachhaltige Nutzung der Ressource Boden ist notwendig, um langfristig die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten. Neben der Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln, beträgt der Anbau nachwachsender Rohstoffe im Jahr 2010 rund 2,1 Millionen Hektar. Aktuell bestehen Bestrebungen, Nebenernteerzeugnisse für die energetische Nutzung deutlich stärker zu berücksichtigen. Getreidestroh, ein bislang meist ungenutztes Nebenprodukt der landwirtschaftlichen Produktion, kann einen Beitrag zur Bereitstellung von Bioenergie liefern. Um zu spezifizieren, welchen Beitrag das Koppelprodukt Getreidestroh zur Bereitstellung von Bioenergie heute und langfristig liefern kann ist zu klären, welche Einschränkungen eine verstärkte Entnahme von organischer Substanz von der Ackerfläche bewirkt, wenn eine humuswirksame Rückfuhr ausbleibt. Angesichts dieser Fragen ist das Verhältnis zwischen Eintrag und Verlust (Umsatz, Abfuhr) der organischen Substanz im Boden (Humusbilanz) ein wichtiges Kriterium für eine nachhaltige Bodennutzung und Voraussetzung für langfristig hohe Erträge. Damit sind der Abfuhr und Bereitstellung dieser Bioenergieträger von der Ackerfläche Grenzen gesetzt.

## Humusbilanzierung

Zur Bestimmung der Menge an landwirtschaftlichen Reststoffen, die zum Erhalt des Humus benötigt wird, kann eine Humusbilanzierung durchgeführt werden. Dieser Ansatz soll sicherstellen, dass nur der Anteil des Getreidestroh je Landkreis als Potenzial für eine energetische und stoffliche Nutzung ausgewiesen wird, der nicht zur Strohdüngung und damit für eine ausgeglichene Humusbilanz benötigt wird. In der Praxis werden Humusbilanzen auf Schlag- beziehungsweise Betriebsebene berechnet. In diesem Vorhaben mit dem Anspruch einer deutschlandweiten Berechnung wird für jeden der Landkreise Deutschlands eine Humusbilanzierung nach verschiedenen Methoden durchgeführt. Abbildung 2 zeigt ein vereinfacht dargestelltes Schema zur Ermittlung einer Humusbilanz.

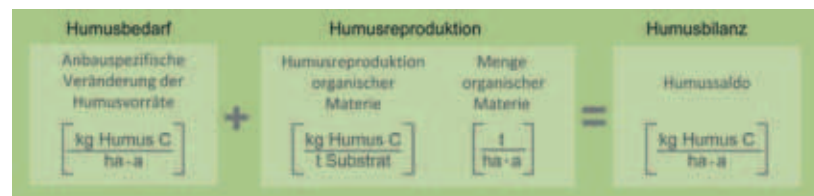


Abbildung 2: Schema zur Ermittlung von Humusbilanzen (a: Jahr, C: Kohlenstoff, ha: Hektar,t: Tonne) [Quelle: nach Korschens et al. 2005]

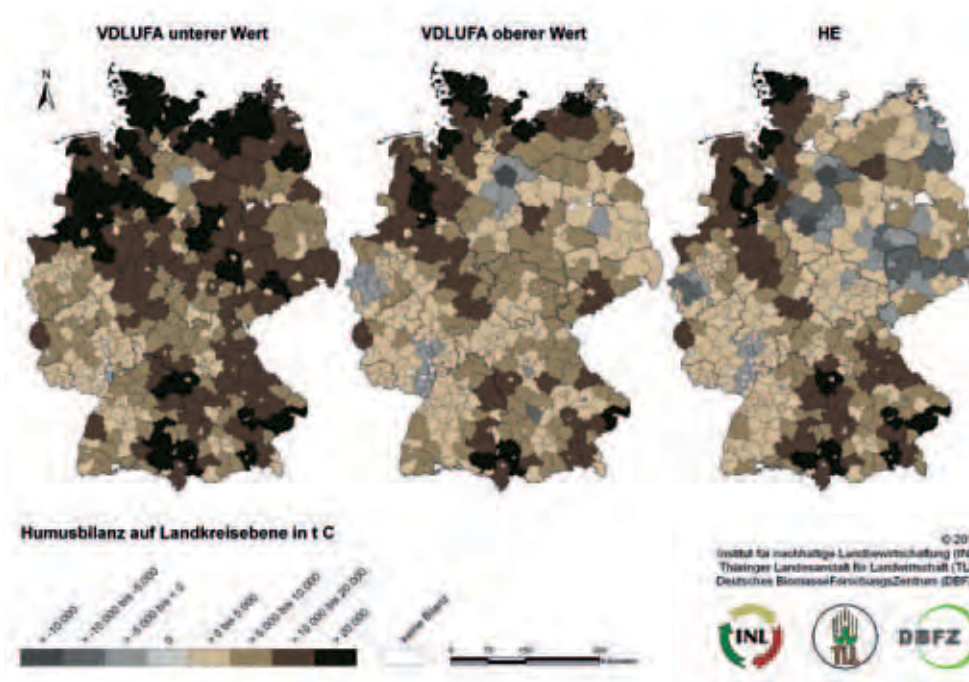


Abbildung 3: Humussaldo auf Landkreisebene nach VDLUFA unterer Wert (links), nach VDLUFA oberer Wert (Mitte) und nach dynamischer Humuseinheitenmethode (rechts) in Tonnen Kohlenstoff

Die verwendeten Bilanzmodelle basieren auf langjährigen Feldversuchen auf unterschiedlichen Böden. Diese Versuche beinhalten Untersuchungen zur Dynamik des organischen Kohlenstoff- und des Stickstoffgehaltes von Ackerböden. Die Bilanzsalden drücken den notwendigen Bedarf an organischen Düngern für die Erhaltung eines optimalen Versorgungszustandes aus, treffen aber keine Aussagen über den augenblicklichen Versorgungsgrad. Daher gelten die von der Humusbilanz abgeleiteten Ergebnisse unter der Annahme, dass auf der Ebene der Landkreise die „gute fachliche Praxis“ in der Vergangenheit eingehalten und die Humussalden mindestens ausgeglichen wurden. Die Humusbilanz wird über die beiden Methoden des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA obere und untere Werte) sowie die dynamische Humuseinheitenmethode (HE-Methode) bestimmt. Die Humusbilanzen nach den unteren Werten der VDLUFA-Methode in Verbindung mit einer festgelegten Humus-Reproduktion von 100 Kilogramm Humus-Kohlenstoff pro Tonne Stroh werden als Nachweis für die Einhaltung der Cross-Compliance-Auflagen bezüglich des Humuserhaltes genutzt. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Humusbilanzierung nach den drei Methoden auf Landkreisebene dargestellt.



## Potenzialbestimmung

Die Vorgehensweise zur Ermittlung nachhaltiger Potenziale ist in Abbildung 5 dargestellt. Ausgangspunkt der Potenzialbestimmung ist das aufgewachsene Getreidestroh, welches über den in der Agrarstatistik erfassten Kornertrag und artspezifische Korn-Stroh-Verhältnisse (nach Düngeverordnung) bestimmt werden kann. Dieses theoretische Potenzial beläuft sich im Durchschnitt auf jährlich 30 Millionen Tonnen Frischmasse. Der Strohaufwuchs auf Landkreisebene wird in Abbildung 4 a als Summe pro Landkreis gezeigt. In Abbildung 4 b sieht man die Darstellung mit Bezug zur Ackerfläche.

Aus Untersuchungen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft Mitte der neunziger Jahre ist bekannt, dass mit derzeitiger Mähdreschertechnik das theoretische Potenzial im Mittel zu 66 Prozent pressbar und bergbar ist. Von diesem technisch bergbaren Anteil werden wiederum die aktuellen, nicht-energetischen Nutzungen des Stroh abgezogen. Bei dem derzeitigen Tierbestand und den Haltungsformen werden jährlich rund 4,8 Millionen Tonnen Getreidestroh Frischmasse zur Einstreu verwendet. Somit verbleibt ein technisches Potenzial von 15 Millionen Tonnen Getreidestroh. Von diesem Anteil werden die Strohmenge abgezogen, welche als Dünger für die Humusreproduktion auf dem Acker verbleiben müssen.

Hat ein Landkreis nach den Berechnungen eine negative Humusbilanz, ist sein Strohpotenzial null. Ist die Humusbilanz positiv, kann die Menge des humuswirksamen Kohlenstoffs bestimmt werden, welche dem Kreis bei einer ausgeglichenen Humusbilanz entnommen werden kann. Über diesen Wert und den Reproduktionskoeffizienten von Stroh wird die Menge an Stroh bestimmt, welche im Landkreis zur energetischen Nutzung zur Verfügung steht. Abschließend werden von der noch verbleibenden Menge 10 Prozent abgezogen, um anderweitiger stofflicher Nutzung Rechnung zu tragen (Substrat im Garten- und Gemüsebau, Futterergänzung). Da die wichtigsten Nachhaltigkeitskriterien in dieser Bilanz enthalten sind, wird es als nachhaltiges Potenzial bezeichnet. Welcher Anteil des nachhaltigen Potenzials unter Berücksichtigung der Kostenstruktur, der infrastrukturellen Gegebenheiten und der lokalen Verkaufsbereitschaft an einem bestimmten Standort zur Verfügung steht, kann nur durch eine regionale Analyse ermittelt werden.

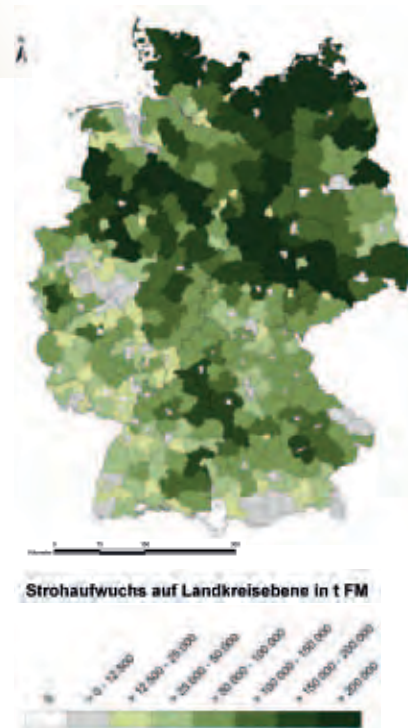


Abbildung 4a: Getreidestrohaufwuchs auf Landkreisebene in Tonnen Frischmasse



Abbildung 5: Vorgehensweise zur Bestimmung nachhaltiger Potenziale (a: Jahr, FM: Frischmasse, PJ: Petajoule, t: Tonne)

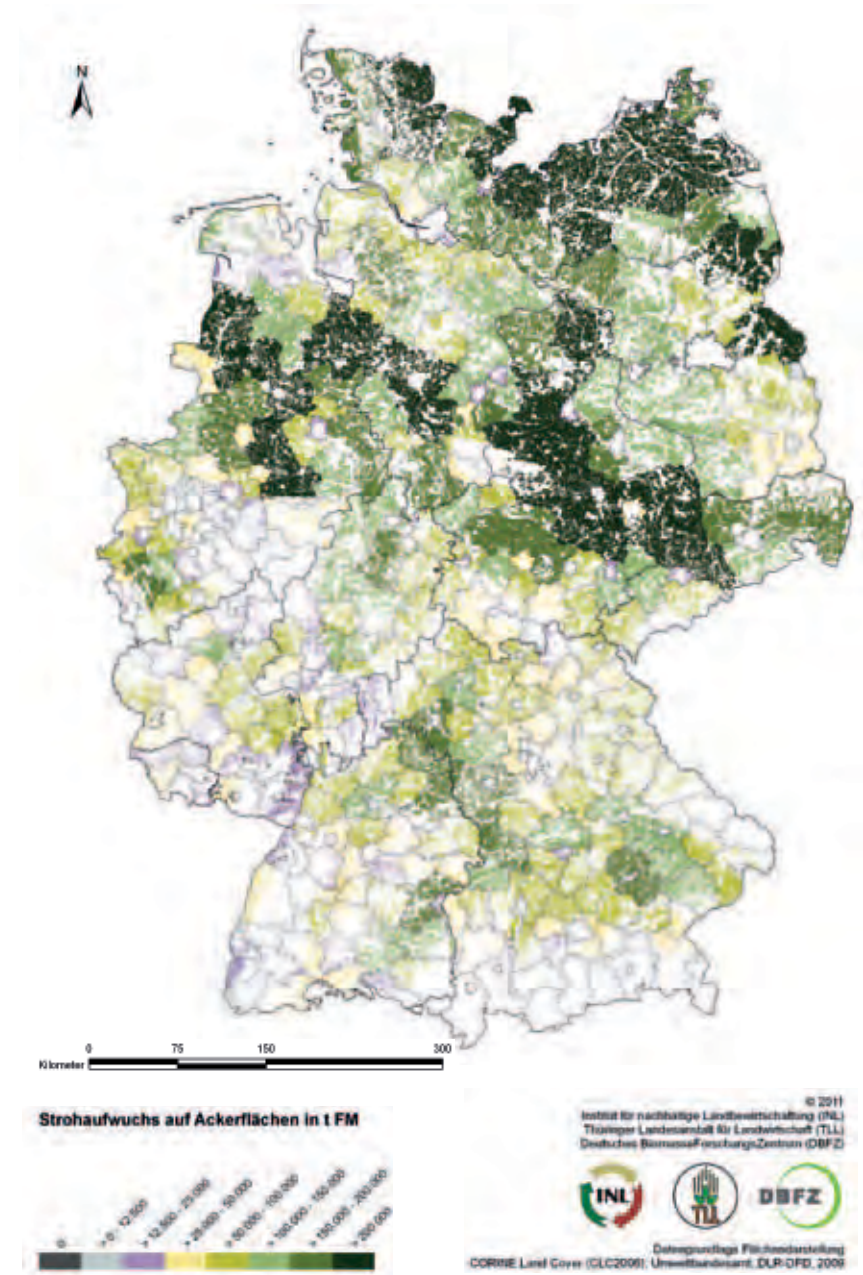


Abbildung 4b: Getreidestrohaufwuchs in Tonnen Frischmasse bezogen auf die Ackerfläche

## Strohpotenziale nach verschiedenen Bilanzmethoden

Abbildung 6 zeigt die Menge an Getreidestroh je Landkreis, welche den verschiedenen Methoden zufolge nutzbar ist. Es ergibt sich nach VDLUFA (unterer Wert) ein Gesamtpotenzial von 13 Millionen Tonnen Frischmasse pro Jahr. Bei einem mittleren Heizwert von 14,05 Megajoule pro Kilogramm Getreidestroh (bei 86 Prozent Trockenmasse) ergibt sich ein Brennstoffpotenzial von 186 Petajoule. In 52 von 412 Landkreisen kann nach dieser Methode kein Getreidestrohpotenzial ausgewiesen werden. Das Potenzial nach VDLUFA (oberer Wert) beträgt 10 Millionen Tonnen Frischmasse oder 139 Petajoule pro Jahr. Die Anzahl der Kreise, in denen nach dieser Methode kein Potenzial zur Verfügung steht, erhöht sich auf 81. Nach der dynamischen Humuseinheitenmethode sind insgesamt 8 Millionen Tonnen Getreidestroh (Frischmasse) oder 112 Petajoule als Potenzial zu erwarten. Die Anzahl der Landkreise ohne überschüssiges Getreidestroh erhöht sich somit auf 109.

In Tabelle 2 sind die Potenzialergebnisse auf Bundeslandebene verzeichnet. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass je nach Methode 27 bis 43 Prozent der aufgewachsenen Strohmenge nachhaltig genutzt werden können.

Tabelle 2: Strohpotenziale nach verschiedenen Bilanzmethoden auf Bundeslandebene

Bundesland	VDLUFA unterer Wert (t Stroh FM)	VDLUFA oberer Wert (t Stroh FM)	HE dynamisch (t Stroh FM)
Schleswig-Holstein	904 000	904 000	610 000
Hamburg	4 000	4 000	0
Niedersachsen	1 952 000	1 196 000	945 000
Bremen	1 000	1 000	0
Nordrhein-Westfalen	1 407 000	1 166 000	1 219 000
Hessen	660 000	605 000	634 000
Rheinland-Pfalz	367 000	248 000	247 000
Baden-Württemberg	816 000	699 000	832 000
Bayern	1 828 000	1 509 000	1 828 000
Saarland	32 000	32 000	33 000
Berlin	1 000	1 000	0
Brandenburg	759 000	471 000	439 000
Mecklenburg-Vorpommern	1 417 000	1 245 000	509 000
Sachsen	810 000	470 000	87 000
Sachsen-Anhalt	1 415 000	664 000	271 000
Thüringen	879 000	683 000	311 000
<b>Deutschland</b>	<b>13 252 000</b>	<b>9 898 000</b>	<b>7 965 000</b>

FM: Frischmasse, HE: Humuseinheiten, t: Tonne

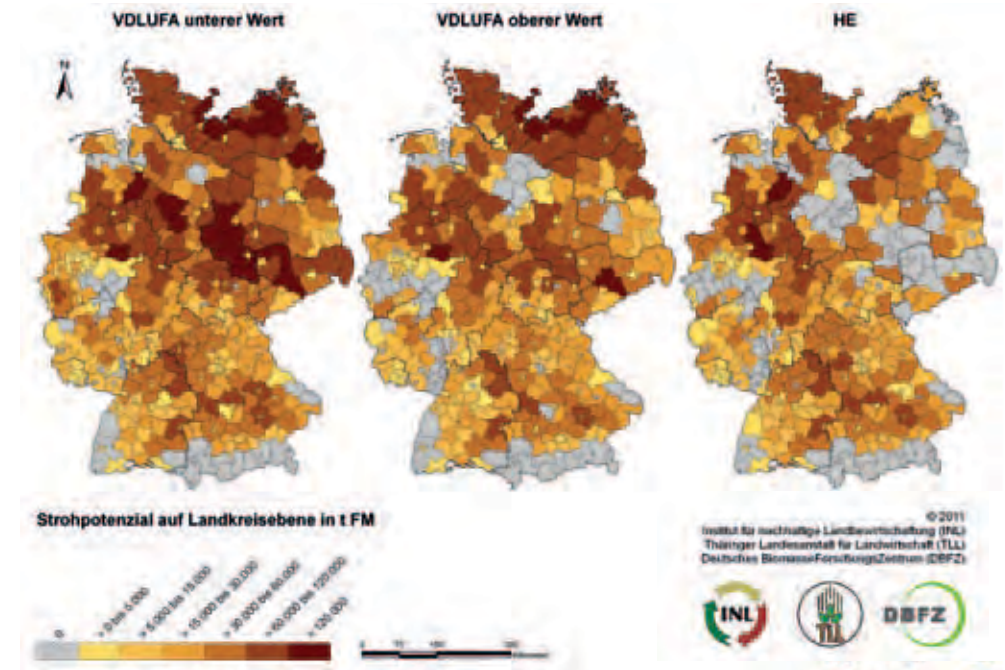


Abbildung 6: Getreidestrohpotenzial auf Landkreisebene nach VDLUFA unterer Wert (links), nach VDLUFA oberer Wert (Mitte) und nach dynamischer Humuseinheitenmethode (rechts) in Tonnen Frischmasse

## Regionale Auflösung von Strohpotenzialen

Die größten Strohpotenziale finden sich nach allen drei Methoden im Osten Schleswig-Holsteins und im Nordwesten von Mecklenburg-Vorpommern. Hohe Strohpotenziale sind ebenfalls bei allen drei Methoden entlang der nordwestlichen Grenze von Nordrhein-Westfalen zu Niedersachsen vorhanden. Drastische Unterschiede zwischen den VDLUFA-Ergebnissen und denen der dynamischen Humuseinheitenmethode zeigen sich in den Gebieten der Hildesheimer, Magdeburger und Querfurter Börde. In diesen Gebieten werden mit beiden VDLUFA-Methoden sehr hohe Potenziale erkannt. Laut der dynamischen Humuseinheitenmethode ist jedoch kaum oder kein Strohpotenzial vorhanden, da es zur Strohdüngung für eine ausgeglichene Humusbilanz benötigt wird.

Die großen Unterschiede in den Ergebnissen sind vor allem auf die unterschiedliche Bewertung der Humusreproduktionsleistung von Getreidestroh zurückzuführen (dynamische HE-Methode: 70 Kilogramm Humuskohlenstoff pro Tonne Stroh; VDLUFA: 80 - 110 Kilogramm Humuskohlenstoff pro Tonne Stroh). Aus diesem Grund unterscheiden sich gerade in Regionen mit geringem Viehbesatz und damit geringem tierischem Wirtschaftsdüngeranfall die Ergebnisse substantiell. Ungeachtet der jeweiligen Humusbilanz-Methode sind marginale Potenziale im Alpenvorland, zu beiden Seiten des Oberrheins

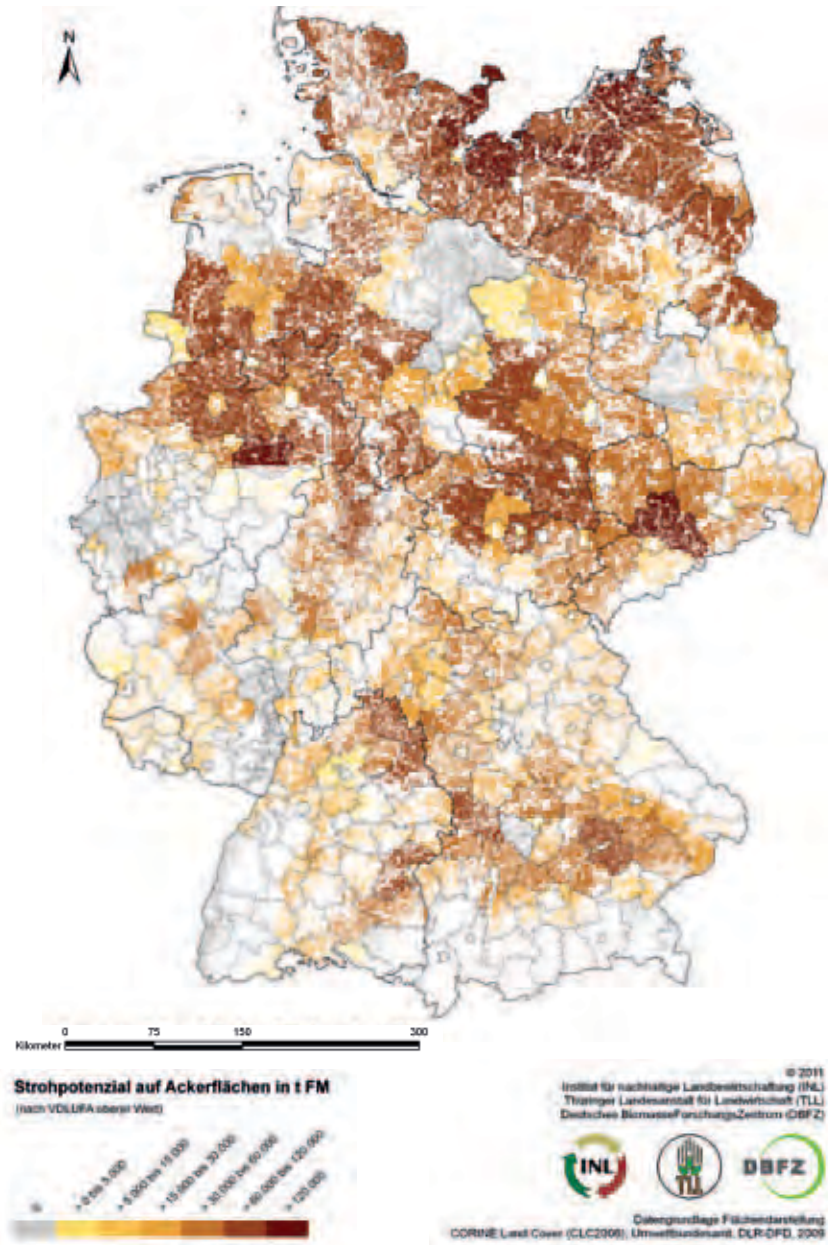


Abbildung 7: Getreidestrohpotenzial auf Landkreisebene in Tonnen Frischmasse mit Ackerflächenbezug nach VDLUFA (oberer Wert)

und in den Veredlungsgebieten Nordwestdeutschlands vorhanden. Der Grund dafür ist nicht die Humusbilanz, sondern der höhere Grünlandanteil, der hohe Viehbesatz (höhere Einstreu) und ein geringes Getreidestrohaufkommen. Landkreise wie Uelzen mit 35 Prozent Kartoffeln und Zuckerrüben je Ackerfläche (stark humuszehrende Fruchtarten) haben unabhängig von der Methode kein Potenzial. In Abbildung 7 sind die Getreidestrohpotenziale nach VDLUFA (oberer Wert) mit dem Bezug zur Ackerfläche zu sehen.

### Ausblick: Zukünftige Entwicklung des Strohpotenzials in Deutschland

Die dargestellten Ergebnisse sind geeignet für eine Abschätzung, in welchem Umfang nennenswerte regionale Strohmenge bereitstehen. Die Potenzialbestimmung auf Kreisebene lässt noch keine pauschale Übertragung auf Betriebsebene zu. Vor der Abfuhr von Getreidestroh sind schlagbezogene Humusbilanzen zu erstellen. Außerdem sind weitere Nachhaltigkeitskriterien wie die Nährstoffversorgung und die Erosionsdisposition der betroffenen Ackerflächen zu berücksichtigen.

Für die Bewertung der berechneten Potenziale über mittlere Zeiträume bis zum Jahr 2020 wurden landwirtschaftsbezogene Szenarien entwickelt. Diese Szenarien haben unmittelbaren Einfluss auf die zukünftige Entwicklung der Humusbilanzen und des Überschusstrohpotenzials. Im Szenario „business as usual“, das von einer Fortschreibung der gegenwärtigen Entwicklung in der Landwirtschaft ausgeht, kann gezeigt werden, dass mittelfristig mit erhöhten, mindestens jedoch konstanten Humusbilanzen sowie Strohpotenzialen bis zum Jahr 2020 zu rechnen ist. Sollte das Nebenernteprodukt Getreidestroh stärker nachgefragt sein (Szenario: „Stroh bekommt einen Wert“), sind je nach Methode Potenzialsteigerungen zwischen 46 und 63 Prozent möglich. Verantwortlich für derartig hohe Steigerungen sind Innovationen der Erntetechnik, welche die Menge des theoretisch bergbaren Getreidestrohs von 20 auf 27 Millionen Tonnen Frischmasse erhöhen. Diese Strohmenge können aber nur bei ausgeglichenen Humussalden mobilisiert werden, wenn entsprechende Humusersatzmaßnahmen wie eine Umstellung der Fruchtfolge (verstärkter Anbau von Humusmehrern) durchgeführt werden. Die resultierenden monetären Einbußen müssten dann durch einen höheren Strohpreis abgegolten werden.



## Entwicklung von Strohpotenzialen gemäß verschiedener Varianten der Bioenergienutzung



Die Erwartungen an die Bereitstellung von Bioenergieträgern aus der Landwirtschaft sind hoch und beziehen sich je nach Betrachter auf unterschiedliche Nutzungspfade. Neben dem heutigen Energiepflanzenpektrum könnte der Reststoff Stroh zukünftig eine tragende Rolle im Gesamtportfolio der nachwachsenden Rohstoffe spielen. Allerdings wirft die energetische Nutzung von Stroh neue Fragen auf: Welche Auswirkungen könnte der jeweilige Ausbau einer Bioenergielinie auf die Fruchtfolge und den Humushaushalt in der landwirtschaftlichen Flächenbewirtschaftung mit sich bringen? Wie verändern sich dabei voraussichtlich die geschätzten nachhaltigen Strohpotenziale?

Ausgangspunkt für die Berechnung verschiedener Varianten der Bioenergienutzung bilden die Ergebnisse zu den aktuellen Strohpotenzialen in vier ausgewählten Landkreisen. Diese Modellregionen spiegeln unterschiedliche Standort- und Strukturbedingungen wider (Abbildung 8). In vier Varianten werden unterschiedliche Nutzungskonkurrenten zur energetischen Verwertung in ihrer Auswirkung auf das verfügbare Strohpotenzial betrachtet:

In Variante 1 steht eine Erhöhung von Biokraftstoffen der ersten Generation wie Biodiesel und Bioethanol im Fokus. Dazu werden in den vier Landkreisen der Rapsanbau um 20 Prozent und der Winterweizenanbau um 10 Prozent erhöht. Allen anderen Kulturarten wird in Abhängigkeit ihrer realen Flächenanteile die Restfläche zugeordnet.

Variante 2 betrachtet eine erweiterte Biogaserzeugung, indem Getreideflächen ersetzt werden. Auf 30 Prozent der Ackerfläche sollen zu 70 Prozent Silomais und zu 30 Prozent Getreideganzpflanzensilage (Triticale) produziert werden. Der anfallende Gärrest wird direkt auf die Fläche des Landkreises zurückgeführt.

Variante 3 stellt eine alternative Biogasvariante dar. Ziel ist es, speziell Humusmehrer zu nutzen und damit den Humusbedarf in den Kreisen deutlich zu senken. Auf 30 Prozent der Bilanzfläche werden Klee anstelle von Silomais und Luzerne anstelle von Ganzpflanzensilage angebaut.

In Variante 4 wird die Etablierung von Kurzumtriebsplantagen auf 30 Prozent der Ackerfläche angenommen. Das Holz könnte als Rohstoff für verschiedene Verbrennungs- oder Vergasungsprozesse dienen. Die Aufteilung der Kulturarten auf der Restfläche bleibt entsprechend ihrer realen Anbauverhältnisse konstant.

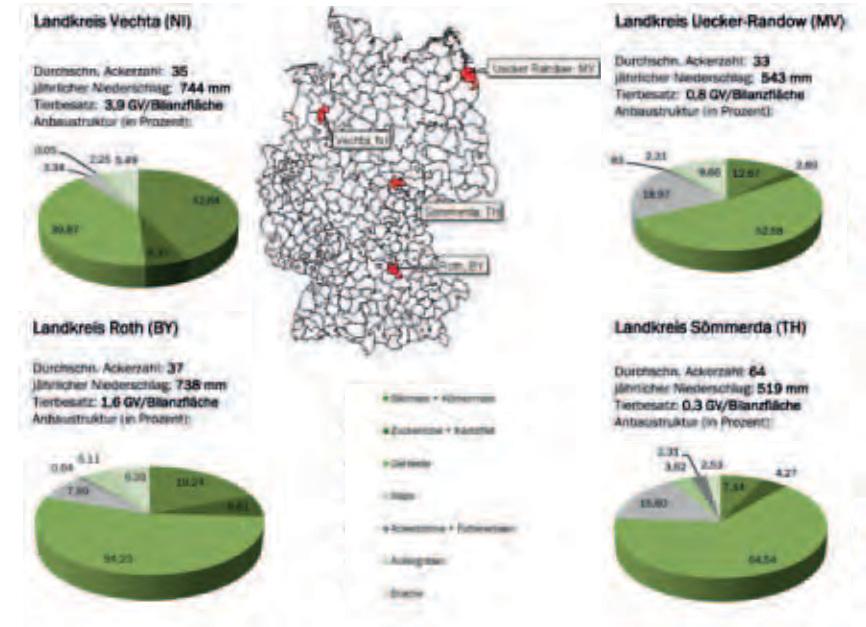


Abbildung 8: Standort- und Strukturbedingungen der ausgewählten Referenzkreise



## Ausgangssituation

Aufgrund der spezifischen Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen besitzen die Referenzkreise unterschiedlich hohe Humussalden und Strohpotenziale (Abbildung 9). Besonders im Landkreis Vechta fallen hohe Mengen an organischen Düngern an. Deutlich geringere Humusüberschüsse finden sich in den anderen Landkreisen. Mit der dynamischen Humuseinheitenmethode werden für den Uecker-Randow-Kreis und Sömmerda negative Salden ausgewiesen. Die ermittelten Strohpotenziale sind in den Landkreisen Vechta und Roth durch die anfallende Strohmenge und nicht durch die Humusbilanz begrenzt. Somit kann das gesamte Getreidestroh von den Flächen gefahren werden. In den Landkreisen Uecker-Randow und Sömmerda limitieren die Humussalden die nachhaltig zu erntende Strohmenge. Aufgrund der Ergebnisse der Humuseinheitenmethode wäre die energetische Strohnutzung in den beiden Kreisen gegenwärtig als nicht nachhaltig zu bewerten.

## Biokraftstoffe der ersten Generation

Die Erhöhung der Raps- und Weizenanteile und die damit verbundene Reduzierung der Anbaufläche führen nicht zwangsläufig zu einer Steigerung des Strohanfalls. Da alle Kreise hauptsächlich vom Getreideanbau geprägt sind, sorgt in der Regel der gesteigerte Rapsanbau für ein verringertes Strohaufkommen. Nur in Kreisen mit geringem Getreideanteil, wie in Vechta, wirkt sich ein höherer Weizenanteil positiv auf das Strohaufkommen aus. Die Veränderungen der Humussalden in den Bilanzmethoden sind mit verschiedenen Koeffizienten der betreffenden Fruchtarten zu erklären. So wird beispielsweise nach der dynamischen Humuseinheitenmethode die Humuszehrung für Weizen und Raps höher eingestuft als bei anderen Getreidearten und Silomais.

Daher ist vor allem die Humusbilanz bestimmend für die Abweichungen in den Strohpotenzialen der Kreise. Ein vermehrter Anbau von Raps und Weizen für Biodiesel

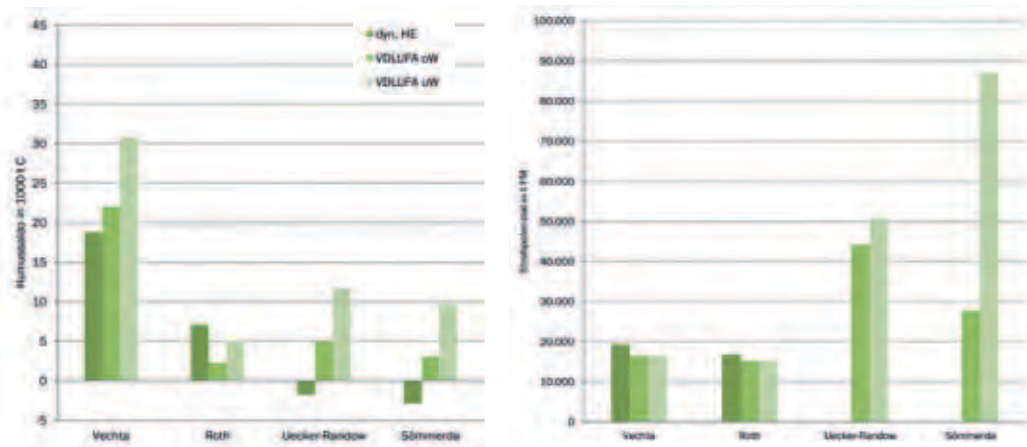


Abbildung 9: Humussalden und energetisch nutzbare Strohpotenziale in den Referenzkreisen (Ist-Bilanz)  
(C: Kohlenstoff, dyn. HE: dynamische Humuseinheitenmethode, FM: Frischmasse, t: Tonne, oW: oberer Wert, uW: unterer Wert)

beziehungsweise -ethanol erhöht bei der Bilanzierung nach VDLUFA das Strohpotenzial, wenn in diesen Kreisen die Humusbilanz ursprünglich der limitierende Parameter war (vergleiche Abbildung 10). Mit der dynamischen Bilanzmethode wird die Begrenzung der Strohentnahme durch den Humussaldo eher verstärkt. Durch ein vermindertes Strohaufkommen ist im Allgemeinen von einer Reduzierung des Strohpotenzials auszugehen. Nur in wenigen Kreisen könnte ein vom Humushaushalt limitiertes Potenzial leicht erhöht werden.

## Biogaserzeugung aus Silomais und Ganzpflanzensilage

Im Unterschied zu Variante 1 wird bei Silomais und Getreideganzpflanze die gesamte oberirdische Masse geerntet und siliert. Dadurch verringert sich in den Kreisen das Strohaufkommen enorm (Abbildung 11). Es kann von einer Halbierung des Strohaufwachses ausgegangen werden (Getreideanteil in der Ausgangssituation schwankt etwa zwischen 60 und 70 Prozent). Die Tatsache einer höheren Konzentration von Silomais in der Fruchtfolge auf Kosten von Getreide führt mit den Koeffizienten nach VDLUFA zu einem höheren Humusbedarf. Dieser kann auch nicht durch die Rückführung der Gärreste im Vergleich zur Ausgangssituation kompensiert werden. Demzufolge sinken bei Anwendung der Methodik nach VDLUFA in Variante 2 die Humussalden. In der dynamischen Humuseinheitenmethode halten sich der veränderte Humusbedarf und die zusätzliche Reproduktion über den Einsatz entstehender Gärreste das Gleichgewicht, sodass es nur marginale Änderungen im Saldo im Vergleich zur Ist-Bilanz gibt.

Entscheidend für die Strohpotenziale ist daher das Zusammenspiel beider Veränderungen. Zum einen reicht das anfallende Stroh nicht mehr für einen nutzbaren Restbestand, wie in den Landkreisen Vechta und Roth, aus. Zum anderen limitiert nun ein niedriger Humussaldo die nachhaltig zu erntende Strohmenge, wie in den Landkreisen Uecker-Randow und Sömmerda ersichtlich wird. Als Fazit lässt sich eine starke Konkurrenz ertragreicher Biogas-silagen zur energetischen Nutzung von Stroh erkennen.

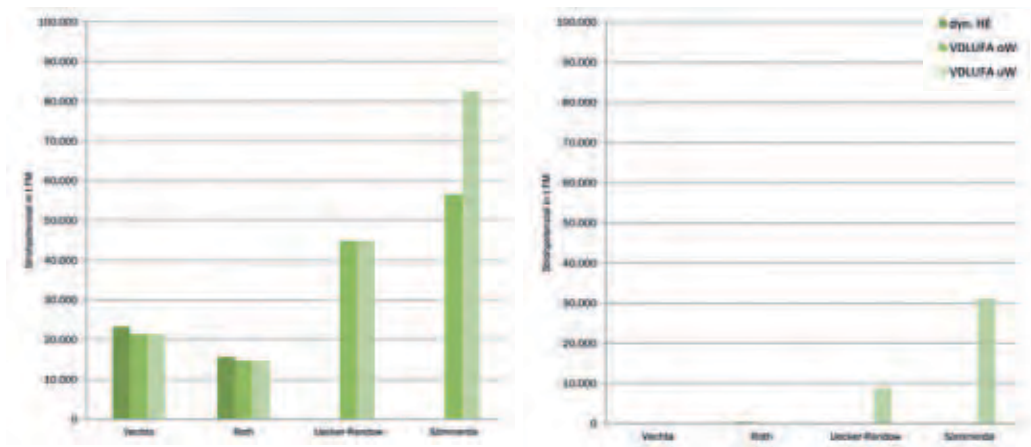


Abbildung 10: Variante 1 - Auswirkung einer erhöhten Biodiesel- und Bioethanolproduktion auf die Strohpotenziale in den Referenzkreisen

Abbildung 11: Variante 2 - Auswirkung einer erhöhten Biogasproduktion mit Mais und GPS auf die Strohpotenziale in den Referenzkreisen

## Biogaserzeugung aus Ackerfutterpflanzen



Analog zu Variante 2 führt die Änderung in der Anbaustruktur zur Reduktion des insgesamt aufgewachsenen Strohs. Deutlich positiv wirkt sich erwartungsgemäß ein um 30 Prozent gesteigerter Anteil von Humusmehrern auf den entsprechenden Saldo aus. Zusätzlich sind ebenfalls die entstehenden Gärreste 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 zeigen unterschiedliche Änderungstrends zur Ausgangssituation. Auch hier sind durch einen reduzierten Getreideanteil für die Landkreise Vechta und Roth keinerlei Strohmenge mehr zur energetischen Verwertung frei (Abbildung 12). In den anderen beiden Kreisen ist die anfallende Strohmenge ebenfalls begrenzt. Allerdings stehen auch bei einer Bilanz nach der Humuseinheitenmethode die Aufwuchsmengen vollständig für die Nutzung bereit. Somit

ist Variante 3 für die aktuelle Flächenbewirtschaftung mit negativen oder limitierenden Humussalden interessant. Mit dem Anbau von Ackerfutterpflanzen und der Biogaserzeugung können bedeutende Strohmenge nachhaltig nutzbar gemacht werden.

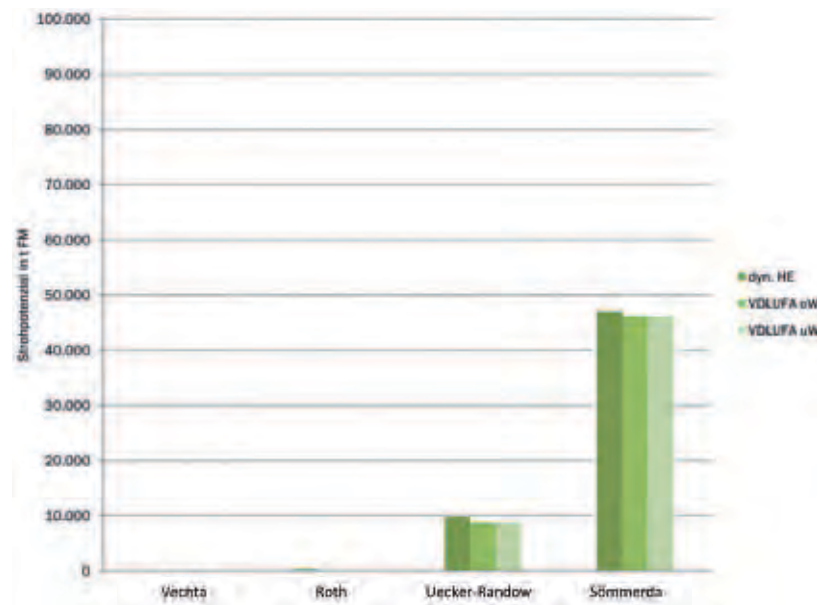


Abbildung 12: Variante 3 - Auswirkung einer erhöhten Biogasproduktion mit Ackerfutterpflanzen auf die Strohpotenziale in den Referenzkreisen (dyn. HE: dynamische Humuseinheitenmethode FM: Frischmasse, t: Tonne, oW: oberer Wert, uW: unterer Wert)

## Nutzung von Kurzumtriebsplantagen

In Abbildung 13 sind die Auswirkungen einer Etablierung von Kurzumtriebsplantagen auf Strohpotenziale zu sehen. Auch in dieser Variante 4 kommt es zur Reduktion der aufgewachsenen Strohmenge, die aber nicht so hoch ausfällt wie in den beiden vorigen Varianten. Die Änderungen in den Humussalden sind unabhängig von der Bilanzmethode nur marginal. Unterschiede werden nur in den Landkreisen mit ausgeprägter Tierhaltung sichtbar. Aufgrund der um 30 Prozent 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. Es steht weniger Stroh zur Verfügung als auf Basis des Humussaldos theoretisch von den Flächen abgefahren werden könnte. Nach der Humuseinheitenmethode ist dagegen hauptsächlich der Humussaldo der begrenzend 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 ein Verlust des energetisch nutzbaren Strohs einhergeht. Nur Landkreise, in denen der Humussaldo in der Ausgangssituation limitierend wirkte, könnten unter Umständen höhere Potenziale vorweisen. Die Nutzungssteigerung fällt aber eher gering aus.

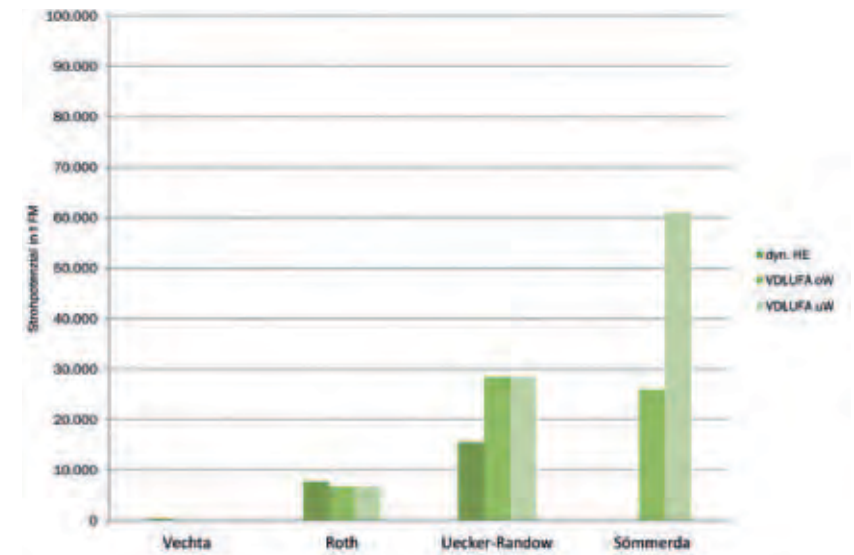


Abbildung 13: Variante 4 - Auswirkung einer Etablierung von Kurzumtriebsplantagen auf die Strohpotenziale in den Referenzkreisen (dyn. HE: dynamische Humuseinheitenmethode, FM: Frischmasse, t: Tonne, oW: oberer Wert, uW: unterer Wert)

Auch wenn die Ergebnisse aus den Humusbilanzierungen bedingt durch die Datenbasis nur eine ungefähre Schätzung derzeitiger nachhaltig nutzbarer Strohpotenziale zulassen, ist der Einfluss konkurrierender Bioenergieträger auf deren Verfügbarkeit quantifizierbar. Eine nennenswerte Anbausteigerung der hier betrachteten Fruchtarten führt in der Regel zur Verringerung der verfügbaren Strohmenge. Überwiegend sinken die Humussalden ab. Nur in Ausnahmefällen steigt die Humusversorgung leicht an und geringe Mengen werden gleichzeitig für eine Nutzung freigesetzt. Erhöhen sich dagegen die Anteile von Ackerfutterpflanzen wie Klee, Luzerne und Ackergras in die Fruchtfolge, werden in vielen humusunterversorgten Landkreisen bedeutende Strohpotenziale verfügbar und die beiden Nutzungskonzepte ergänzen sich.

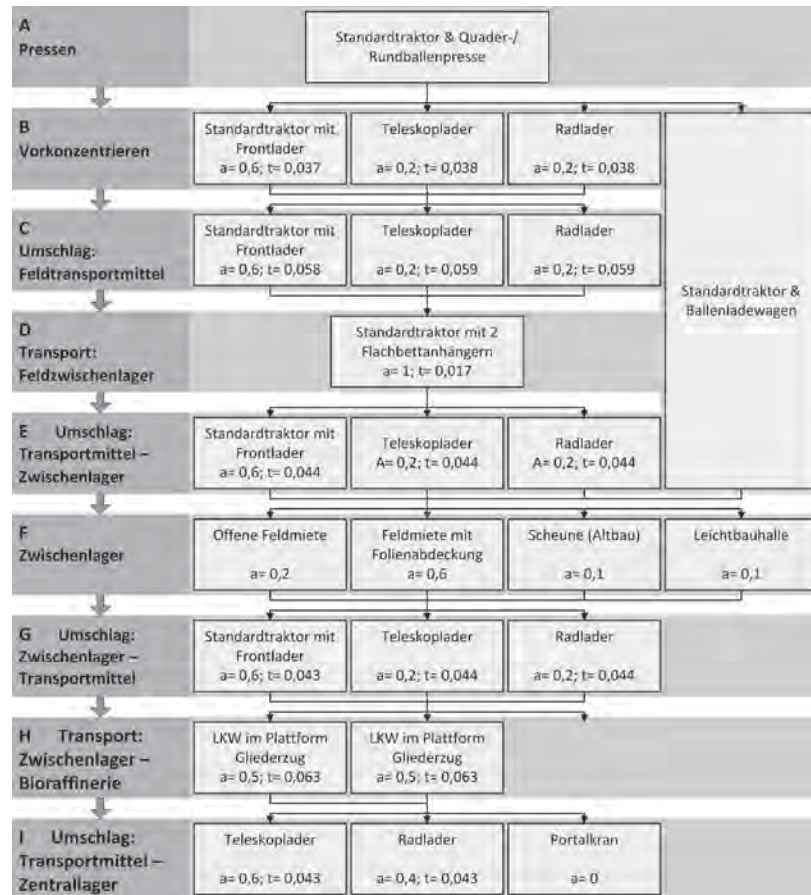


Abbildung 14: Übersicht über mögliche Maschinenkombinationen für verschiedene Prozesskettenelemente; Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Bereitstellungskette für das Anlagenkonzept Heizkraftwerk. Genannt werden die eingesetzten Maschinen(kombinationen) mit dem jeweiligen Anteil (a) am Prozessschritt und dem Zeitbedarf (t) für die Arbeiterledigung in Stunden (h) pro Tonne Trockenmasse.

## Bereitstellungs- und Anlagenkonzepte für die Nutzung von Stroh

Um übergeordnete Fragestellungen zu den ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der energetischen Strohnutzung beantworten zu können, ist die Entwicklung von Konzepten zur Strohbereitstellung und -nutzung notwendig. Aus welchen Prozessen bestehen Logistikketten zur Bereitstellung von Stroh? Wie verändern sich Logistikkonzepte in Abhängigkeit der Potenzialverfügbarkeit und der Anlagengröße? Welche Aufwendungen sind mit der Bergung von Stroh sowie mit Transport- und Umschlagprozessen verbunden? Welche Möglichkeiten gibt es heute und zukünftig für die Konversion von Stroh und welche Stoff- und Energieströme ergeben sich für verschiedene Anlagentypen?

Die Auswahl der im Projekt erstellten Konzepte orientiert sich an der Leitlinie, eine möglichst große Bandbreite an Konversionstechnologien abzudecken und marktverfügbare sowie auch zukünftige Technologien abzubilden. Die Anlagenkonzepte zur Wärme-, Strom- sowie Kraftstoffbereitstellung wurden in den Fachabteilungen des DBFZ entwickelt. Die Daten zur Charakterisierung der Stoff- und Energieströme basieren bei den kommerziell verfügbaren Anlagen auf Herstellerinformationen. Die anlagenspezifischen Kennwerte für zukünftige Nutzungspfade beruhen auf den Ergebnissen von Simulationen oder gehen aus der Skalierung von Literaturwerten hervor. Basierend auf den Ergebnissen der Anlagenkonzepte wurden Bereitstellungskonzepte für einen kleinen, mittleren und großen Strohbedarf entwickelt. In einem Excel-basierten Strohlogistiktool wurden die einzelnen Elemente einer Prozesskette (zum Beispiel Umschlags- oder Transportprozesse) spezifiziert.



### Bereitstellungskonzepte

Die spezifischen Anforderungen einer Konversionstechnologie und die in der Landwirtschaft vorhandenen Technologien bestimmen die Gestaltung der Logistikkette zur Strohbereitstellung. Für die einzelnen Prozessschritte (zum Beispiel Strohbergung, Lagerung, Umschlag) existiert dabei eine Vielzahl technischer Möglichkeiten (Abbildung 14). Die Charakterisierung und der Vergleich einzelner Prozessketten ist aus Sicht eines landwirtschaftlichen Betriebes ein interessanter Aspekt. Aus der Sicht des Anlagenbetreibers geht es nicht nur um eine einzelne Prozesskette sondern darum, wie sich die verschiedenen Prozessketten zur Versorgung einer Anlage anteilig zusammensetzen. Eine typische Bereitstellungskette für eine Anlage mit mittlerem Strohbedarf kann beispielsweise aus den in Abbildung 14 definierten Elementen bestehen.

## Strohbergung

Wie viel Stroh und in welcher Qualität bei der Getreideernte anfällt, ist abhängig von der Fruchtart, der Sorte und den lokalen Bedingungen, wie zum Beispiel den Bodenverhältnissen, der Witterung und dem Bewirtschaftungsverfahren. Die Ernte des Getreides findet abhängig von diesen Parametern im Zeitfenster von Juni bis September statt.

Der Erlös aus dem Strohverkauf muss alle Aufwendungen bis zur vereinbarten Übergabestelle abdecken. Das beinhaltet neben den Personal- und Maschinenkosten auch die zusätzlichen Kosten für die abgefahrenen Nährstoffe sowie für die nötigen Humusersatzmaßnahmen. Im Projekt wird zur Ermittlung der Kosten ein Modell eingesetzt, welches an der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft entwickelt wurde. Es basiert auf praxisnahen Verfahrensparametern, Betriebsmittelpreisen und Leistungen, die zum Teil aus eigenen Erhebungen stammen. Für die technischen Parameter wird auf eine Datengrundlage des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) zurückgegriffen. Die Kosten der Strohbergung werden für eine in der Praxis übliche Variante und für eine optimierte Variante berechnet.



Tabelle 3: Rohstoffbedarf, Einzugsgebiete und durchschnittliche Transportdistanzen für verschiedene Anlagentypen

Anlagentyp	Rohstoffbedarf	Jährlicher Strohverbrauch (inkl. Lagerverluste)	Einzugsgebiet	Durchschnittl. Transportdistanz	Logistikkonzept
	(t TM)	(t TM)	(km <sup>2</sup> )	(km)	
Heizwerk	228	245	9	2,9	Basis <sub>Klein</sub> + Optimiert <sub>Klein</sub>
Biogasanlage	2 168	2 740	101	8,4	Basis <sub>Mittel</sub> + Optimiert <sub>Klein</sub>
Heizkraftwerk	13 199	14 347	531	23	Basis <sub>Mittel</sub> + Optimiert <sub>Mittel</sub>
Pelletierwerk	34 400	37 391	1 385	37	Basis <sub>Groß</sub> + Optimiert <sub>Groß</sub>
Bio-SNG-Anlage	48 390	52 598	1 948	43,9	Basis <sub>Groß</sub> + Optimiert <sub>Groß</sub>
Pyrolyseanlage	172 000	186 957	6 924	83,1	Basis <sub>Groß</sub> + Optimiert <sub>Groß</sub>
Ethanolanlage	258 000	280 435	10 386	101,8	Basis <sub>Groß</sub> + Optimiert <sub>Groß</sub>

SNG: Synthetic Natural Gas, t TM: Tonnen Trockenmasse

## Konzepte für den niedrigen, mittleren und hohen Rohstoffbedarf

Die Bereitstellungskette von Stroh kann in Abhängigkeit des jährlichen Rohstoffbedarfs der Konversionsanlage stark variieren. Bei einem hohen Rohstoffbedarf ist bei Transport-, Lagerungs- und Umschlagprozessen eine andere Maschinenkonstellation sinnvoll als bei dezentralen Anlagen mit geringem Rohstoffverbrauch. Daher wurden drei Konzepte für verschiedene Anlagengrößen entwickelt (klein, mittel, groß). Während beispielsweise in den Konzepten mit einem Jahresbedarf bis 2000 Tonnen pro Jahr davon ausgegangen wird, dass die Distanz zwischen Feld und Konversionsanlage mit Traktor und Anhänger zurückgelegt wird und es nur ein Zentrallager gibt, werden bei größeren Anlagen Zwischenlager und LKW-Transport angenommen. Die Konzepte wurden zum einen als Basisvariante aufgestellt, die den jeweils aus derzeitiger Sicht wahrscheinlichsten Weg für die Strohbereitung repräsentiert. Zum anderen wurde eine kostenoptimierte Variante entworfen, bei der jeweils angenommen wird, dass für jeden einzelnen Prozessschritt jeweils ausschließlich die Maschinenkombination mit den geringsten Kosten zum Einsatz kommt.

## Einzugsgebiet und mittlere Transportentfernung

Das Stroeinzugsgebiet einer Konversionsanlage und die damit direkt korrelierte mittlere Transportentfernung können abhängig von der mittleren Strohverfügbarkeit auf Landschaftsebene und dem jährlichen Strohbedarf der Anlage einschließlich Lagerverlusten bestimmt werden. Die Ergebnisse für die verschiedenen Anlagentypen sind in Tabelle 3 dargestellt. Bei einem mittleren technischen Strohpotenzial von 2,8 Tonnen Trockenmasse pro Hektar Getreidefläche ergeben sich in Abhängigkeit der Anlagengröße unterschiedlich große Einzugsgebiete und Transportdistanzen. Bei dem Anlagenkonzept zur Ethanolproduktion würden die durchschnittlichen Transportdistanzen beispielsweise über 100 Kilometer ausmachen.





## Anlagenkonzepte

Aus der Vielzahl von verfahrenstechnischen Ansätzen zur energetischen Nutzung von Stroh wurden im Projekt sieben ausgewählt und daraus Anlagenkonzepte zur Wärme-, Strom beziehungsweise der gekoppelten Strom- und Wärme- sowie Kraftstoffbereitstellung entwickelt. In Tabelle 4 werden die anlagenspezifischen Kennwerte der Modellanlagen gezeigt. Das Spektrum der Technologien reicht von marktverfügbaren Anlagen (Pelletskessel, Heizwerk, Heizkraftwerk) bis hin zu Anlagen, die sich noch im Pilot- oder Demonstrationsstadium befinden. Der Rohstoffbedarf der Anlagen reicht von einem jährlichen Bedarf von 26 Tonnen für den Pelletskessel bis hin zu vier Millionen Tonnen Stroh im Anlagenkonzept zur Herstellung von Fischer-Tropsch-Diesel. Stroh wird in diesen Anlagen als Häcksel, in pelletierter Form oder auch als Stroh-Kleegrassilage eingesetzt.

Tabelle 4: Anlagenspezifische Kenndaten für verschiedene Konzepte

Anlagentyp	Eingangsleistung		Rohstoffbedarf (t FM/a)	Substrat	Energieoutput (MWh/a)	
Pelletskessel	40	kW	25,6	Strohpellets	93	MWh <sub>th</sub>
Heizwerk	400	kW	256	Strohhäcksel	890	MWh <sub>th</sub>
Biogasanlage	1,25	MW	2 571	Stroh (als Stroh-Kleegrassilage), zusätzlich Gülle	4 000 4 500	MWh <sub>el</sub> MWh <sub>th</sub>
Heizkraftwerk	11,2	MW	15 348	Stroh	12 305 40 125	MWh <sub>el</sub> MWh <sub>th</sub>
SNG-Anlage	30	MW	56 268	Strohpellets	135 075	MWh <sub>KS</sub>
20 Pyrolyseanlagen, anschließende Fischer-Tropsch-Synthese	2 000	MW	20 x 200 000	Stroh	5 789 010	MWh <sub>KS</sub>
Ethanol-Anlage	156	MW	300 000	Stroh	281 833	MWh <sub>KS</sub>

a: Jahr, el: elektrisch, KS: Kraftstoff, kW: Kilowatt, MW: Megawatt, MWh: Megawattstunden, SNG: Synthetic Natural Gas, t FM: Tonnen Frischmasse, th: thermisch

Die Bereitstellungs- und Anlagenkonzepte bilden die Grundlage für die nachfolgende Kostenbetrachtung und die Treibhausgasbilanzierung. Auf Basis der Ergebnisse aus dem Logistikttool ist es möglich, Parameter wie die Rohstoffkosten frei Anlage zu berechnen. Daraus können Anhaltspunkte für Optimierungsmöglichkeiten in der Logistikkette abgeleitet werden. Eine genaue, auf den jeweiligen Einzelfall angepasste Logistikplanung kann damit nicht ersetzt werden. Auf Grundlage der Stoff- und Energieströme der Anlagenkonzepte können die Gestehungskosten und Treibhausgasemissionen für verschiedene Energieträger und Endenergien berechnet werden. Da alle Konzepte von einem einheitlichen Strohpotenzial ausgehen, können die Konzepte eines Bereiches, wie die Wärmekonzepte, anhand dieser Kriterien verglichen werden. Ein Vergleich zwischen den Bereichen, zum Beispiel zwischen Kraftstoff- und Wärmepfaden ist nicht sinnvoll, da es sich um andere Energieformen handelt. Da für die Kraftstoffkonzepte keine Anlagendaten existieren, beruhen die Stoff- und Energieströme auf Prozesssimulationen, Hochrechnungen und Abschätzung. Sie

sind mit einer großen Unsicherheit behaftet und können daher nur eine Größenordnung angeben, in der sich eine zukünftige Produktion bewegen könnte. Die Bilanzierung und Bewertung der Konzepte nach ökonomischen und ökologischen Kriterien wird in den folgenden Kapiteln dargestellt.

## Anlagenkonzept Strohheizkraftwerk

Im Folgenden wird exemplarisch das Anlagenkonzept zum Strohheizkraftwerk vorgestellt. Der Vorteil von Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung ist die höhere Brennstoffausnutzung, da nicht wie bei alleiniger Stromerzeugung die überschüssige Wärme an die Umgebung abgegeben wird, sondern zu Heizzwecken beziehungsweise als Prozesswärme genutzt werden kann. Als Referenzanlage dient eine Anlage nach dänischem Vorbild. Im ersten Prozessschritt erfolgt die Brennstoffbeschickung durch ein automatisches Kransystem und anschließend die Zerkleinerung der Quaderballen in einem Ballenauflöser. Das Strohhäcksel wird danach über einen pneumatisch betriebenen Kolben in den Brennraum des Kessels gefördert. Dort wird das Strohhäcksel auf einem wassergekühlten, modular aufgebauten Schüttelrost 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 450 °C und einen Druck von etwa 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. Die einzelnen Prozessschritte der analysierten Referenzanlage sind in Abbildung 15 schematisch dargestellt.



Abbildung 15: Schematische Darstellung der Prozessschritte für das Anlagenkonzept Strohheizkraftwerk (a: Jahr, el: elektrisch, FM: Frischmasse, h: Stunde, MWh: Megawattstunde, t: Tonne, th: thermisch)

## Bilanzierung der bereitstellungsbedingten Treibhausgasemissionen für Stroh



Bei einer nachhaltigen energetischen Nutzung von Bioenergie spielt die Treibhausgasbilanz (THG-Bilanz) insbesondere in Hinblick auf den Klimaschutz eine wichtige Rolle für eine Bewertung. Für landwirtschaftliche Produkte und Reststoffe wird bisher aber die Humusbilanz in einer THG-Bilanzierung nicht berücksichtigt. Im Rahmen einer umfassenden Betrachtung der Problematik müssen folgende Fragen gestellt werden: Nehmen die Werte der THG-Bilanz des Bodenkohlenstoffs eine relevante Größenordnung im Vergleich zu THG-Emissionen durch Aufwendungen für den Anbau (Diesel, Dünger, Pestizide) ein? Wie und in wie weit lässt sich

die Bilanzierung des Bodenkohlenstoffs in die Bilanzierung der bereitstellungsbedingten THG-Emissionen berücksichtigen? Wie stellt sich die THG-Bilanz von Stroh dar, wenn der Entzug an Bodenkohlenstoff und Stickstoff im Stroh berücksichtigt wird? Wie wirkt sich eine Optimierung der Fruchtfolge auf eine mögliche Strohentnahme und die THG-Bilanz aus?

Die Ansätze der THG-Bilanzierung und der Humusbilanzierung unterscheiden sich insbesondere im Bezugsraum, für den die Bilanzierungen durchgeführt werden. Der Ansatz der Humusbilanzierung berücksichtigt die gesamte Fruchtfolge, inklusive von Winterzwischenfrüchten sowie von Brachflächen. Bei der THG-Bilanzierung wird hingegen zumeist eine ausgewählte Fruchtart betrachtet.

Trotz dieses Unterschieds ist für einzelne Fruchtarten eine Integration der THG-Emissionen, die durch einen Bodenkohlenstoffaufbau und -abbau hervorgerufen werden, durchaus möglich. Die Bodenkohlenstoffbilanz für Anbau und Ernte sowie die Entnahme von Reststoffen (Stroh), den Diesel- und Pestizideinsatz, den Einsatz anorganischer Dünger sowie die Lachgasfreisetzung können fruchtartenscharf zugewiesen werden. Für die Effekte, die nicht auf eine Fruchtart bezogen werden können, wurde ein methodischer Ansatz für ein Umlagesystem entwickelt, um positive Effekte aus Winterzwischenfrucht, Brache und Wirtschaftsdüngergabe auf die Hauptprodukte der Fruchtarten zu verteilen. Dieses Umlagesystem wurde in ein Berechnungstool übersetzt, das die Bodenkohlenstoffdynamik gemäß der Humusbilanzierung (VDLUFA- und HE-Methode) berücksichtigt.

## Relevanz der Humusbilanz für die THG-Bilanzierung

Im Rahmen der Methoden zur Humusbilanzierung wird beim Anbau von Feldfrüchten zwischen den Aspekten Kohlenstofffreisetzung oder -bindung durch Anbau und Ernte und Kohlenstoffbindung durch den Verbleib von Reststoffen beziehungsweise Ernterückständen auf der Fläche unterschieden. Dabei wird für den Anbau von einer fixen Kohlenstofffreisetzung oder -bindung pro Fläche ausgegangen (VDLUFA) beziehungsweise diese wird dynamisch errechnet (HE-Methode). Ernterückstände, die auf der Fläche verbleiben, gehen in die Humusbilanzierung mit bestimmten Reproduktionswerten als Kohlenstoffbindungen ein (Tabelle 5).

Tabelle 5: Kohlenstofffreisetzung und -bindung und die daraus entstehenden THG-Emissionen oder -Fixierung nach verschiedenen Humusbilanzmethoden

	C-Freisetzung (-)/ C-Bindung (+) (kg Humus-C/ha)	THG-Emissionen (+)/ THG-Einsparung (C-Fixierung) (-) (g CO <sub>2</sub> -Äq./MJ)	Humusbilanz- methode
Weizenkörner	- 280	+ 9,26	VDLUFA <sub>u</sub>
	- 400	+ 13,22	VDLUFA <sub>o</sub>
	-203 bis -609	+ 6,71 bis + 20,13	HE-Methode
Ernterückstände (Stroh)	+ 93 bis + 128	- 16,05 bis - 20,10	VDLUFA <sub>u</sub>
	+ 93 bis + 128	- 16,05 bis - 20,10	VDLUFA <sub>o</sub>
	+ 92,8	- 16,02	HE-Methode

Äq: Äquivalente, C: Kohlenstoff, MJ: Megajoule, HE: Humuseinheiten, o: oberer Wert, u: unterer Wert

Die THG-Bilanzen für den Anbau von Weizenkörnern liegen ohne Berücksichtigung der Humusbilanz bei etwa 23 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Megajoule und für die Bergung von Stroh unter 0,5 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Megajoule. Der Vergleich dieser Werte mit den möglichen THG-Emissionen durch den Bodenkohlenstoffumsatz (bis zu 20 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Megajoule) zeigt, dass die Humusbilanz eine relevante Größe für die THG-Bilanzierung annimmt.

## THG-Bilanz von Weizenkörnern und -stroh bei der Integration der Humusbilanz

Bei der Betrachtung des Weizenanbaus ohne die Berücksichtigung des Bodenkohlenstoffs zeigt sich, dass durch die Aufwendungen während des Anbaus 21,8 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Megajoule Weizen freigesetzt werden (Abbildung 16). Dabei entfällt ein Großteil auf die Düngergabe und die damit verbundene Lachgasfreisetzung. Hingegen errechnet sich für die THG-Emissionen des Reststoffes Stroh ein deutlich geringerer Wert von 1,95 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Megajoule, der durch die Ersatzdüngung für Stickstoff dominiert wird.

Die THG-Bilanz des Weizens wird bei der Berücksichtigung der Emissionen durch die Bodenkohlenstofffreisetzung beim Weizenanbau um 13,2 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Megajoule erhöht. Verbleibt das Stroh auf der Fläche, so werden -20,1 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Megajoule als Bodenkohlenstoff fixiert. Da mehr Kohlenstoff durch das Stroh im Boden eingelagert als durch den Anbau freigesetzt wird, verbessert sich die Gesamt-THG-Bilanz für den Weizenanbau auf einen Wert von 14,3 CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Megajoule. Für das Weizenstroh stellt sich das Ergebnis umgekehrt dar. Durch die Strohentnahme und der damit verbundenen Freisetzung von Bodenkohlenstoff verschlechtert sich die Gesamtbilanz auf einen Wert von 26,8 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Megajoule (Abbildung 16).

Die in Abbildung 16 vorgestellte THG-Bilanzierung ist nicht in eine Fruchtfolge eingebunden. Durch Brachen, den Anbau einer Winterzwischenfrucht und die Gabe von organischem Dünger kann sich durch das oben genannte Umlagesystem die THG-Bilanz für das Weizenkorn noch einmal verbessern. Da das Stroh für die Umlage ausgenommen ist, sind aber die Werte für das Stroh als feste Werte anzusehen. Dieses Ergebnis unterstreicht die Notwendigkeit, die Humusbilanz für den Reststoff Stroh in der THG-Bilanz zu berücksichtigen.

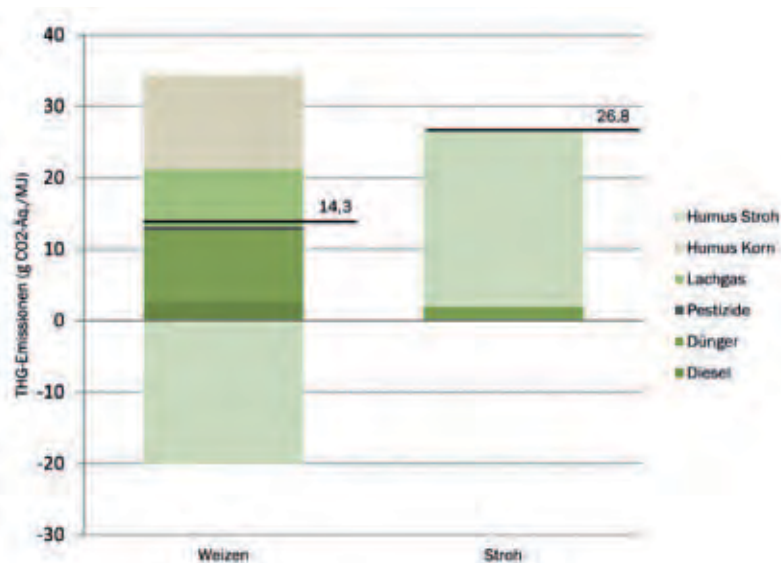


Abbildung 16: Bereitstellungsbedingte Treibhausgasemissionen für Weizenkörner und -stroh unter Berücksichtigung der Humusbilanzierung (VDLUFa oberer Wert). Die Strohentnahme basiert auf einer ausgeglichenen Humusbilanz. Der Anbau ist nicht in eine Fruchtfolge eingegliedert. Die Daten stammen von einem niedersächsischen Beispielbetrieb (Äq: Äquivalente, MJ: Megajoule, THG: Treibhausgas)



## Optimierung der Fruchtfolge für eine mögliche Strohentnahme

An einem Beispielbetrieb wird die Optimierung der Fruchtfolge mit dem Ziel einer erhöhten Strohentnahme demonstriert. Der ausgewählte Betrieb befindet sich im nördlichen Harzvorland in Niedersachsen am Rand der Hildesheimer Börde mit lehmigen Lössböden und einem trocken-warmen Klima. In der bisherigen Bewirtschaftung (Ist-Zustand) werden die Nebenprodukte wie Stroh und Rübenblatt zum Ausgleich der Humusbilanz auf den Flächen belassen und nach der Ernte eingearbeitet. Die bestehende Fruchtfolge wurde entsprechend den Angaben in Tabelle 6 optimiert, um eine Erhöhung der Strohentnahme zu erreichen.

Tabelle 6: Varianten zur Optimierung des Beispielbetriebs

Benennung	Beschreibung
Ist-Zustand (IST)	Beispielbetrieb mit hohem Getreideanteil (90 ha Weizen, 12 ha Gerste, 10 ha Hafer, 39 ha Zuckerrübe/Winterzwischenfrucht, 8 ha Raps)
Erhöhung der Winterzwischenfrucht (WZF)	Optimierung der Strohentnahme durch einen erhöhten Anbau an Zwischenfrucht auf Haferflächen (10 ha)
Raps statt Zuckerrübe (R-ZR)	Optimierung der Strohentnahme durch Reduzierung des Zuckerrübenanbaus zugunsten des Anbaus von Raps (10 ha, Winterzwischenfrucht wie in Variante WZF)
Ackergras statt Zuckerrübe (AG-ZR)	Optimierung der Strohentnahme durch Reduzierung des Zuckerrübenanbaus zugunsten des Anbaus von Ackergras (10 ha, Winterzwischenfrucht wie in Variante WZF)

Ohne Strohentnahme führt diese Optimierung zu einer Verbesserung der THG-Bilanz der gesamten Fruchtfolge von 14,2 auf 12,1 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Megajoule. Dabei wurde die Humusbilanz nach VDLUFa (oberer Wert) berücksichtigt (Tabelle 7). Allerdings verringert sich der Gesamtertrag von 1402 auf bis zu 1266 Tonnen Trockenmasse, da Raps und Ackergras geringere Erträge als Zuckerrübe liefern. Eine Strohentnahme bis zur ausgeglichenen Humusbilanz führt für die Variante WZF und AG-ZR dazu, dass der Gesamtertrag im Vergleich zur Variante IST leicht gesteigert werden kann. Dabei verbessert sich die THG-Bilanz der gesamten Fruchtfolge aber nur geringfügig. Dies ist der positiven Wirkung der Winterzwischenfrucht und dem Anbau von Ackergras auf den Bodenhumus zu verdanken. Für die Variante R-ZR tritt aber trotz Strohentnahme eine Abnahme des Gesamtertrags und eine Verschlechterung der THG-Bilanz der Fruchtfolge auf, was vor allem an dem niedrigen Flächenertrag des Raps liegt (Tabelle 7).

Tabelle 7: Bilanzierung der Fruchtfolge (Ertrag und THG-Emissionen bezogen auf den Heizwert) für die Varianten eines niedersächsischen Beispielbetriebs unter Berücksichtigung der Humusbilanzierung nach VDLUFA oberer Wert

		Ertrag		THG Anbau ohne Humus (g CO <sub>2</sub> -Äq./MJ)	THG-Humus (g CO <sub>2</sub> -Äq./MJ)	THG TOTAL (g CO <sub>2</sub> -Äq./MJ)
		Gesamt	Stroh			
		(t TM)	(t TM)			
Ohne Strohentnahme	IST	1 402	0	16,50	-2,33	14,17
	WZF	1 402	0	16,55	-2,83	13,72
	R-ZR	1 266	0	17,87	-3,91	13,96
	AG-ZR	1 296	0	17,06	-4,97	12,09
Mit Strohentnahme	IST	1 531	129,4	15,25	0	15,25
	WZF	1 559	156,9	15,06	0	15,06
	R-ZR	1 464	198,9	15,70	0	15,70
	AG-ZR	1 552	255,3	14,54	0	14,54

Äq.: Äquivalente, IST: Ist-Zustand, t TM: Tonnen Trockenmasse, MJ: Megajoule, WZF: Erhöhung der Winterzwischenfrucht

Abschließend ist festzuhalten, dass die THG-Bilanz des Reststoffs Stroh signifikant durch die Berücksichtigung der Humusbilanz ansteigt. Dieser Aspekt wird in der THG-Bilanzierung, wie sie zum Beispiel in der Erneuerbaren Energien-Richtlinie angewandt wird, nicht berücksichtigt. Es ist empfehlenswert, die Treibhausgasbilanz für das Stroh sowohl mit und ohne die Effekte des Strohtzugs (Stickstoff und Kohlenstoff) zu berechnen, um letztlich einschätzen zu können, ob es für den Klimaschutz vorteilhafter ist, das Stroh zu bergen oder es auf den Ackerflächen zu belassen.

## Bilanzierung der Treibhausgasemissionen verschiedener Strohnutzungskonzepte

Für eine Bewertung der Klimagaswirkung durch die energetische Strohnutzung müssen alle Prozessschritte vom Anbau bis hin zur Nutzung berücksichtigt werden. Ausgehend von einheitlichen Annahmen zum Strohpotenzial sollen die verschiedenen Bereitstellungs- und Anlagenkonzepte bezüglich ihrer Klimawirkung untersucht werden. Dabei müssen folgende Fragen beantwortet werden: Wie stellen sich die Treibhausgasemissionen für verschiedene Strohnutzungskonzepte im Wärme-, Strom- und Kraftstoffbereich dar? Wie hoch ist das Potenzial im Vergleich zu fossilen Referenzpfaden Treibhausgasemissionen einzusparen?



Die Bilanzierung der Treibhausgase verschiedener Strohnutzungskonzepte erfolgte über das Instrument der Ökobilanzierung. Innerhalb einer Ökobilanzierung wird der Lebensweg des untersuchten Produktes von der Rohstoffgewinnung über die Produktion bis zur Entsorgung analysiert. Dabei werden alle von der Rohstoffbereitstellung bis zur Distribution verwendeten Hilfs- und Betriebsstoffe sowie die eingesetzte Hilfsenergie berücksichtigt (Abbildung 17).

Die Methodik zur Bilanzierung im Rahmen dieses Projektes orientiert sich im Wesentlichen an den Normen ISO 14040 und ISO 14044, hat aber auch einige Vorgaben aus der Erneuerbaren Energien Richtlinie (2009/28/EG) beziehungsweise der Empfehlung für Nachhaltigkeitskriterien für feste und gasförmige Biomasse zur Erzeugung von Strom, Wärme und Kälte (COM(2010)11) übernommen. Wie in Abbildung 17 dargestellt, entstehen bei der

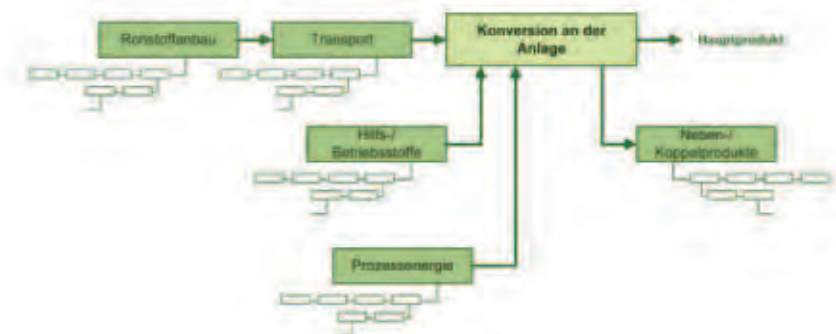


Abbildung 17: Schematische Darstellung einer Prozesskette

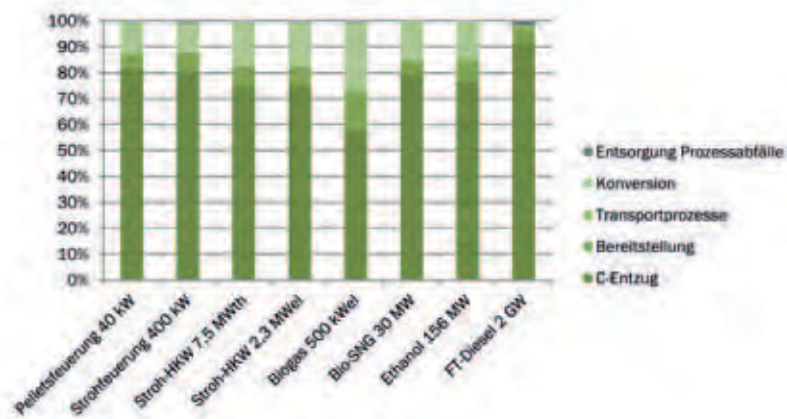


Abbildung 18: Prozentualer Anteil der einzelnen Prozessschritte an den Gesamtemissionen (C: Kohlenstoffzug, el: elektrisch, FT: Fischer Tropsch, GW: Gigawatt, HKW: Heizkraftwerk, kW: Kilowatt, MW: Megawatt, th: thermisch)

Erzeugung eines Hauptproduktes häufig auch Nebenprodukte. In solchen Fällen stellt sich die Frage, wie die berechneten Emissionen des Gesamtprozesses den verschiedenen Prozessprodukten zuzuordnen sind. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Ansätze der so genannten Energieallokation (für Nebenprodukte) sowie der Exergieallokation (für Prozesse bei denen als Nebenprodukt Wärme entsteht) verwendet. Eine weitere wichtige methodische Frage ist die Wahl des fossilen Referenzsystems. Für den hier dargestellten Vergleich wurden Referenzsysteme ausgewählt, die durchschnittliche Verhältnisse in Deutschland widerspiegeln.

### Einfluss der Humusbilanz auf die Treibhausgasbilanz der Gesamtkette

Wie bereits im vorherigen Kapitel gezeigt wurde, kann die Berücksichtigung von Humusbilanzen in einer Treibhausgasbilanz im Fall der energetischen Strohnutzung zu einem sehr großen Anstieg der anbaubedingten Treibhausgasemissionen führen. Ebenso stellt sich die Situation dar, wenn die Werte für den Kohlenstoffzug in die Gesamtbilanz übertragen werden. Nach dieser Methodik lassen sich 55 bis 90 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen auf den Prozess des Biomasseanbaus zurückführen (Abbildung 18). Der vergleichsweise niedrige Anteil der mit dem Kohlenstoffzug verbundenen Emissionen lässt sich beim Biogaspfad damit begründen, dass neben Stroh die Cosubstrate Gülle und Klee gras eingesetzt werden, die be-



zogen auf die Frischmasse den größten Anteil ausmachen. Im absoluten Vergleich liegen die mit dem Kohlenstoffzug verbundenen Emissionen zwischen 39 (Strohfeuerung) und 122 (FT-Diesel) Gramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Megajoule Endenergie. Die Wärmepfade sind durch ihre hohen Wirkungsgrade und dem damit effizienteren Rohstoffeinsatz und vergleichsweise geringeren Kohlenstoffzug deutlich im Vorteil. Für die Pfade mit hohen Umwandlungsverlusten, aus denen aber die höherwertigen Energieträger Strom oder Kraftstoff entstammen, kann gegenüber der fossilen Referenz keine oder nur eine sehr geringe Treibhausgaseinsparung erreicht werden. Der neue Ansatz der Integration der Humusbilanz in die Treibhausgasbilanz setzt die Entwicklung eines neuen Bewertungssystems für Reststoffe und andere Fruchtarten voraus. Bislang wird dieser Faktor nicht berücksichtigt, vielmehr wird die Einhaltung der Humusbilanz über die gesamte Fruchtfolge gefordert. Im Folgenden werden die Ergebnisse ohne die Emissionen, die aus dem Kohlenstoffzug resultieren, dargestellt.

### Treibhausgasbilanz für verschiedene Strohnutzungskonzepte

In Abbildung 19 sind die sieben bilanzierten Anlagenkonzepte in einer Übersicht dargestellt. Die Bereitstellung von Strom und Kraftstoffen ist mit höheren Emissionen verbunden als die von Wärme. Im Vergleich zu Ergebnissen aus der Bilanzierung des Hauptproduktes von Anbaubiomasse wie beispielsweise Weizenkorn fällt auf, dass der Prozessschritt Anbau/Biomassebereitstellung bei der energetischen Strohnutzung einen relativ geringen Anteil ausmacht. Das hängt damit zusammen, dass die Aufwendungen aus dem Anbau (zum Beispiel die Düngemittelproduktion) dem Produktsystem des Weizens und nicht dem des Strohs zugeschrieben werden. Trotzdem betragen die Emissionen bis zur Bergung des

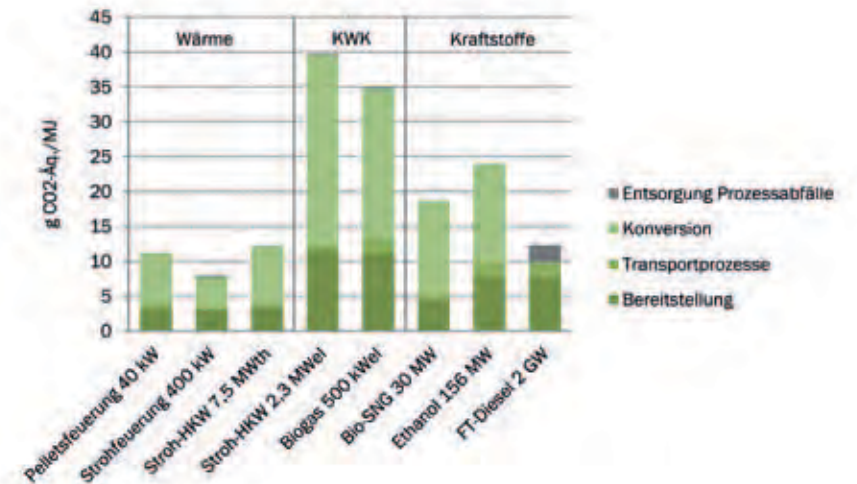


Abbildung 19: Treibhausgasbilanz für verschiedene Strohnutzungskonzepte (Äq.: Äquivalente, el: elektrisch, FT: Fischer Tropsch, GW: Gigawatt, HKW: Heizkraftwerk, kW: Kilowatt, KWK: Kraft-Wärme-Kopplung, MJ: Megajoule, MW: Megawatt, th: thermisch)



Strohs nicht Null, sondern es wird in dieser Bilanz eine Kompensationsdüngung für den entzogenen Stickstoff angenommen, die Emissionen verursacht.

In vielen Studien hat sich bereits gezeigt, dass Transportprozesse nur einen geringen Anteil an den Gesamtemissionen der Bioenergiebereitstellung ausmachen. Dass diese Erkenntnis auch für den Reststoff Stroh und für andere Reststoffe und Abfälle mit niedriger Energiedichte gilt, geht deutlich aus Abbildung 19 hervor. Erst ab einer Transportdistanz von 37 Kilometern (Konzept Pelletieranlage/Pelletsfeuerung) betragen die Emissionen aus dem Transportprozess einen Anteil von acht Prozent an den Gesamtemissionen. Für das Konzept mit dem höchsten Rohstoffbedarf und den größten Transportdistanzen (Fischer-Tropsch-Diesel) wurden vergleichsweise geringe zwei Gramm  $\text{CO}_2$ -Äquivalente pro Megajoule bilanziert. Die Logistikkonzepte bieten hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Klimabilanz daher nur geringe Optimierungsmöglichkeiten.

Den größten Anteil an der Gesamtbilanz machen im Fall der energetischen Strohnutzung die Emissionen aus den Konversionsprozessen aus. An dieser Stelle soll noch ein grundlegender Unterschied betont werden: Die Strohfeuerungsanlage, das Heizkraftwerk und die Biogasanlage sind marktverfügbare Anlagen, für die Kennwerte zur Prozessenergieversorgung oder zum Nutzwärmeanteil existieren. Für die bilanzierten, aber momentan noch nicht auf dem Markt verfügbaren Anlagen müssen Stoff- und Energieströme durch Prozesssimulationen oder durch die Skalierung von Literaturwerten generiert werden und für die oben genannten Parameter müssen Annahmen getroffen werden. Die Bilanzierungsergebnisse der Kraftstoffpfade sind durch ihren konzeptionellen Charakter mit einer großen Unsicherheit belastet. Sie geben jedoch eine Tendenz an, wie hoch die Treibhausgasemissionen unter den gewählten Rahmenbedingungen ausfallen können.

Um die Kraftstoffkonzepte vergleichbar bilanzieren zu können, wurde für alle Konzepte eine Prozessstromversorgung auf der Basis von 100 Prozent regenerativer Energien unterstellt. Die marktverfügbaren Konzepte orientieren sich an den heutigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bestehender Anlagen. Die Prozessenergieversorgung findet in der Regel auf Basis des heutigen Kraftwerksmixes statt. Der bereitgestellte erneuerbare Strom wird eingespeist.

## Treibhausgasbilanzen für strohbasierte Wärmekonzepte

Wie aus Abbildung 20 hervorgeht, fallen die THG-Emissionen für die verschiedenen Wärmepfade vergleichsweise niedrig aus. In der Gegenüberstellung zum fossilen Referenzmix aus Erdgas und Heizöl erreichen die Wärmepfade mit bis zu 91 Prozent sehr hohe Einsparungen. Da die Pelletierung ein energieintensiver Prozess ist, ist die Wärme aus dem Konzept Pelletsfeuerung mit höheren THG-Emissionen belastet als die Wärme aus der Strohfeuerungsanlage. Die Wärme aus dem Strohheizkraftwerk weist die höchsten THG-Emissionen auf. Es ist eine Variante dargestellt, bei der alle Emissionen des Prozesses der Wärme und nicht dem ebenfalls erzeugten Strom zugeteilt werden. Als Referenzsystem für die Wärmebereitstellung sind ergänzend zur Durchschnittsbetrachtung (Mix aus Erdgas/Heizöl) auch die mit Minimum und Maximum bezeichneten Grenzbetrachtungen zu sehen. Der niedrige Wert repräsentiert ein vergleichsweise emissionsarmes Erdgas-Brennwert-System, der hohe Wert repräsentiert ein Heizöl-System.

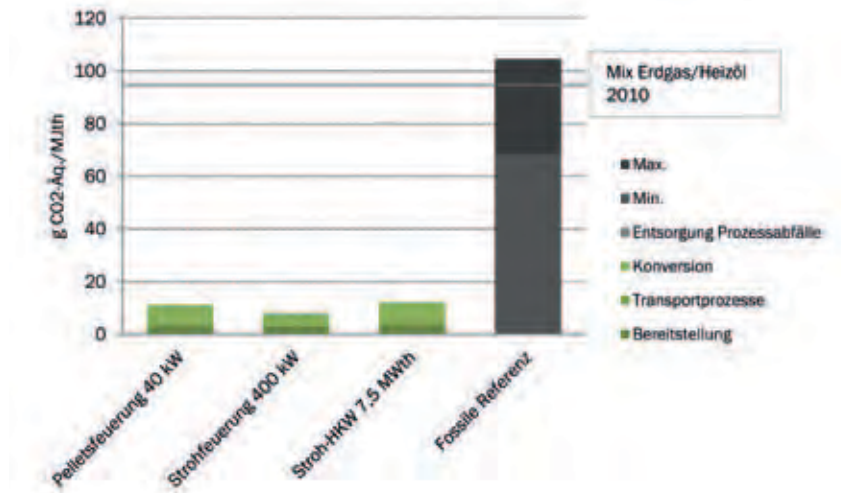


Abbildung 20: Treibhausgasbilanzen für strohbasierte Wärmekonzepte  
(Äq.: Äquivalente, HKW: Heizkraftwerk, kW: Kilowatt, MJ: Megajoule, MW: Megawatt, th: thermisch)

## Treibhausgasbilanzen für strohbasierende KWK-Konzepte

Die Ergebnisse aus der gekoppelten Wärme- und Strombereitstellung weisen ebenfalls deutlich geringere Emissionen als die fossilen Referenzpfade auf. Vergleicht man in einer Durchschnittsbetrachtung die Emissionen aus den biogenen Pfaden mit Strom aus dem Kraftwerkspark von 2010 (Abbildung 21) ist eine signifikante Einsparung zu erkennen (bis zu 78 Prozent). Wie bereits oben erwähnt, nimmt das Biogaskonzept eine Sonderstellung ein, da neben dem Reststoff Stroh auch andere Substrate eingesetzt werden. Die Cosubstrate Gülle und Klee-gras haben im Vergleich zu anderen Biogassubstraten wie Mais unter anderem den Vorteil, dass sie keine Emissionen durch eine Stickstoffdüngung verursachen.

Eine weitere Besonderheit ist der Gärrest, ein Nebenprodukt des Biogasprozesses. Durch die Nutzung von Gärresten als Düngemittel können industrielle Kunstdünger ersetzt und die mit der Herstellung verbundenen Treibhausgasemissionen vermieden werden. Die Berücksichtigung dieses Effektes, würde für das Biogaskonzept eine Gutschrift in Höhe von 41,5 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Megajoule bedeuten und zu einer Gesamtbilanz von -6,4 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Megajoule führen. Da in dem hier verfolgten Ansatz die Aufwendungen aus dem Anbau von Weizen in Form von Düngemitteln oder Diesel nur dem Produktsystem Weizen zugeschlagen und nicht auf das Stroh verteilt wurden, wurde auch auf die Vergabe dieser Gutschrift für das Stroh verzichtet.

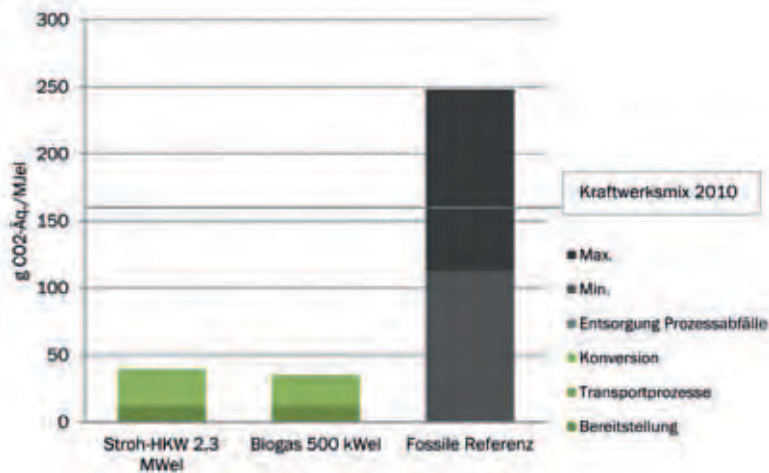


Abbildung 21: Treibhausgasbilanzen für strohbasierende KWK-Konzepte (Äq.: Äquivalente, el: elektrisch, FT: Fischer Tropsch, HKW: Heizkraftwerk, kW: Kilowatt, MJ: Megajoule, MW: Megawatt)

## Treibhausgasbilanzen für strohbasierende Kraftstoffkonzepte

Mit Werten bis zu etwa 24 g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Megajoule sind auch für die stroh-basierten Kraftstoffkonzepte sehr hohe Treibhausgaseinsparungen im Vergleich zur fossilen Referenz zu erzielen. Abbildung 22 zeigt, wie sich die Treibhausgasemissionen der Biokraftstoffkonzepte im Vergleich zu den entsprechenden fossilen Referenzen, das heißt synthetisches Erdgas im Vergleich zu Erdgas, Cellulose-Ethanol zu Benzin und Fischer-Tropsch-Diesel zu fossilem Diesel darstellen. Die im Vergleich zu FT-Diesel höheren Emissionen im Konversionsprozess sind beim Bio-SNG-Konzept darauf zurückzuführen, dass für die Produktion der Einsatz von Strohpellets vorgesehen ist, deren Produktion zu vergleichsweise hohen THG-Emissionen führt. Der Hauptanteil der Klimagase bei der Produktion von Ethanol ist auf die erforderlichen großen Enzymmengen zurückzuführen.

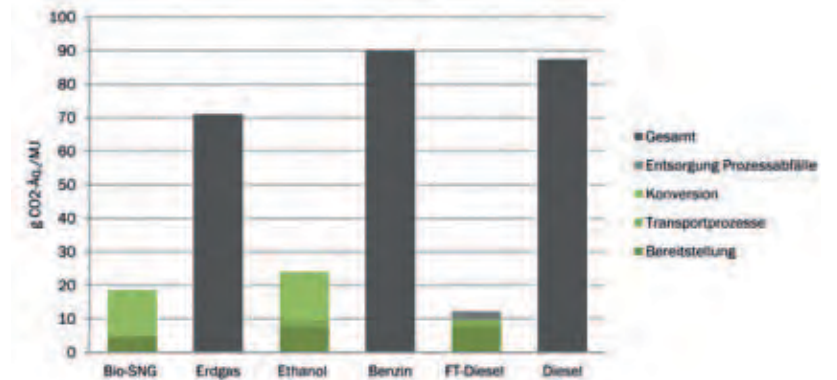


Abbildung 22: Treibhausgasbilanzen für strohbasierende Kraftstoffkonzepte (Äq.: Äquivalente, FT: Fischer Tropsch, MJ: Megajoule, SNG: Synthetic Natural Gas)



## Vergleich der Treibhausgaseinsparungen

In Abbildung 23 sind die Treibhausgaseinsparungen für die verschiedenen Strohnutzungspfade abgebildet. Es zeigt sich, dass mit dem Strom aus einem KWK-Prozess die höchste Treibhausgaseinsparung erreicht werden kann. Über 120 Gramm CO<sub>2</sub> können durch die Bereitstellung von einem Megajoule Strom auf Basis von Stroh eingespart werden. Der



Biogaspfad ist dabei wie bereits dargelegt nicht direkt vergleichbar, da neben Stroh auch andere vorteilhafte Substrate wie Gülle und Klee gras eingesetzt werden.

Der hohe Einspareffekt im Stromsektor ist mit dem hohen fossilen Referenzwert des deutschen Kraftwerksparks zu erklären, der sich zu 43 Prozent aus Stein- und Braunkohle zusammensetzt und entsprechend hohe Treibhausgasemissionen verursacht. Aus Sicht des Klimaschutzes erreicht das Strohheizkraftwerk unter den hier dargestellten Konzepten das beste Ergebnis.

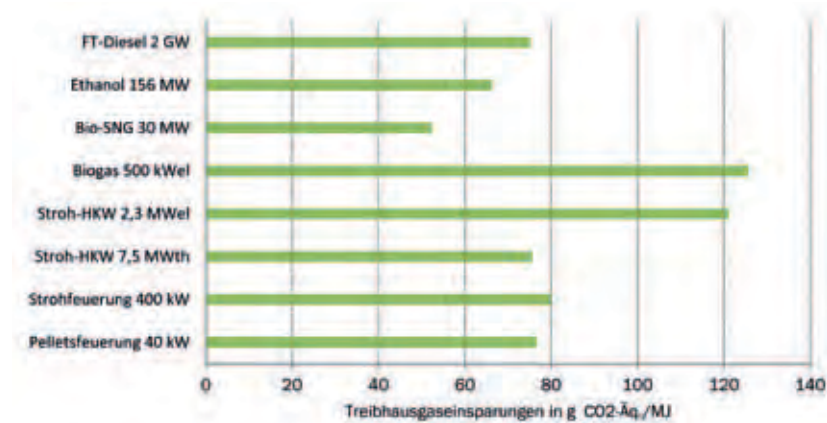


Abbildung 23: Treibhausgaseinsparungen für verschiedene Strohnutzungspfade

(Äq.: Äquivalente, el: elektrisch, FT: Fischer Tropsch, GW: Gigawatt, HKW: Heizkraftwerk, kW: Kilowatt, MJ: Megajoule, MW: Megawatt, SNG: Synthetic Natural Gas, th: thermisch)

## Vergleich der Gestehungskosten verschiedener Strohnutzungskonzepte

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, für die in einigen Bereichen Annahmen getroffen werden mussten. Besonders bei den Kraftstoffpfaden bestehen hier große Unsicherheiten. Die dargestellten Zahlen geben daher lediglich eine Größenordnung an, in der sich die jeweiligen Gestehungskosten bewegen könnten. Die wirtschaftliche Machbarkeit einer einzelnen Anlage hängt von den Gegebenheiten des Standortes sowie von den zukünftigen Markt- und Rahmenbedingungen ab. Hierzu zählen unter anderem erzielbare Marktpreise, Förderungen und rechtliche Bestimmungen. Diese sind nicht in den Gestehungskosten abgebildet. Die Kostenberechnungen beziehen sich auf das Jahr 2010. Eine Anpassung aufgrund möglicher realer Preissteigerungen bis zum Betrachtungsjahr 2020 erfolgte nicht, was beim Vergleich mit Werten aus anderen Studien beachtet werden muss. Die Referenzwerte, mit denen die Kosten verglichen werden, variieren bezüglich der zugrunde gelegten Annahmen (zum Beispiel für Volllaststunden und Rohstoffpreise). Daher sind die Referenzen ebenso

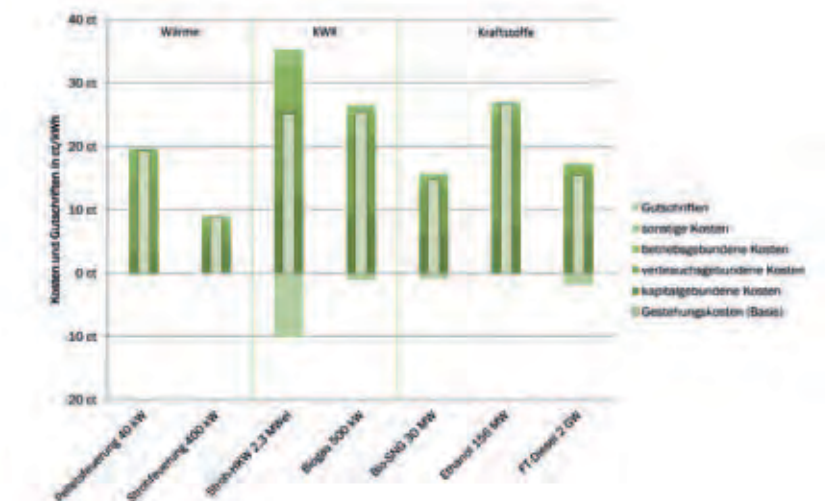


Abbildung 24: Gestehungskosten der einzelnen Konversionspfade

(el: elektrisch, FT: Fischer Tropsch, GW: Gigawatt, HKW: Heizkraftwerk, kW: Kilowatt, kWh: Kilowattstunde, MW: Megawatt, SNG: Synthetic Natural Gas)



wie die Kostenberechnungen der Strohkonzepte lediglich als Indikatoren für die Größenordnungen zu verstehen.

Die Berechnung der Gestehungskosten basiert auf der Annuitätenmethode in Anlehnung an die Richtlinie VDI 6025. Die Kosten teilen sich in kapitalgebundene Kosten (Investitions-, Instandhaltungs- sowie Kapitalkosten), verbrauchsgebundene Kosten (vor allem Substrat- und Brennstoffkosten) und betriebsgebundene Kosten (Wartung, Reinigung, Personal). Alle weiteren Aufwendungen (unter anderem Versicherungen und Verwaltung) fließen in den sonstigen Kosten zusammen. Zur Bestimmung der Gestehungskosten werden Erlöse für eventuelle Nebenprodukte kostenmindernd angesetzt.

Abbildung 24 stellt die Gestehungskosten der Hauptprodukte der einzelnen Konversionspfade dar, aufgeteilt nach den Kostenkategorien. Bei sämtlichen Pfaden dominieren die verbrauchsgebundenen Kosten mit Ausnahme des Heizwerkes.

## Rohstoffkosten

Neben den technologischen Besonderheiten der Strohkonversion und den damit verbundenen Mehrkosten spielen die Aufwendungen für die Strohbereitstellung (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 im Detail berechnet werden konnten. Hierbei handelt es sich um eine Vollkostenrechnung, die unter anderem den Nährstoffentzug in Höhe von circa 17 Euro pro Tonne Frischmasse sowie sämtliche Logistikkosten einbezieht.

Die Bereitstellungskosten frei Anlage sind in Abbildung 25 zusammengefasst. Neben der Basisvariante, die die mittleren Kosten für jede Konversionsanlage darstellt, wird auch eine optimierte Kostenrechnung gezeigt, die vom konsequenten Einsatz der jeweilig günstigsten Variante ausgeht.

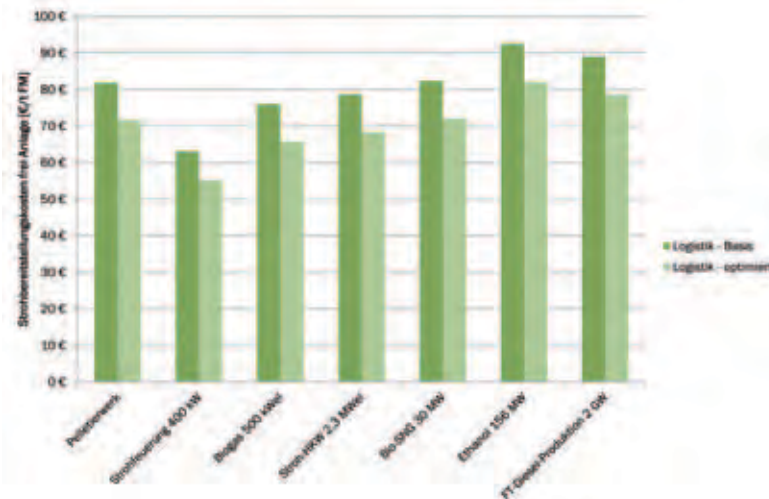


Abbildung 25: Strohbereitstellungskosten frei Anlage für die verschiedenen Anlagenkonzepte (el: elektrisch, t FM: Tonnen Frischmasse, GW: Gigawatt, HKW: Heizkraftwerk, kWh: Kilowattstunde, MW: Megawatt, SNG: Synthetic Natural Gas)

## Wärmekonzepte

Als erste Anlage wurde die Pelletsproduktion betrachtet, deren Ergebnisse in die Berechnung der Pelletsfeuerung einfließen. Die Produktionskosten der Pelletierung belaufen sich auf etwa 169 (Basisvariante) beziehungsweise 157 Euro pro Tonne (optimierte Variante). Zur Berechnung des Endkundenpreises (netto) erfolgen Aufschläge in Höhe von rund 50 Euro pro Tonne für Gewinn und Distribution, was zu einem Nettopreis von 219 Euro pro Tonne (207 Euro pro Tonne optimiert) führt. Holzpellets lagen 2010 netto bei etwa 205 Euro pro Tonne.

Unter Einbezug dieser Endkundenpreise in die Berechnung der Pelletsfeuerung im Leistungsbereich von 40 Kilowatt ergeben sich Wärmegestehungskosten von etwa 19,4 Cent pro Kilowattstunde (Basisvariante). Ein weiterer ausschlaggebender Faktor für die Gestehungskosten ist die Investitionssituation (Ersatz- oder Neuinvestition). Hier wird vom Ersatz eines alten Ölkessels ausgegangen. Der Vergleich mit den durchschnittlichen Wärmegestehungskosten für Heizöl- und Biomassekessel ist in Abbildung 26 zu sehen. Die Wärmebereitstellung aus Stroh mittels Pelletsfeuerung liegt deutlich über diesen Referenzwerten.

Die Wärmegestehungskosten der Strohfeuerung im Leistungsbereich von 400 Kilowatt liegen bei etwa neun Cent pro Kilowattstunde und somit deutlich unter denen der Pelletsfeuerung. Hier dominieren im Unterschied zu den anderen Anlagenkonzepten nicht die verbrauchs- sondern die kapitalgebundenen Kosten, was zum einen mit den hohen Investitionskosten, zum anderen mit der vergleichsweise geringen, aber für Heizwerke üblichen Volllaststundenzahl von 2500 Stunden pro Jahr zusammenhängt. Die Strohfeuerung liegt auch bei diesem Konzept über den Referenzwerten der Wärmeerzeugung. In der kostenoptimierten Variante fallen die Wärmegestehungskosten der Pelletsfeuerung und der Strohfeuerung um 0,4 beziehungsweise um 0,3 Cent pro Kilowattstunde niedriger aus.

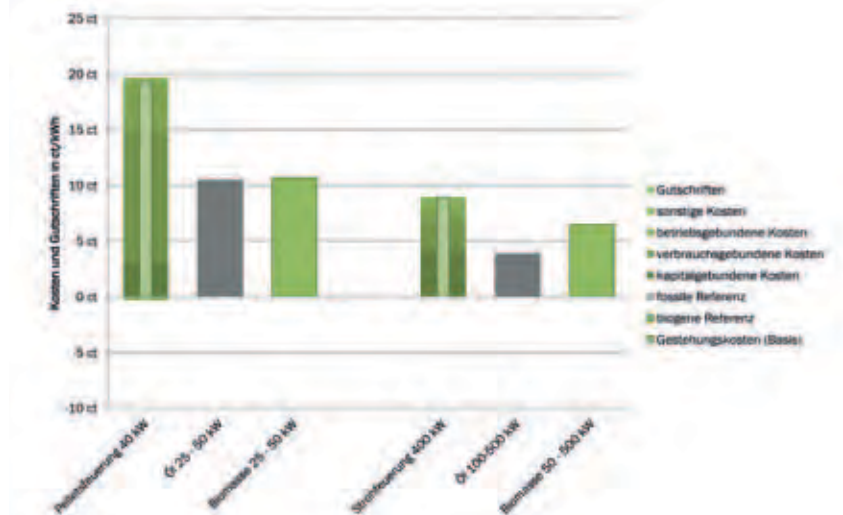


Abbildung 26: Vergleich der strohbasieren Wärmegestehungskosten mit fossilen und biogenen Referenzen (Pelletsfeuerung inkl. Pelletslager und Umbaukosten. Strohfeuerung ersetzt Teil einer Kaskaden-Ölfeuerung, ein Ölkessel bleibt als Spitzenlastkessel in Betrieb). Quelle der Referenzen: Leitstudie 2010, BMU. (KW: Kilowatt, kWh: Kilowattstunde)

### Kraft-Wärme-Kopplungskonzepte

Im Unterschied zu den Wärmekonzepten stellen das Heizkraftwerk sowie die Biogasanlage neben Wärme auch Strom bereit. Die Berechnung der Gestehungskosten erfolgt für die Gesamtproduktion, wobei die Erlöse der Wärme den Stromgestehungskosten gutgeschrieben werden.

Abbildung 27 zeigt den Vergleich der Stromgestehungskosten der KWK-Pfade mit den Referenzen. Für das Heizkraftwerk ergeben sich Stromgestehungskosten in der Größenordnung von etwa 25,1 Cent pro Kilowattstunde. Die durchschnittlichen Gestehungskosten eines Gas-und-Dampf-Kombikraftwerkes auf Erdgasbasis lagen 2010 bei etwa 6,4 Cent pro Kilowattstunde. Selbst eine KWK-Dampfkraftanlage auf Biomassebasis mit vergleichbaren 2 Megawatt (elektrisch) weist mit etwa 13 Cent pro Kilowattstunde deutlich niedrigere Gestehungskosten auf. Eine der Ursachen hierfür sind die Investitionskosten, die sich mit über 5000 Euro pro Kilowatt (elektrisch) an der Obergrenze heute üblicher Heizkraftwerke dieser Leistungsklasse bewegen. Diese Zahlen basieren jedoch auf Werten eines der ersten errichteten Strohheizkraftwerke. Dadurch ergeben sich Einsparpotenziale bei den Investitionskosten und ebenso durch die Steigerung der Volllaststunden für neue Heizkraftwerke.

Die Stromgestehungskosten der Biogasanlage betragen etwa 25,4 Cent pro Kilowattstunde. Braunkohlekraftwerke, als möglicher fossiler Vergleich durch den Grundlastbetrieb, weisen Gestehungskosten in der Größenordnung von etwa 3,9 Cent pro Kilowattstunde auf. Herkömmliche Biogasanlagen (Gülle-/NawaRo-Mix) können im Bereich von 12 Cent pro Kilowatt-

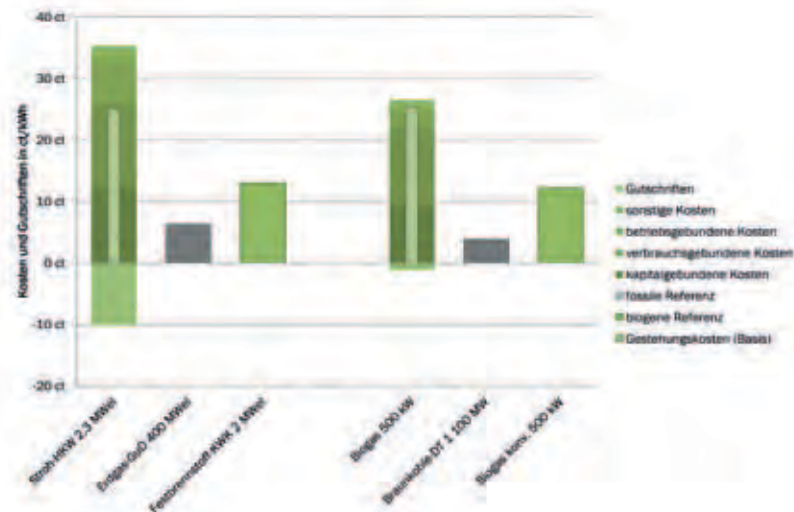


Abbildung 27: Vergleich der Stromgestehungskosten der KWK-Pfade mit fossilen und biogenen Referenzen. Quelle: Leitstudie 2010.BMU. (DT: Dampfturbine, el: elektrisch, konv: konventionell, GuD: Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk, HKW: Heizkraftwerk, kW: Kilowatt, kWh: Kilowattstunde, KWK: Kraft-Wärme-Kopplung, MW: Megawatt)

stunde produzieren. Die Fermentation von Stroh stellt aufgrund der nötigen Substratkombination mit Gülle und Klee gras sowie der einhergehenden Silierung einen Sonderfall dar, da es sich nicht um erprobte Verfahren handelt. Zusätzlich gibt es Varianzmöglichkeiten bei der Gestaltung des Zwischenfruchtanbaus und seiner ökonomischen Bewertung. Von Bedeutung ist auch die Wärmeauskopplung, welche die Stromgestehungskosten senkt. In der nach Logistikkosten optimierten Variante können die Wärmegestehungskosten des Strohheizkraftwerkes um 1,5 und die der Biogasanlage um 0,8 Cent pro Kilowattstunde reduziert werden.

### Kraftstoffpfade

Die Produktion von Kraftstoffen ist ein komplexer und aufwändiger Prozess, der größer dimensionierte Anlagen verlangt, womit es auch zu einem höheren Rohstoffeinsatz und steigenden Transportkosten kommt. Trotz der hohen Investitionskosten (in den Größenordnungen 60 Millionen Euro [Bio-SNG], 2,5 Milliarden Euro [FT-Diesel] und 160 Millionen Euro [Ethanol]) dominieren die verbrauchsgebundenen Kosten.

Die Gestehungskosten für Bio-SNG liegen bei etwa 14,8 Cent pro Kilowattstunde. Die im Vergleich zur SNG-Produktion auf Holzbasis höheren Kosten erklären sich neben den Rohstoffpreisdifferenzen aus den zusätzlichen Kosten für die Pelletieranlage sowie dem höheren Wartungsaufwand durch die spezifischen Eigenschaften von Stroh. Für die FT-Diesel-Produktion

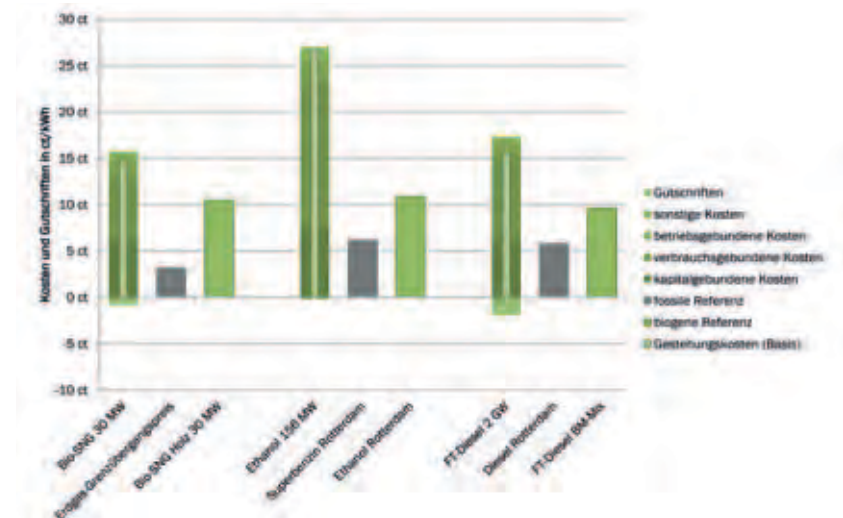


Abbildung 28: Vergleich der Gestehungskosten der Kraftstoffpfade mit fossilen und biogenen Referenzen (Erdgasübertragungspreis zuzüglich vermiedener Netznutzungsentgelte). Quelle: Leitstudie 2010. BMU, Mineralölwirtschaftsverband, BAFA, eigene Berechnungen. (BM-Mix: Biomasse-Mix, FT: Fischer Tropsch, GW: Gigawatt, kWh: Kilowattstunde, MW: Megawatt, SNG: Synthetic Natural Gas)

tion ergeben sich Gestehungskosten von etwa 16,5 Cent pro Kilowattstunde. Im Vergleich zu FT-Diesel aus einem Biomassemix und fossilem Diesel sind die Gestehungskosten auf Basis von Stroh deutlich höher.

Die Berechnung der Ethanolanlage ergibt Gestehungskosten von etwa 26,8 Cent pro Kilowattstunde. Import-Ethanol (Preis Rotterdam) kostet derzeit rund elf Cent pro Kilowattstunde. Superbenzin, ebenfalls Preis Rotterdam, wird mit etwa sechs Cent pro Kilowattstunde gehandelt. Besonders bei der Ethanolproduktion fallen die Rohstoffkosten pro Kilowattstunde sehr hoch aus, da die Kraftstoffausbeute gering ist.

In den logistikoptimierten Varianten fallen die Gestehungskosten um 0,5 bis 1,3 Cent pro Kilowattstunde niedriger aus. Abbildung 28 zeigt den Vergleich der Gestehungskosten der drei Kraftstoffpfade mit den Referenzen.

Die Analysen zeigen, dass die Gestehungskosten sämtlicher Konzepte teilweise deutlich über denen der Referenzen liegen. Die optimierten Bereitstellungswege für Stroh senken die Kosten leicht (im Bereich von etwa 0,3 bis 1,5 Cent pro Kilowattstunde). Weitere Untersuchungen und Entwicklungen müssen zeigen, inwieweit die hohen Gestehungskosten die zukünftige Marktfähigkeit der Energieerzeugung aus Stroh einschränkt und welche Maßnahmen nötig sind, um diesen Rohstoff im zukünftigen Energiemix zu etablieren. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist weiter zu beachten, dass es sich bei den Stroh-Konversionen um Modellanlagen handelt und diese mit Unsicherheiten behaftet sind. Ebenso stellen die gewählten Referenzdaten keine absoluten Werte dar. Hier existieren ebenfalls Spannbreiten. Somit sind die präsentierten Zahlen als Indikatoren einer Größenordnung zu sehen, in der sich die Gestehungskosten bewegen können.



## Hinweise zur Veröffentlichung der Ergebnisse

### Darstellung der Ergebnisse zu Strohpotenzialen im Internet

Die Ergebnisse zu den nachhaltig nutzbaren Strohmenngen werden im Internet unter der Adresse <http://strohpotenziale.dbfz.de> ab September 2011 veröffentlicht. Für das gesamte Bundesgebiet können Strohressourcen recherchiert werden. Eine integrierte Kartendarstellung erleichtert hierbei die Orientierung bei der territorialen Planung von Strohnutzungskonzepten. Über entsprechende Auswahlmöglichkeiten ist die Anzeige einzelner Landkreise möglich. Dazu werden für alle drei Bilanzierungsmethoden die zur Verfügung stehenden Strohmenngen als Zahlenwert angezeigt.

Die digitale Version des Endberichtes wird ebenfalls veröffentlicht und unter [www.dbfz.de](http://www.dbfz.de) (voraussichtlich ab Mitte September) zu finden sein.







[www.energetische-biomassenutzung.de](http://www.energetische-biomassenutzung.de)

ISSN: 2192-1806

Gefördert vom



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

Ein Förderprogramm der



DIE BMU  
KLIMASCHUTZ-  
INITIATIVE

Koordiniert vom



Wissenschaftlich  
begleitet vom

