

Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft und Potenziale ihrer Minderung in Thüringen

Besuchen Sie uns auch im Internet:
www.tll.de/ainfo

Impressum

1. Auflage 2009

Herausgeber: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Naumburger Str. 98, 07743 Jena
Tel.: 03641 683-0, Fax: 03641 683-390
e-Mail: pressestelle@tll.thueringen.de

Autoren: Dr. Steffi Knoblauch
Dr. Hans Eckert
Dr. Gerd Reinhold
Dipl.-Phys. Ulrich Gernand

Juni 2009

- Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Quellenangabe gestattet. -

Inhalt

1	Problemstellung	5
2	Quellen der Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft	5
3	Methode der Erfassung und Bewertung landwirtschaftlicher Treibhausgas-Emissionen	7
4	Unvermeidbare und vermeidbare Einflüsse	11
5	Ist-Zustand der Treibhausgas-Emissionen in Thüringen im Jahr 2006	13
6	Minderungspotenziale von Treibhausgas-Emissionen in der landwirtschaftlichen Primärproduktion	14
6.1	Änderung der Futterzusammensetzung der Wiederkäuer.....	14
6.2	Effizienter Betriebsmitteleinsatz	15
6.3	Extensivierung	17
6.4	Ausnutzen von CO ₂ -Senken.....	19
7	Minderungspotenziale von Treibhausgas-Emissionen durch Gewinnung von Energie aus landwirtschaftlicher Biomasse	19
7.1	Erzeugung von Biogas	20
7.2	Verbrennung	25
7.3	Erzeugung von Biodiesel.....	27
7.4	Erzeugung von Bioethanol	29
8	Übersicht über die Minderungspotenziale aus der Landwirtschaft	32
9	Schlussfolgerungen	35
9.1	Ist-Zustand	35
9.2	Minderungspotenziale in der landwirtschaftlichen Primärproduktion	35
9.3	Minderungspotenziale durch Gewinnung von Energie aus landwirtschaftlicher Biomasse	36
9.4	Fortsetzung der Arbeiten	36
	Literatur	37

Abkürzungsverzeichnis

ATP	Adenosintriphosphat
AF	Ackerfläche
AZ	Ackerzahl
BF	Betriebsfläche
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
C	Kohlenstoff
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ -Äq.	CO ₂ -Äquivalente
DGS, DDGS	Distiller Grains & Solubles (DGS), Dried Distillers Grains with Solubles (DDGS, Trockenschlempe)
EEG	Erneuerbare Energiengesetz
ETBE	Ethyl- <i>tert</i> -butylether
FAL-BMVEL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft - Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
FCKW	Fluorierte chlorierte Kohlenwasserstoffe
FM	Frischmasse
GE	Getreideeinheit
GJ	Giga Joule
GV	Großvieheinheit
GWP	Global Warming Potential
HKW	Heizkraftwerk
ha	Hektar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IE	Institut für Energetik und Umwelt GmbH Leipzig
K	Kalium
KUL	Kriteriensystem umweltverträgliche Landwirtschaft
KULAP	Kulturlandschaftserhaltungsprogramm (Programm zur Förderung von umweltgerechter Landwirtschaft, Erhaltung der Kulturlandschaft, Naturschutz und Landschaftspflege in Thüringen (KULAP 2007)
kW, MW	Kilowatt, Megawatt
kWh, MWh	Kilowattstunden, Megawattstunden
Leg-N	Leguminosen-N
NH ₃	Ammoniak
TM	Trockenmasse
TS, oTS	Trockensubstanz, organische Trockensubstanz
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche
LM	Lebendmasse
MJ	Mega-Joule
N	Stickstoff
η	Wirkungsgrad
N ₂ O	Distickstoffmonoxid, Gebrauchsname: Lachgas
NMVO	Non Methan Volatile Organic Compounds
NADPH	Nicotinamidadenindinukleotidphosphat
ORC	Organic-Rancine-Cycle-Prozess
P	Phosphor
PJ	Peta Joule = 1.000.000 GJ
RGV	rauhfuttermittelverzehrende Großvieheinheit
RME	Rapsölmethylester
THG	Treibhausgase
Tha	Tausend Hektar
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten

1 Problemstellung

Der Treibhauseffekt ist ein natürlicher Prozess, der dafür sorgt, dass die Oberflächentemperatur der Erde von -18 auf $+15$ °C ansteigt. Verantwortlich dafür sind Wasserdampf, CO_2 , CH_4 und N_2O , die in der Atmosphäre die von der Erde abstrahlende langwellige Wärmestrahlung adsorbieren und wieder abstrahlen. Der Mensch hat durch eine Anreicherung der Atmosphäre mit Spurengasen (CO_2 , CH_4 , N_2O , FCKW, NMVOC etc.) diesen an sich lebensnotwendigen Treibhauseffekt um ca. 2 % verstärkt (Rahmstorf, 2004).

Neben einem erhöhten CO_2 -Anteil gibt es noch andere Erklärungen für die Erwärmung der Erdoberfläche. Berechnungen, die sich auf Daten der Klimageschichte stützen, zeigen aber, dass die festgestellte Erwärmung von $0,7$ °C im Zeitraum von 1750 bis heute ziemlich genau durch die Erhöhung des CO_2 -Gehaltes um 2 % erklärt werden kann.

Nach dem Kyoto-Protokoll sollen die THG-Emissionen der Industrieländer bis zum Zeitraum 2008...2012 gegenüber dem Niveau von 1990 um 5 % reduziert werden. Deutschland hat im Rahmen der Lastenverteilung einen Senkungsbeitrag von insgesamt 21 % zugesagt. Bislang sind etwa 19 % erreicht. Inzwischen liegt der 4. Sachstandsbericht des IPCC vor und belegt anhand langjähriger Umweltbeobachtungen, dass es an der Klimaerwärmung keinen Zweifel mehr gibt, die Ursache sehr wahrscheinlich in dem vom Menschen ausgelösten Anstieg der Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre zu sehen ist und ein Temperaturanstieg um mehr als 2 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit vermieden werden soll. Ein weiterer Anstieg der Temperatur würde die Gefahr katastrophaler Klimaereignisse stark erhöhen (Schellenhuber, 2006). Im Jahr 2008 erklärten die G8-Staaten deshalb auf dem Gipfel in Toyako, dass die Halbierung der THG-Emissionen umgesetzt werden soll. Eine Halbierung bis 2050 gegenüber 1990 bedeutet für die Industrieländer Reduzierungen um 60 bis 80 %. Die EU ist bis 2020 die Verpflichtung von 20 % eingegangen und will auf 30 % erhöhen, wenn auch andere Länder international mitziehen. Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, die THG-Emissionen bis 2020 im Vergleich zu 1990 um 40 % zu senken.

2 Quellen der Treibhausgas-Emission in der Landwirtschaft

Quellen der Treibhausgas-Emissionen aus der Landwirtschaft sind CO_2 , CH_4 , N_2O und in sehr geringen Mengen NMVOC. CO_2 entsteht direkt durch den Verbrauch von Energieträgern und indirekt durch den Verbrauch von Betriebsmitteln, deren Herstellung und Vertrieb mit CO_2 -Emissionen verbunden ist. Daneben können erhebliche CO_2 -Mengen aufgrund von Netto-Mineralisationsprozessen im Ergebnis des Abbaus von Humus und aufgrund von Kalkung entstehen.

Hauptquellen von CH_4 sind Gärungsvorgänge im Pansen der Wiederkäuer und anaerobe Umsetzungen im Wirtschaftungsdünger während der Lagerung. Im Ergebnis der Verdauung cellulosereicher Futterstoffe entstehen im Pansen der Wiederkäuer die flüchtigen Fettsäuren Essig-, Propion- und Buttersäure, die für energetische Zwecke und Synthesevorgänge genutzt werden. Ein Teil des bei diesen Prozessen gebildeten Wasserstoffs wird durch methanogene Bakterien mit Kohlendioxid zu Methan umgesetzt und dadurch die Reduktions-Oxidations-Bilanz im Pansen ausgeglichen (Schönhusen et al., 2002).

Quellen der N_2O -Emission sind im Wesentlichen die Prozesse der Denitrifikation und Nitrifikation, die im Boden ablaufen und unvermeidbar mit einem N-Umsatz verbunden sind. Wichtigste Ursache für erhöhte N_2O -Emissionen ist die bewirtschaftungsbedingte Steigerung des N-Umsatzes, so dass N_2O -Emissionen in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften eine direkte Beziehung zur Höhe des N-Inputs zeigen.

NMVOC, sog. Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe entstehen bei der mikrobiellen Umsetzung der Wirtschaftsdünger. Aufgrund ihres geringen Anteils kann dieser Pfad aber vernachlässigt werden.

NH₃ ist kein primäres Treibhausgas, führt aber via Luft zu einer Erhöhung des N-Umsatzes im Boden und damit der N₂O-Emission. Es entsteht während der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern.

Die genannten Gase unterscheiden sich in ihrem Treibhausgas-Potenzial. In Bezug auf CO₂ ist das Treibhausgas-Potenzial (GWP...global warming potential) von CH₄ 21-fach größer und das von N₂O um 310-fach. Für NH₃ wird ein GWP-Faktor von 6 angegeben.

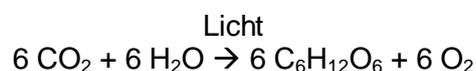
Die Landwirtschaft hat in Deutschland einen Anteil von 11 % an den Treibhausgas-Emissionen (NIR, 2007).

In Thüringen emittiert die Landwirtschaft 3,017 Mio. t CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq.), resp. 15,8 % der gesamten THG-Emissionen, davon zu gleichen Teilen über CO₂ (32%), CH₄ (28%) und N₂O (36%). Hinzukommen noch 3,6 % über NH₃ und 0,4 % über NMVOC. Auf die landwirtschaftliche Fläche umgerechnet sind das 3,87 t CO₂-Äq./ha LF (Ihle et al., 2003). Damit gehören Land- und Forstwirtschaft mit insgesamt 20 % nach dem Verkehr mit 31 % zum zweitgrößten Treibhausgas-Emittenten in Thüringen.

Für die gesamtdeutsche Landwirtschaft wird pro Hektar ein höherer Wert von 8,9 t CO₂-Äq./ha angegeben. Diese Differenz kann nicht nur mit einem geringeren Viehbesatz erklärt werden. Nach Eckert et al. (2006) sind dafür auch methodische Ursachen in Erwägung zu ziehen. In die Berechnungen für Deutschland sind im Unterschied zu Thüringen CO₂-Emissionen aus Kalkung mit einbezogen worden.

Im Zeitraum von 1992 bis 2001 haben sich die THG-Emissionen in Thüringen um 35,2 % verringert, im Wesentlichen durch Energie-Einsparungen in den Bereichen Industrie und Haushalt (Ihle et al., 2005). Der Senkungsbeitrag aus der Landwirtschaft soll nach diesen Kalkulationen gering ausfallen. Für den Zeitraum von 1995/96 bis 2001 zeigen die Berechnungen sogar einen leichten Anstieg, vermutlich aufgrund höherer Mineral-N-Zukäufe für die Versorgung der gestiegenen Erträge.

Im Unterschied zu allen anderen Wirtschaftszweigen stellen Land- und Forstwirtschaft nicht nur Quellen sondern auch Senken von Treibhausgasen dar, indem sie das Potenzial grüner Pflanzen nutzen, mit ihren Chloroplasten Sonnenenergie zu absorbieren, in chemische Energie (ATP, NADPH) umzuwandeln und mit dieser Energiequelle CO₂ zu höherwertigen organischen Substanzen umzusetzen. Über diese photosynthetische Leistung der Pflanze wird Sonnenenergie dem Leben schlechthin verfügbar (Haber, 1995). Die Umwandlung von Sonnenenergie in chemische Energie in der Lichtreaktion der Photosynthese treibt also die Biomasseproduktion und das Wachstum an. Die damit verbundene Speicherung von CO₂ in der Biosphäre trägt wesentlich zur Stabilisierung des Klimas bei.



Der Beitrag der Landwirtschaft zur Minderung von Treibhausgas-Emissionen, besteht deshalb nicht nur in einer geringen THG-Emission je erzeugte Einheit Produkt, sondern auch in einem größtmöglichen Energiegewinn je Hektar Fläche. Es zählt der Energiegewinn mit dem, über die Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln hinaus, fossile Energieträger ersetzt werden können. Damit kann eine erhebliche Einsparung an treibhausgasrelevantem CO₂ erreicht werden.

3 Methode der Erfassung und Bewertung landwirtschaftlicher Treibhausgas-Emissionen (nach Eckert et al., 2006)

Die Abschätzung der Treibhausgasströme erfolgt auf der Basis des IPCC-Handbuches für klimawirksame Spurengase und den Kalkulationstabellen einer FAL-BMELV-Arbeitsgruppe, deren Kennwerte je nach Datenlage in bestimmten Zeitabschnitten aktualisiert werden (Dämmgen et al., 2008).

Das Grundprinzip aller Berechnungen besteht darin, eine Aktivität mit einem Emissionsfaktor zu verknüpfen. Betrachtungsebene ist vorzugsweise der Betrieb. Der Bezug auf die Region durch Aggregation mehrerer Betriebe oder das einzelne Verfahren ist auch möglich.

Der Vorteil der Betriebsebene liegt darin, dass die Treibhausgasströme und die CO₂-Bindung in den pflanzlichen und tierischen Produkten vollständig erfasst werden. Erst dadurch können Minderungsstrategien sicher bewertet werden, weil Rückkopplungen aus dem gesamten Produktionsprozess mit erfasst werden. Die Kalkulation der Treibhausströme muss hinreichend genau sein und weitgehend den Richtlinien entsprechen. Für eine außerbetriebliche Verwendung muss die Datenbasis belegbar und kontrollfähig sein.

Die CO₂-Emission ergibt sich aus dem Input fossiler Energie in den Betrieb. Das betrifft neben fossilen Energieträgern auch Prozessenergie für die Produktion und den Vertrieb von Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel, Strom, Wasser, Fremdleistungen etc. (Tab. 1). Ausgegrenzt sind nicht eindeutig quantifizierbare Energie-Inputs, wie die menschliche Arbeitskraft, Immobilien, Maschinen und Geräte. Ihr Anteil am Gesamt-Energieinput ist zudem gering. CO₂-Bildung durch Humusfreisetzung und die CO₂-Entbindung durch Kalkung haben Bedeutung, sind aber aufgrund unzureichender Datenlage bisher nicht berücksichtigt.

Tabelle 1: Faktoren für die CO₂-Emission (Auswahl)

Energieträger/ Betriebsmittel	Energieverbrauch (GJ/Tonne)	CO ₂ -Faktor (kg CO ₂ /GJ)
Stickstoff	38,9	56
Pflanzenschutzmittel	111,0	74
Diesel	43	73

Beispiel:

CO₂-Emission Eliteweizen, Ertragserwartung 70 dt/ha:

0,18 t Saatgut * 5,5 GJ/t * 74 kg CO₂/GJ
+ 0,15 t N-Dünger * 38,9 GJ/t * 56 kg CO₂/GJ
+ 0,024 t P-Dünger * 9,8 GJ/t * 65 kg CO₂/GJ
+ 0,035 t K-Dünger * 3,1 GJ/t * 65 kg CO₂/GJ
+ 0,003 t PSM-Bedarf * 111 GJ/t * 74 kg CO₂/GJ
+ 0,07 t Diesel * 43 GJ/t * 73 kg CO₂/GJ
= 667 kg CO₂/ ha und Jahr aus dem Verbrauch fossiler Energieträger.

Die tierhaltungsbedingte CH₄-Freisetzung ergibt sich aus der Summe stoffwechselbedingter Emissionen (Tab. 2) und anaerober Umsetzung der Exkremente.

Tabelle 2: Faktoren für die direkte, stoffwechselbedingte CH₄-Emission (Auswahl, Dämmgen et al., 2008)

Tierart	CH ₄ -Emission (kg CH ₄ /Tier*a)
Rinder	
Kälber	3,8
Färsen	33,5
Milchkühe	130,5
Mastschweine	1,45
Geflügel	0,1

Für Milchkühe errechnet sich die ruminale Emission je Tierplatz in Abhängigkeit von der Lebendmasse und der Milchleistung (Tab. 3). Bezogen auf das Produkt Milch geht bei höheren Leistungen der CH₄-Anfall deutlich zurück. Daraus folgt, dass durch Erhöhung der tierischen Leistung die CH₄-Emission über eine Senkung der Anzahl Tiere vermindert werden kann.

Tabelle 3: Faktoren für die direkte, stoffwechselbedingte CH₄-Emission für Milchkühe in Abhängigkeit von der Milchleistung (Dämmgen et al., 2008)

Milchleistung (kg/ Tier * a)	CH ₄ -Emission (kg/Tier*a)
4.000	100
5.000	108
6.000	115
7.000	123
... 11.000	...154

Die Bestimmung der Methan-Emission aus den tierischen Exkrementen ist mit großen Unsicherheiten behaftet, weshalb vom CH₄-Bildungspotenzial bezogen auf die Tierart gesprochen wird. Multipliziert mit einem Konversionsfaktor, der zwischen Tierart und Aufstallung unterscheidet, ergibt sich die CH₄-Freisetzung aus dem Bildungspotenzial (Tab. 4 und 5).

Tabelle 4: Methan-Bildungspotenzial aus den Exkrementen (Dämmgen et al., 2008)

Tierart	CH ₄ - Bildungspotenzial (kg CH ₄ / Tier*a)
Milchkühe (8t/a)	244
Rinder o. MK	77
Mastbullen	113
Schweine	34
Geflügel	9

Tabelle 5: Methankonversionsfaktoren (Dämmgen et al., 2008)

Aufstallung	CH ₄ - Konversionsfaktor (%)
Gülle	0,15
Stallmist	0,02
Tiefstall	0,2
Weide	0,01

Beispiel:

CH₄-Emission Milchkuh, 600 kg Lebendmasse, 8 t Milch/Nutzungsjahr, Stallmistaufstallung:

131 kg CH₄ ruminale Emission
+ 244 kg *0,02 CH₄ Emission aus Stallmist
= 135,9 kg CH₄ * GWP-Faktor 21
= 2.853 kg CO₂-Äq./Kuh

Durch Gülleaufstallung steigt die CH₄-Emission auf
= 3.520 kg CO₂-Äq./Kuh

Die Berechnung der N₂O-Emission erfolgt auf der Basis der Höhe des N-Umsatzes. Da die Abschätzung der N₂O-Emission in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften sehr unsicher ist, wird vereinfacht von einem linearen Zusammenhang zwischen der Höhe des N-Eintrags und der N₂O-Emission aus Mineralböden ausgegangen. Dabei wird unabhängig von der N-Form unterstellt, dass im Mittel 1 % des ausgebrachten Stickstoffs als N₂O-N emittiert. Zum N-Umsatz zählen Mineraldünger, organische Dünger, symbiotische N-Bindung, Rückführung von Ernterückständen, Gründüngung und die NH₃-Emission.

Beispiel:

N₂O-Emission Eliteweizen, Ertragserwartung 70 dt/ha, Verbleib des Strohs auf dem Feld:
(170 kg N-Düngung + 35 kg N-Stroh) * 1 % * 44/28
= 3,22 kg N₂O * GWP-Faktor 310
= 998 kg CO₂-Äq./ha und Jahr.

Nach Multiplikation der jeweiligen Gasmengen an CO₂, CH₄ und N₂O mit ihrem jeweiligen GWP-Faktor und Aufsummieren der so ermittelten CO₂-Äquivalente ergibt sich die Höhe der THG-Emissionen in kg CO₂-Äquivalente.

Die Bezugsgröße für die Bewertung der THG-Emissionen ist die Marktproduktion des Betriebes in GJ/ha. Sie ermittelt sich aus dem gesamten Verkauf von Marktprodukten (pflanzliche, tierische, Strom aus Biogas, Strohverkauf etc.) minus dem Zukauf aus landwirtschaftlichen Vorleistungen (Futter, Saatgut, Tiere). Multipliziert mit dem CO₂-Bindungsfaktor (kg CO₂ je GJ Nettomarktproduktion) ergibt sich die Kohlenstoffmenge in CO₂-Äquivalenten, die mit Marktprodukten den Betrieb verlässt.

Bewertungsmaßstab für die ermittelte THG-Emission oder -Vermeidung sind

- die spezifische produktbezogene Treibhausgas-Emission in kg CO₂-Äq. je GJ Marktprodukt, die aussagt, wie viel kg CO₂-Äq. für die Herstellung von 1 GJ Marktprodukt emittiert worden sind und
- der Treibhausgas-Saldo in kg CO₂-Äq./ha, der sich aus der Differenz zwischen CO₂-Bindung und -Emission errechnet und die Netto-CO₂-Emission oder -Vermeidung eines Betriebes angibt.

Um die erzielten Werte der spezifischen THG-Emission und des THG-Saldos bewerten zu können, bedarf es der Vorgabe von Schwellenwerten, die einen tolerablen Bereich kennzeichnen.

Landwirtschaftliche Produktion zeichnet sich durch eine Vielzahl an Betriebsformen aus. Die Höhe der THG-Emissionen wird wesentlich durch die Standortbonität und den Tierbesatz beeinflusst. Dementsprechend unterschiedlich muss die Höhe der Schwellenwerte ausfallen. Es muss sichergestellt sein, dass ein rinderhaltender Betrieb in minderer Lage ebenso gut bewertet werden kann wie ein Marktfruchtbetrieb in Gunstlage (Eckert et al., 2006).

Das Ergebnis der Erfassung und Bewertung von Treibhausgasflüssen im Betrieb zeigt für einen Beispielsbetrieb Tabelle 6.

Tabelle 6: Ergebnis der Bewertung der Treibhausgas-Emission eines Marktfrucht-Futterbaubetriebes mit Milchproduktion (C)

Betriebsbewertung TREIBHAUSGAS-EMISSION			
	Tierbesatz: 0,5 RGV/ha; BF= 2.600 ha		
Parameter Treibhausgasquelle	Gesamtbe- trieb	Pflanzenbau	Tierhaltung
	kg CO ₂ -Äq./ha		
Energieträger (Treibstoffe, Strom, Brennstoffe)	621	412	209
Mineraldünger	<u>854</u>	854	0
Pflanzenschutzmittel	21	21	0
Leistung von/für Fremde	0	0	0
W.-Dünger (Saldo Eigenerzeugung+Zukauf-Verkauf)	286	239	47,5
Zukauf org. Dünger (Klärschlamm, Kompost)	0	0	-
Ruminale CH ₄ -Emission	1.240	0	1.240
Symbiotische N-Bindung	99	99	0
Grün-/Strohdüngung (Zw.früchte, Koppelprod.)	74	74	0
Konservierungsverluste	19	19	0
NH ₃ -Emission (davon 50 % auf LF)	127	-	126,7
Zukauf Futter	<u>1.233</u>	-	1.233
Zukauf Saatgut	55	55	-
Futtereigenproduktion	0	-	4.170,3
Stroheinstreu (ENÄq.)	0	-	13,8
∑ Treibhausgasemission [kg/ha BF]	4.628	1.772,1	7.040,3
Summe Produktion GJ/ha	62,9	94,6	11,9
Verkauf pflanzlicher Marktprodukte	5.166	5.166	0
Verkauf tierischer Marktprodukte	920	0	919,7
Futtereigenproduktion	0	4.170	4170
W.-Dünger (ENÄq.)	0	0	102
Strohabfuhr	0	14	13,8
Produktion (kg CO₂-Äq./ GJ MP)	6.087	9.351	1.036
Spezif. THG-Emission [kg CO₂-Äq./ GJ MP]	74	19	589
Toleranzbereich	<46...68	<13...20	<900...1.350
THG-Saldo [kg CO₂-Äq./ha BF]	1.458	7.579	-6.005
Toleranzbereich	>3.805...2.536	>10.670...7.113	>-6.865...-10.298

Die Treibhausgas-Emissionen sind für die einzelnen Verfahren und in der Summe getrennt für den Pflanzenbau, die Tierhaltung und den Gesamtbetrieb in kg CO₂-Äq./ ha aufgelistet und den jeweiligen Produktmengen in GJ/ha gegenübergestellt. Auf den Gesamtbetrieb bezogen liegt die THG-Emission in diesem Betriebsbeispiel außerhalb des Toleranzbereiches und signalisiert dem Landwirt Handlungsbedarf für die Reduzierung von Treibhausgas-Emissionen.

4 Unvermeidbare und vermeidbare Einflüsse

Für die Bewertung der THG-Emissionen sind unvermeidbare von vermeidbaren Einflüssen zu trennen. Ursachen für überhöhte THG-Emissionen sind in

- zu hohen N-Überschuss-Salden
- zu hohem Energieträgereinsatz und
- zu geringen Erträgen und tierischen Leistungen

zu sehen.

Als unvermeidbar gilt die Höhe der THG-Emission, die unter der Bedingung eines optimierten Bewirtschaftungsregimes entsteht.

Dazu gehören:

- eine abfuhrorientierte Düngung
- ein normgerechter Energieträgereinsatz
- eine angepasste Tierhaltung
- ein optimales Ertrags- und Leistungsniveau.

Unter einer angepassten Tierhaltung wird ein Tierbesatz von durchschnittlich 1 GV/ha verstanden, der die gegenwärtige Nachfrage nach tierischen Produkten abdeckt. Für den einzelnen Betrieb bedeutet angepasste Tierhaltung ein Tierbesatz, dessen Grundfutterbedarf von der Produktivität des Standortes abgedeckt werden kann. Abfuhrorientierte Düngung liegt bei einem Nährstoff-Saldo (NPK) von Null zuzüglich der Höhe unvermeidbarer N-Verluste durch Auswaschung und Entgasung vor. Ein normgerechter Dieselverbrauch wird mit 100 l Diesel/ha LF beziffert und das optimale Ertragsniveau über die Bruttoenergieproduktion in Abhängigkeit von der Ackerzahl (AZ) definiert (Eckert et al., 2006).

Da der Landwirt nicht alle ertrags- und leistungsbeeinflussenden Faktoren kontrollieren kann, addiert sich dazu noch ein Toleranzbereich durch Multiplikation des unvermeidbaren Wertes mit einem Faktor. Mit diesen betriebs- und standortspezifischen Schwellenwerten kann der Landwirt für seine Bedingungen überprüfen, ob er alle Möglichkeiten der Reduzierung von THG-Emissionen ausgeschöpft hat oder nicht.

Beispiel:

Futterbaubetrieb mit Milchproduktion (A) und Marktfruchtbetrieb (B) mit einem tolerablen Maß der THG-Emission

A: Futterbaubetrieb mit Milchproduktion, 0,86 GV/ha,

Standortbonität: AZ 21/ 500 m/ 730 mm, Biosphärenreservat KULAP B22 auf 70 % der BF

Anteil Ackerland: 30 %,

naturale Leistungen: 42 dt/ha Getreide, 280 dt/ha Silomais, 8.000 l Milch/ Kuh

Kriterium	Dimension	Toleranzber.	Betriebswert	Optimum	Ende des Toleranzbereichs
				▼	▼
				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	
N-Saldo	kg N/ha * a	-50 ... +50	13		
spez. THG-Emission	kg CO2-Äq./GJ	278...464	307		
THG-Saldo	kg CO2-Äq./ha	-3293...-5042	-2984		

B: Marktfruchtbetrieb

Standortbonität: AZ 46/ 300 m/ 578 mm,

Anteil Ackerland: 100 %,

naturale Leistungen: 60 dt/ha Getreide, 350 dt/ha Silomais, 42 dt/ha Ölf Früchte

Kriterium	Dimension	Toleranzber.	Betriebswert	Optimum	Ende des Toleranzbereichs
				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	
N-Saldo	kg N/ha * a	-50 ... +35	30		
spez. THG-Emission	kg CO ₂ -Äq./GJ	< 15...25	16		
THG-Saldo	kg CO ₂ -Äq./ha	>8580...5653	7168		

Betrieb A hat eine spezifische Treibhausgas-Emission von +307 kg CO₂-Äq./GJ Marktprodukt, Betrieb B einen sehr viel günstigeren Wert von +17 kg CO₂-Äq./GJ Marktprodukt. Betrieb A emittiert CO₂ mit einem negativen THG-Saldo von -2.984 kg CO₂-Äq./ha, Betrieb B vermeidet CO₂ in Höhe von +7.168 kg CO₂-Äq./ha. Trotzdem kann beiden Betrieben eine tolerable Situation bescheinigt werden. Unter den Bedingungen des Standortes und des Tierbesatzes haben beide nicht wesentlich mehr als unvermeidbar an Treibhausgasen emittiert und in beiden Fällen mit überdurchschnittlichen pflanzlichen und tierischen Leistungen einen hohen Energiegewinn erzielt. Der Saldo für N wie auch der für die übrigen Nährstoffe liegt im tolerablen Bereich, der Tierbesatz kann mit Grundfutter vom Standort ernährt werden.

Eine CO₂-Vermeidung < +5.653 kg CO₂-Äq./ha im Betrieb B wäre nicht tolerierbar, weil der Faktoreinsatz gemessen am erzielten Ertrag zu hoch und das Ertragspotenzial des Standortes für die Gewinnung von Energie und Bindung von CO₂ nicht ausreichend ausgeschöpft wäre. Eine CO₂-Emission < -3.293 kg CO₂-Äq./ha im Betrieb A würde die Möglichkeiten des tierhaltenden Betriebes im benachteiligten Gebiet überschätzen. Der Milchviehbetrieb setzt die erwirtschaftete pflanzliche Biomasse fast vollständig für die Ernährung der Tiere ein. Von der aufgenommenen Bruttoenergie Futter gehen beim Wiederkäuer 30...50 % über Kot, 5...10 % über Gase, 3...5 % über Urin und ein weiterer Teil über die Abgabe von Wärme verloren. Außerdem benötigt das Tier Energie für Erhaltung und Wachstum. Nur etwa 20 % der eingesetzten Bruttoenergie finden sich in tierischen Produkten, wie Milch und Fleisch wider. Beim Schwein fällt der energetische Wirkungsgrad in der Produktion von Fleisch mit 25 % etwas günstiger aus. Im Unterschied zum Schwein ist das Rind mit seinem Verdauungssystem aber in der Lage, die Energie rohfaserreicher Futterstoffe aufzuschließen und in tierisches Eiweiß umzusetzen. Zuzüglich der THG-Emissionen wird die Tierhaltung unvermeidbar zum THG-Emittent. Der Rückfluss von Energie und Nährstoffen über die organischen Dünger mindert diesen Effekt durch Reduzierung des Mineraldünger-Zukaufs und damit der CO₂-Emission nur in geringem Umfang.

Für einen Hektar Eliteweizen mit einer Ertragserwartung von 70 dt/ha beläuft sich die THG-Emission unter optimalen Bedingungen auf etwa 1.700 kg CO₂-Äq./ha. Demgegenüber steht eine pflanzliche Produktion von 104 GJ/ha und eine CO₂-Bindung von 10.100 kg CO₂-Äq./ha. Abzüglich der THG-Emissionen ergeben sich als Optimalwerte eine Netto-CO₂-Vermeidung von +8.400 kg CO₂-Äq./ha und eine spezifische THG-Emission von 16 kg CO₂-Äq./GJ (Tab. 7).

Tabelle 7: Höhe der unvermeidbaren THG-Emission bei Anbau von Brotweizen und Winterraps und Haltung einer Milchkuh und eines Mastschweins

Verfahren	THG-Emission	THG-Bindung	THG-Saldo	spezifische THG-Emission	
	kg CO ₂ -Äq./ha	kg CO ₂ -Äq./ha	kg CO ₂ -Äq./ha	kg CO ₂ -Äq. je GJ	je t TM
Brotweizen (70 dt/ha)	1.700	10.100	+8.400	+16	266
Winterraps (40 dt/ha)	1.600	8.400	+6.800	+19	440
	kg CO ₂ -Äq./GV	kg CO ₂ -Äq./GV	kg CO ₂ -Äq./GV		
Milchkuh, 600 kg LM, Gülle					
8.000 l	6.000	1.600	-4.500	+348	
6.000 l	5.700	1.200	-4.500	+433	
Mastschwein, Gülle	3.500	1.800	-1.730	+139	

Die THG-Emission für eine Milchkuh (8,29 t Milch je Nutzungsjahr; 4 t Fleisch = 17,3 GJ/GV) mit Aufstallung auf Gülle führt zu einer unvermeidbaren spezifischen THG-Emission von 348 kg CO₂-Äq./GJ bzw. zu einem unvermeidbaren Treibhausgas-Saldo von -4.500 kg CO₂-Äq./GV. Der CO₂-Bindung in den Produkten Milch und Fleisch und der CO₂-Einsparung durch Nährstoffrückführung über Wirtschaftsdünger (1512 + 152 kg CO₂-Äq./GV) stehen die ruminale und güllebedingte CH₄-Emission (3.520 kg CO₂-Äq./GV) und der Verbrauch von Betriebsmitteln und Futter (900 kg CO₂-Äq./GV für Strom und Heizöl + 1.748 kg CO₂-Äq./GV) entgegen.

Eine geringere Milchleistung hat eine deutlich höhere THG-Emission je Einheit Produkt zur Folge. Da CH₄ im Wesentlichen aus dem Umsatz des Grundfutters stammt und weniger aus den leistungssteigernden Konzentraten, sinkt der CH₄-Ausstoß je Einheit Produkt mit steigender Leistung (Tab. 7).

Die gleiche Rechnung für 1 GV Schwein ergeben aufgrund geringerer Werte für den stoffwechselbedingten CH₄-Ausstoß und einem etwas höheren Energiegewinn (25 GJ/GV) als Treibhausgas-Saldo eine unvermeidbare Größe von -1.700 kg CO₂-Äq./GV und für die spezifische THG-Emission von 140 kg CO₂-Äq./GJ.

5 Ist-Zustand der Treibhausgas-Emissionen in Thüringen im Jahr 2006

Für Thüringen ergibt sich nach dem Berechnungsverfahren KUL (Eckert et al., 2006) für die Landwirtschaft im Jahr 2006 eine THG-Emission von 2,81 Mio t CO₂-Äq. Dieser Wert liegt in etwa in der gleichen Größenordnung wie der vom Institut für Energetik und Umwelt (IE) Leipzig ermittelte Wert von 3,017 Mio t CO₂-Äq. für das Jahr 2001 (Ihle et al., 2003) trotz unterschiedlicher Methode.

Unter den Bedingungen des Anbauflächenverhältnisses (hoher Anteil von Raps und Eliteweizen), der Tierarten und des geringen Tierbesatzes von 0,52 GV/ha, guter Erträge und Leistungen und eines N-Überschuss-Saldos von +70 kg/ha im Jahr 2006 ergibt sich für den Bereich des Pflanzenbaus eine Treibhausgas-Emission von 1.747 kg CO₂-Äq./ha und für den Bereich der Tierhaltung eine von 2.182 kg CO₂-Äq./ha. In Bezug auf die Standortbonität und den Tierbesatz wird die spezifische THG-Emission mit 51 kg CO₂-Äq./GJ als tolerabel eingestuft. Das gilt auch für den THG-Saldo in Höhe von +1.248 kg CO₂-Äq./ha, der besagt, dass die Thüringer Landwirtschaft mehr CO₂ bindet als sie an CO₂-Äquivalenten emittiert (Tab. 8).

Tabelle 8: Ist-Zustand der THG-Emission in der Landwirtschaft in Thüringen, berechnet mit dem Verfahren KUL

		Bilanzfläche	768.000 ha	
		davon Grünland	21,8 %	
		Tierbesatz	0,52 GV/ha	
		davon Rind	0,35 GV/ha	
		davon Schwein	0,12 GV/ha	
		Gesamt-Landwirtschaft	Pflanzenbau	Tierhaltung
Treibhausgas-Emission	kg CO ₂ -Äq./ha	3.488	1.747	2.182
Produktion	GJ/ha	68,2	91,0	8,2
	kg CO ₂ -Äq./ha	6.445	8.874	658
spezifische THG-Emission	kg CO ₂ -Äq./GJ	51	19	266
THG-Saldo	kg CO ₂ -Äq./ha	1.248	+7.127	-6.214

6 Minderungspotenziale von Treibhausgas-Emissionen in der landwirtschaftlichen Primärproduktion

6.1 Änderung der Futterzusammensetzung der Wiederkäuer

Die Fütterung mit Getreide und Leguminosen führt zu geringerer Methanbildung als die mit cellulosereichen Rationen aus Gras, Heu, Silage und Stroh. Die Erhöhung des Anteils zellwandarmer und stärkereicher Futtermittel widerspricht aber dem Grundprinzip einer wiederkäuergerechten Ernährung und kommt nicht als Minderungspotenzial in Frage (Flachowsky, 2007).

Es wird für möglich gehalten, den beim Abbau der Kohlenhydrate entstehenden Wasserstoff in andere biochemische Reaktionen einzubinden. Ein Beispiel dafür ist die Acetogenese, bei der aus Kohlendioxid und Wasserstoff nicht Methan, sondern Essigsäure gebildet wird, die vom Tier energetisch genutzt werden kann (Schönhusen et al., 2002). Es bleibt zu klären, inwieweit eine Stimulierung dieses Prozesses möglich ist.

Eine andere Möglichkeit, die Methanbildung zu hemmen wird derzeit in kondensierten Tanninen getestet. Sie kommen in vielen Leguminosen vor und sind häufig Bestandteil des Futters von Wiederkäuern.

Es ist bekannt, dass verschiedene Fettquellen depressiv auf methanogene Mikroorganismen wirken. Für den Einsatz von Fetten gibt es aber Grenzen aufgrund von Einflüssen auf die Milchezusammensetzung.

Das methansenkende Potenzial dieser Möglichkeiten sollte allerdings nicht überbewertet werden, da sich die im Pansen ablaufenden Prozesse über Jahrtausende optimiert haben und sehr komplex sind (Flachowsky, 2007).

In einer Änderung der Futterzusammensetzung oder Verabreichung von Zusatzstoffen wird kein nennenswertes Minderungspotenzial gesehen. Ein viel größerer Einfluss ist in der Höhe der tierischen Leistung zu suchen.

6.2 Effizienter Betriebsmitteleinsatz

Ein effizienter Betriebsmitteleinsatz wird durch einen sparsamen Einsatz von Betriebsmitteln bei gleichzeitiger Steigerung der pflanzlichen und tierischen Leistungen erreicht. In der Rinderhaltung geht der Methananfall bezogen auf das Produkt Milch oder Fleisch bei höheren Leistungen deutlich zurück. Durch Erhöhung der tierischen Leistung würden für die gleiche Menge an Milch und Fleisch, weniger Tiere benötigt, wodurch die CH₄-Emission reduziert werden könnte. Durch eine Steigerung der Milchleistung um 10 % und einer dem entsprechenden Reduzierung des Milchkuhbestandes um 10 %, ließe sich in Thüringen die THG-Emission um 2,6 % verringern (Tab. 9). Im Zeitraum von 2002 bis 2008 ist bereits eine Steigerung der Milchleistung um mehr als 10 % von 7.500 auf 8.600 kg Milch/Kuh erreicht worden. Nach Schätzungen der TLL für die Entwicklung der Landwirtschaft bis 2020 wird in den nächsten Jahren eine weitere Steigerung um bis zu 10 % für möglich gehalten (Gräfe, 2009). Durch Senkung der Reproduktionsrate in Milchkuhbeständen von gegenwärtig 38 auf 30 % würde eine Minderung um ca. 2,0 % erwartet.

Tabelle 9: Minderungspotenziale durch erhöhte Effizienz in der Landwirtschaft in Thüringen (Eckert et al., 2006)

Maßnahme	Minderung	Einsparpotenzial CO ₂ -Äquivalent	
		kg CO ₂ -Äq./ha AF	%
Reduzierung N-Überschuss-Saldo	20 kg N/ha AF	145	3,8
Einsparung Diesel	10 kg/ha AF	40	1,0
Einsparung Strom	30 kWh/GV	14	0,4
Steigerung Milchleistung (5 Jahre)	+ 750 kg (10 %)	90	2,6
Senkung Reproduktionsrate Milchkuh	40 % → 30 %	75	2,0
Summe		364	9,8

Durch Verringerung des N-Überschuss-Saldos in Thüringen von derzeit 70 auf 50 kg/ha könnte die THG-Emission um 145 kg CO₂-Äq./ha, resp. 3,6 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen verringert werden. Reduzierter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln bringt kaum Einspareffekte. Ihr Anteil an den landwirtschaftlichen THG-Emissionen ist mit 1 % marginal. Des Weiteren wird die Reduzierung des Einsatzes von Diesel und Strom um jeweils 10 % für möglich gehalten. Das entspricht in Thüringen einem Minderungspotenzial von 1,0 und 0,4 %.

Mittelfristig ließe sich in Thüringen durch verbesserte Effizienz der eingesetzten Betriebsmittel eine Treibhausgas-Minderung um etwa 10 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen realisieren (Tab. 9).

Beispiel:

Minderungspotenziale für THG-Emissionen in einem Marktfrucht-Futterbaubetrieb mit Milchproduktion (C)

C: Marktfrucht-Futterbaubetrieb mit Milchproduktion, 0,5 RGV/ha,

Standortbonität AZ 56/ 185 m/ 552 mm,

Anteil Ackerland 98 %,

naturale Leistungen: 54 dt/ha Getreide, 351 dt/ha Silomais (Jahr 2006), 10.000 l Milch/Kuh

Szenario 0: THG-Saldo außerhalb Toleranzbereich, ebenso wie N-Saldo

Kriterium	Dimension	Toleranzber.	Betriebswert	Optimum	Ende des Toleranzbereichs
				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	
N-Saldo	kg N/ha * a	-50 ... +30	62		
spez. THG-Emission	kg CO ₂ -Äq./GJ	< 46...68	74		
THG-Saldo	kg CO ₂ -Äq./ha	>3850...2536	1458		

Sowohl die spezifische THG-Emission als auch der THG-Saldo liegen außerhalb des Toleranzbereiches, obwohl die tierischen Leistungen mit 23,3 GJ Milch und Fleisch je GV Milchkuh sehr hoch sind und die THG-Emissionen in der Tierhaltung im Bereich des Optimums liegen (Tab. 6, S. 11). Dafür erreichen die Erträge im pflanzlichen Bereich nicht die Erwartungen (95 an Stelle von 122 GJ/ha bei einer Ackerzahl von 56) und führen zu einem erhöhten Futterzukauf. Für die Bewertung der Tierhaltung ist es egal, ob das Futter aus der Eigenproduktion kommt oder zugekauft wird. Gesamtbetrieblich steht dem Futterzukauf aber eine nicht ausreichende Ausnutzung des Ertragspotenzials des Standortes gegenüber, was zu ungünstigen Werten der THG-Emission führt. Ein weiterer Beitrag zur Überschreitung des Toleranzbereiches ist in einem für diesen Standort zu hohen N-Überschuss-Saldo zu sehen.

Durch Reduzierung des N-Überschuss-Saldos um 33 kg/ha auf den Schwellenwert von 30 kg/ha, verbessert sich die spezifische Treibhausgas-Emission um 5 % und der THG-Saldo um 15 %:

Szenario 1: Reduzierung des N-Saldos um ~ 30 kg/ha

Kriterium	Dimension	Toleranzber.	Betriebswert	Optimum	Ende des Toleranzbereichs
				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	
N-Saldo	kg N/ha * a	-50 ... +30	29		
spez. THG-Emission	kg CO ₂ -Äq./GJ	< 46...68	70		
THG-Saldo	kg CO ₂ -Äq./ha	>3850...2536	1687		

-5 % verbessert
+15 % verbessert
im Vergleich zu S0

Durch Anheben des Ertrages auf das Ertragsniveau der beiden Vorjahre (92%) 2004 und 2005 und Beibehalten eines N-Saldos von 30 kg/ha durch Erhöhung der Mineraldünger-N-Zufuhr entsprechend der höheren Ertragserwartung verbessern sich die spezifische THG-Emission um 12 % und der THG-Saldo um 51 %:

Szenario 2: Optimierung der Erträge (auf 92 % der beiden Vorjahre)

Kriterium	Dimension	Toleranzber.	Betriebswert	Optimum	Ende des Toleranzbereichs
				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	
N-Saldo	kg N/ha * a	-50 ... +30	29		
spez. THG-Emission	kg CO ₂ -Äq./GJ	< 46...68	65		
THG-Saldo	kg CO ₂ -Äq./ha	>3850...2536	2204		

- 12 % verbessert
+51 % verbessert
im Vergleich zu S0

Durch energetische Verwertung des anfallenden Stallmistes in einer Biogasanlage (600 kW-Anlage) verbessert sich die Situation erwartungsgemäß deutlich. Dafür steigen die NH₃-Verluste von 26 auf 28 kg NH₃-N/ ha aufgrund des höheren NH₄-Anteils in der Biogasgülle, der Toleranzbereich von 50 kg/ha wird dadurch aber nicht überschritten:

Szenario 3: Stallmist in Biogasanlage, 600 kW-Anlage

Kriterium	Dimension	Toleranzber.	Betriebswert	Optimum	Ende des Toleranzbereichs
				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	
N-Saldo	kg N/ha * a	-50 ... +30	29		
spez. THG-Emission	kg CO ₂ -Äq./GJ	< 46...68	58		
THG-Saldo	kg CO ₂ -Äq./ha	>3850...2536	2625		

-22 % verbessert
+80 % verbessert
im Vergleich zu S0

Würde der Betrieb die Milchleistung von 10.000 l auf 7.000 l reduzieren, bei gleichzeitiger Aufstockung des Viehbestandes und Erhöhung der Futter-Anbaufläche für den Verkauf der gleichen Milchmenge, würde sich die spezifische THG-Emission um 16 % und der THG-Saldo um 58 % verschlechtern. Die tierische Leistung in Höhe von 7.000 l / Milchkuh (15,48 GJ/GV) entspricht noch den Vorstellungen an eine tolerable Wirtschaftsweise. Bei gleichzeitig optimierten Leistungen im Pflanzenbau ist es deshalb möglich, dass trotz schlechterer, absoluter Werte der THG-Emission eine noch tolerable Situation in der spezifischen THG-Emission entsteht. Trotzdem zeigt dieses Beispiel das Potenzial hoher Leistungen, hier insbesondere in der Milchviehhaltung, für die Reduzierung von THG-Emissionen:

Szenario 4: Reduzierung der Milchleistung von 10.000 auf 7.000 l / Kuh, sonst wie Optimierung in S 2

Kriterium	Dimension	Toleranzber.	Betriebswert	Optimum	Ende des Toleranzbereichs
				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	
N-Saldo	kg N/ha * a	-50 ... +30	29		
spez. THG-Emission	kg CO ₂ -Äq./GJ	< 74...112	86		
THG-Saldo	kg CO ₂ -Äq./ha	>1058...706	617		

+16 % verschlechtert
-58 % verschlechtert
im Vergleich zu S0

6.3 Extensivierung

Etwa 45 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen kommen aus dem N-Einsatz und – Umsatz (CO₂, N₂O). Im Fall der Senkung von N-Überschuss-Salden stellt die Reduzierung des N-Einsatzes ein wichtiges Minderungspotenzial dar. Durch Reduzierung der N-Düngung unter das betriebswirtschaftliche Optimum mit dem Ziel einer Extensivierung der Produktion, wird die Minderung der THG-Emission je Hektar mit einer Erhöhung der THG-Emission je Einheit Produkt erkauft.

Durch eine 50-%ige Verringerung des Mineraldünger-Aufwandes von derzeit 150 auf 75 kg/ha sinkt zwar die THG-Emission je Flächeneinheit auf 90 % im Vergleich zum optimierten N-Einsatz (130 kg/ha Mineral-N), der Ertragsabfall ist aber weitaus höher und sinkt auf 72 %, so dass die spezifische THG-Emission von 29 auf 35 kg CO₂-Äq./GJ Marktprodukt ansteigt (Abb. 1).

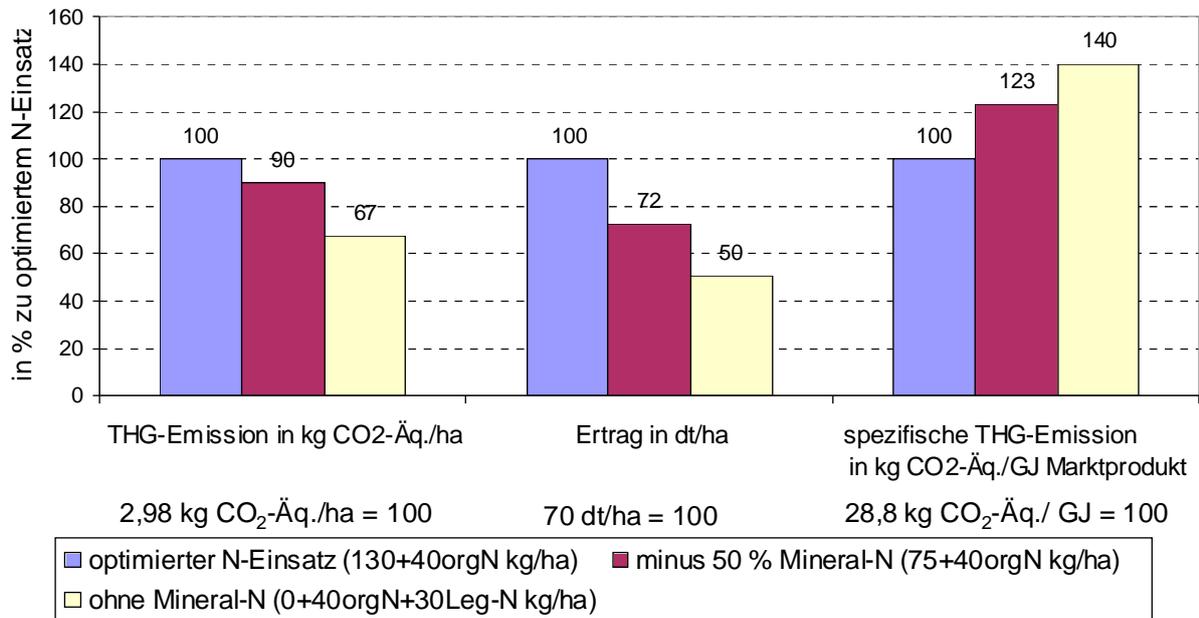


Abbildung 1: Treibhausgas-Minderung durch reduzierten N-Einsatz auf der Ackerfläche (nach Berechnungen von Eckert et al, 2006)

Bei vollständiger Unterlassung der mineralischen N-Düngung, wie im Fall ökologischer Betriebe, verschlechtert sich die Situation weiter. Die Rechnung beruht auf mittleren Betriebsverhältnissen in Thüringen mit einem Tierbesatz von 0,5 GV/ha (40 kg/ha organischer N) und berücksichtigt nicht die standortabhängigen Möglichkeiten des ökologischen Landbaus zur Ertragsoptimierung. Selbst wenn die THG-Emission je Einheit Produkt gleich hoch ausfallen sollte, würde aufgrund des deutlich geringeren Ertrages für den gleichen Bedarf an Marktprodukten, eine größere Fläche benötigt, die in Deutschland nicht zur Verfügung steht. Das Potenzial hochproduktiver Landwirtschaft, Nahrungsmittel effizient und umweltverträglich zu erzeugen, würde unzureichend ausgeschöpft. Extensivierung stellt deshalb kein Minderungspotenzial dar. Bei niedrigen THG-Emissionen je Einheit Produkt wird Extensivierung allenfalls auf einer begrenzten Fläche stattfinden können.

Auch der Vergleich ökologisch und integriert wirtschaftender Betriebe von Hülshagen (2008) zeigt, dass, ohne Berücksichtigung der C-Speicherung im Humus, ökologische Betriebe in Bezug auf die THG-Emission je Einheit Produkt keinen Vorteil gegenüber integriert wirtschaftenden Betrieben haben (Tab. 10).

Tabelle 10: Stoff- und Energiehaushalt, zur C-Sequestrierung und zu THG-Emissionen im Pflanzenbau ökologischer und integrierter Betriebe (Hülsbergen, 2008)

Parameter/Indikator	Maßeinheit	Ökologische Betriebe n = 18	Integrierte Betriebe n = 10
N-Input	kg N/ha	149	240
TM-Ertrag	t/ha	3,6	7,5
CO ₂ -Emission	kg CO ₂ -Äq./ha	451	1018
C-Speicherung im Humus *	kg CO ₂ -Äq./ha	-402	202
N ₂ O-Emission	kg CO ₂ -Äq./ha	869	1.398
Treibhauspotenzial	kg CO ₂ -Äq./ha	918	2.618
Treibhauspotenzial	kg CO ₂ -Äq./t GE	274	370
<i>Treibhauspotenzial (ohne C-Speicherung im Humus)</i>	<i>kg CO₂-Äq./t GE</i>	<i>367</i>	<i>322</i>

* positive Werte bedeuten einen Humusabbau und die Abgabe von Boden-C an die Atmosphäre, negative Werte einen Humusaufbau und die Rückbindung von C aus der Atmosphäre in den Boden

6.4 Ausnutzen von CO₂-Senken

Unter CO₂-Senken sind temporäre C-Speicher zu verstehen. Eine bedeutende CO₂-Senke im Naturhaushalt stellt die langlebige Biomasse dar, z. B. der Holzbestand der Wälder und der Humus. Weltweit werden derzeit jährlich etwa 2 Milliarden Tonnen C zusätzlich in Wäldern und Böden gespeichert. Das wird auf die Wirkung steigender Gehalte an CO₂ und N₂ in der Atmosphäre und der globalen Erwärmung zurückgeführt. Diese zusätzliche Speicherkapazität ist jedoch begrenzt. Den Berechnungen zufolge kann bereits in wenigen Jahrzehnten kein zusätzliches CO₂ mehr von der Vegetation aufgenommen werden (Clausen et al. 2000, PIK).

In der Landwirtschaft könnte durch Stilllegung und strikte Unterlassung der Bodenbearbeitung eine CO₂-Einbindung von maximal 1,6 t CO₂/ha und Jahr erreicht werden (Eckert et al. 2006). Allerdings ist der Humus ein temporärer und zudem äußerst empfindlicher Speicher, der durch jede Bodenbearbeitung schnell und unkontrolliert zur CO₂-Quelle wird. Die Bindung von CO₂ in Humus stellt deshalb aus Sicht des Klimaschutzes kein anrechenbares Minderungspotenzial dar. Wenngleich zu einer nachhaltigen Landwirtschaft die Sicherung eines optimalen Humusgehaltes im Boden durch eine ausgeglichene Humusbilanz gehört, d.h. unter der Voraussetzung eines optimalen Humusgehaltes, vollständiger Ersatz des bewirtschaftungsbedingten Humusverlustes durch Zufuhr organischer Substanz. Analysen von Betrieben im Umwelttestbetriebsnetz Thüringen zeigen zumindest, dass in keinem der Betriebe ein Humusmangel auftritt (Eckert et al., 2006). Wenn es allerdings gelingt, im ökologischen Landbau (z.B. aufgrund höherer Anteile humusmehrender Kulturen in der Fruchtfolge) den Humusgehalt langfristig anzuheben, kann auf diesen Flächen bis zum Zeitpunkt eines erneuten Gleichgewichts ein Minderungspotenzial entstehen (Tabelle 10; Hülsbergen, 2008).

7 Minderungspotenziale von Treibhausgas-Emissionen durch Gewinnung von Energie aus landwirtschaftlicher Biomasse

Ein bedeutendes Minderungspotenzial für Treibhausgas-Emissionen besteht in der energetischen Nutzung von Biomasse als Ersatz für fossile Energieträger.

Die Gewinnung von Energie aus Biomasse kann biochemisch durch mikrobielle Abbauprozesse, chemisch-physikalisch durch Abpressen von Pflanzenöl und thermochemisch durch Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung erfolgen. Das Ergebnis sind gasförmige,

flüssige und feste Bioenergieträger, aus denen in weiteren Prozessen mechanische Energie, Wärme, Kälte und elektrische Energie bereitgestellt werden können.

Es gilt für die Energieversorgung im ländlichen Raum, neben dem Bedarf an flüssigen Kraftstoffen zum Betrieb von Kraftfahrzeugen, die Versorgung mit Heizwärme und Kälte sowie von Elektro-Energie durch effektive Kraft-Wärme-Kopplung zu realisieren (Hebecker, 2006).

Bei der Betrachtung der Energie- und CO₂-Flüsse ist zwischen der ersten Stufe, der Umwandlung von Biomasse-Energie zum Gebrauchenergieträger und der zweiten Stufe, der Bereitstellung von Endenergien, zu unterscheiden. In beiden Stufen gibt es Energie-Verluste, die das THG-Minderungspotenzial senken. Es kommt darauf an, optimale Kombinationen zwischen diesen beiden Stufen für eine möglichst hohe Energieausbeute zu finden.

Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellte Netto-CO₂-Vermeidung der einzelnen Verfahren ermittelt sich aus dem Energiegewinn und der daraus entstehenden Vermeidung von CO₂ durch Substitution fossiler Energieträger abzüglich der THG-Emissionen, die durch die Produktion der Biomasse und den Energiebedarf für den Prozess der Energiegewinnung entstehen, zuzüglich der THG-Einsparungen durch Rückführung der Nebenprodukte in den landwirtschaftlichen Stoffkreislauf. Energetische Aufwendungen für Transporte und Logistik außerhalb des landwirtschaftlichen Betriebes sind nicht mit einbezogen, desgleichen bisher noch unsicher kalkulierbare Treibhausgas-Emissionen während und nach dem Energiegewinnungsprozess.

Den Berechnungen für die THG-Minderung in Thüringen liegen die Anbauflächen und Tonnagen an landwirtschaftlicher Biomasse vom Jahr 2008 zugrunde. Je nach den aktuellen agrarpolitischen Rahmenbedingungen und Preisen am Markt werden sich diese Angaben ändern und erfordern für die Ausweisung des Minderungspotenzials eine erneute Berechnung.

7.1 Erzeugung von Biogas

Das Verfahren beruht auf dem Prozess der anaeroben Gärung. Unter Luftabschluss und gleichbleibender Wärme zerlegen acetogene und methanogene Bakterienstämme die organische Substanz über mehrere Zwischenstufen, wobei als Energieträger Biogas mit einem Gehalt von 45 - 70 Vol% Methan entsteht. Methan ist nutzbar für die Erzeugung von Wärme und Strom und als Kraftstoff.

Mit Ausnahme stark ligninhaltiger Stoffe (Holz und Stroh) ist fast jede Art von Biomasse aus dem landwirtschaftlichen, industriellen und kommunalen Bereich als Substrat geeignet.

Nach derzeitigem Stand der Technik werden in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (Blockheizkraftwerke) je nach Größe 35 - 42 % elektrischer und 40 - 50 % thermischer Wirkungsgrad erreicht. Nach Schätzungen kann zurzeit die Wärmeenergie im ländlichen Raum nicht vollständig sinnvoll genutzt werden. Für die weitere Kalkulation wird ein Nutzungsanteil der Wärme von 30 % und ein elektrischer Wirkungsgrad von 38 % unterstellt. Die Ausnutzung der Biogasenergie könnte ggf. durch Einspeisung in das Erdgasnetz verbessert werden. Das erfordert aber die Gasaufbereitung auf Erdgasqualität, die je nach Verfahren zu Methanleckagen führt und einen nicht unwesentlichen Einsatz von elektrischer Prozessenergie erfordert.

Der Energiegewinn verringert sich um die energetischen Aufwendungen für die Produktion der pflanzlichen Biomasse und den Prozessstrom. Gleichzeitig wird fossile Energie eingespart, durch Rückführung der Biogasgülle in den landwirtschaftlichen Stoffkreislauf. Aufgrund des erhöhten NH₄-Anteils am Gesamt-N, ist von einer höheren und schnelleren Verfügbarkeit des N auszugehen. Andererseits besteht aber auch die Gefahr des NH₃-

Ausstoßes. Es wird eine im Vergleich zur Rindergülle 10 % höhere NH₃-Emission unterstellt, die den Gunsteffekt der Nährstoffrückführung durch Bildung von N₂O mindert (Tab. 11).

Tabelle 11: Gewinnung von Energie und CO₂-Vermeidung durch das Verfahren Biogas

	Rohstoff					
	Silomais		Getreide		Rindergülle	
Ertrag t FM/ha bzw. t FM/GV	34		6,91		28 ¹	
t oTS/ha bzw. t oTS/GV	10,4		5,8		1,8	
Energiemenge/ CO ₂ -Vermeidung Biomasse pot. ² GJ/ha kWh/ha	179 49.674		100 27.825			
Biogasausbeute l/kg o TS	600		700		363	
CH ₄ -Gehalt in Biogas %	52		52		55	
Energiemenge Biogas pot. ³ kWh/ha	32.243		21.071		3.598	
	GJ/ha	kg CO ₂ -Äq./ha	GJ/ha	kg CO ₂ -Äq./ha	GJ/ha	kg CO ₂ -Äq./ha
Energiemenge/ CO ₂ -Vermeidung nutzbar ⁴	135	7.548	88	4.932	15	842
η _{el.} 0,38 η _{th.} 30 % v. 0,45	16	1.144	10	748	2	128
Prozessenergie ⁵	-13	-755	-9	-493	-2	-84
Energieaufwand/ CO ₂ -Emission Anbau u. Ernte	-12	-1.528	-9	-1.315		entfällt
Energiemenge/CO ₂ -Vermeidung Reststoffe nutzbar ⁶						
Rückführung Nährstoffe N ₂ O-Emission Biogasgülle	+5	+270 -167	+3,3	+188 -133		-24
Netto-Energie-Gewinn/ Netto-CO ₂ -Vermeidung	GJ/ha	kg CO ₂ -Äq./ha	GJ/ha	kg CO ₂ -Äq./ha	GJ/GV	kg CO ₂ -Äq./GV
	129,8	6.512	83,9	3.927	15,3	862

¹ 22 m³ Gülle/ Kuh b. 10 % TS-Gehalt (Gräfe, 2008) * 1,03 t/m³ Dichte bei 11 % TS-Gehalt (Kunz et al., 2004)

² 17,2 GJ/t TS

³ 9,94 kWh/ m³ CH₄

⁴ bezogen auf CH₄, Strom 11 GJ/MWh_{Strom} und 56 kg CO₂/GJ_{Strom}, 3,6 GJ/MWh_{Wärme} und 73 kg CO₂/GJ_{Wärme}

⁵ 10 % der Stromproduktion

⁶ Rückführung Nährstoffe: 60 % der N-Abfuhr, 100 % der P-, K-Abfuhr, N₂O-Emission Biogasgülle: 40 % NH₃-N-Verluste

Bei einer Biogasausbeute der Rindergülle von 363 l/kg oTS und einem CH₄-Gehalt von 55 %, ergibt sich je 1,8 t oTS einer RGV pro Jahr, eine potenzielle Energiemenge von 3.598 kWh (Reinhold, 2005). Da davon nur etwa 38 % in Form von Strom und 30 % von 45 % in Form von Wärme nutzbar sind, ergibt sich daraus eine nutzbare Energiemenge von 17 GJ. Abzüglich energetischer Aufwendungen für den Biogasprozess, verbleibt ein Netto-Energiegewinn von 15,3 GJ/GV bzw. 8,5 GJ/t oTS Rindergülle. Die Netto-CO₂-Vermeidung beläuft sich auf 862 kg CO₂-Äq./RGV bzw. 479 kg CO₂-Äq./t oTS Rindergülle (Tab. 11).

Je Hektar Silomais ist bei einer Biogasausbeute von 600 l/kg oTS, einem Ertrag frei Krippe von 10,4 t oTS/ha (Peyker et al., 2007) und einem CH₄-Gehalt von 52 %, eine Energiemenge von 32.243 kWh/ha gewinnbar. Die nutzbare Energiemenge beträgt 151

GJ/ha. Abzüglich energetischer Aufwendungen für die Produktion und den Biogasprozess und zuzüglich energetischer Einsparungen durch Rückführung von Nährstoffen, ergibt sich ein Netto-Energiegewinn von 129,8 GJ/ha, um den fossile Energieträger ersetzt werden können. Aus der energetischen Nutzung der pflanzlichen Biomasse ergibt sich eine CO₂-Vermeidung von 8.692 kg CO₂-Äq./ha. Davon abzuziehen sind 1.528 kg CO₂-Äq./ha für die Produktion von Silomais und 755 kg CO₂-Äq./ha für den Prozessstrom. Durch Rückführung von Nährstoffen mit der Biogasgülle erfolgt eine Gutschrift von 270 kg CO₂-Äq./ha, die sich aufgrund von N₂O-Emissionen während der Ausbringung um 167 kg CO₂-Äq./ha vermindert. Es verbleibt eine anrechenbare CO₂-Vermeidung von 6.512 kg CO₂-Äq./ha Silomais im kombinierten Verfahren Biogas/Kraft-Wärme-Kopplung/ Biogasgülle.

Für Getreide beträgt die Netto-CO₂-Vermeidung 3.927 kg CO₂-Äq./ha, für Anweilensilage 3.163 kg CO₂-Äq./ha und für Ganzpflanzensilage 4.054 kg CO₂-Äq./ha unter Annahme eines Ertrages von 5,8, 7,2 und 7,7 t oTS/ha (95 % der TS).

Die Energie der Biomasse wird im Verfahren Biogas nicht vollständig umgesetzt. Dafür leisten die zurückbleibenden, meist ligninhaltigen Bestandteile einen wichtigen Beitrag für die Reproduktion der organischen Substanz im Boden. Dennoch kann es, bei Anbau von Feldfrüchten für die Biogasgewinnung, zu einer Humuszehrung kommen, wenn der anbaubedingte Humusverlust durch Rückführung der Biogasgülle nicht kompensiert wird, wie im Fall von Silomais.

Im Gärungsprozess werden 8.098 kg oTS/ha abgebaut (bei einem Ertrag von 40 t/ha Silomais * 0,32 % TS-Gehalt * 0,95 % oTS-Gehalt * 600 l/kg oTS * 1,11 kg/m³ Biogas ohne Wasser) und bleiben 4,06 t oTS/ha als Biogasgülle für die Rückführung übrig (Reinhold, 2005). Die TS-Menge von 4,06 t oTS/ha entspricht bei einem TS-Gehalt von 8 % einer Biogasgüllemenge von 50 t, multipliziert mit 10 kg Humus-C/t Biogasgülle mit 8 % TS-Gehalt, ergibt sich eine Humuszufuhr von +500 kg C/ha (VDLUFA, 2004). Der Betrag der Humuszehrung durch Anbau von Silomais beläuft sich auf etwa - 680 kg Humus-C/ha. Damit würde es trotz Rückführung der Biogasgülle zu einer Humuszehrung von -180 kg C /ha kommen. Entscheidend ist aber die Humusbilanz in der Fruchtfolge und im Gesamtbetrieb. Durch eine mehr als ausreichende Humusreproduktion im Gesamtbetrieb können Humusdefizite auf einem Teil der Fläche abgepuffert werden. Kenntnisse über die Reproduktionsleistung der organischen Substanz der Biogasgülle sind derzeit aber noch unsicher. Es wird, aufgrund des höheren Anteils an schwer abbaubarem C, vermutet, dass sie im Vergleich zur Rohgülle höher liegt (Reinhold, 2007).

Beispiel:

Auswirkung des Anbaus von Silomais für die Gewinnung von Biogas in einem Marktfruchtbetrieb auf die THG-Emission, den Humus-Saldo und die N-Emissionen

B: Marktfruchtbetrieb

Standortbonität: AZ 46/ 300 m/ 578 mm,

Anteil Ackerland: 100 %,

naturale Leistungen: 60 dt/ha Getreide, 450 dt/ha Silomais, 42 dt/ha Ölfrüchte

Szenario 0: ohne Anbau von Silomais für Gewinnung von Biogas

Kriterium	Dimension	Toleranzber.	Betriebswert	Optimum	Ende des Toleranzbereichs
				▼	▼
				0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	
N-Saldo	kg N/ha * a	-50 ... +35	30		
NH ₃ -Emission	kg N/ha * a	<25...50	5		
Humus-Saldo	kg C/ha	-75...300	207		
spez. THG-Emission	kg CO ₂ -Äq./GJ	< 15...25	16		
THG-Saldo	kg CO ₂ -Äq./ha	>8580...5653	7168		

Szenario 1: Anbau von Silomais auf ¼ der Betriebsfläche für Gewinnung von Biogas

Kriterium	Dimension	Toleranzber.	Betriebswert	Optimum	Ende des Toleranzbereichs
				0	6
N-Saldo	kg N/ha * a	-50 ... +35	30	5	6
NH3-Emission	kg N/ha * a	<25...50	25	1	6
Humus-Saldo	kg C/ha	-75...300	124	3	6
spez. THG-Emission	kg CO2-Äq./GJ	< 52...78	21	1	6
THG-Saldo	kg CO2-Äq./ha	>7838...5225	6516	5	6

Der Betrieb B erweitert seine Produktion um eine Biogasanlage und ersetzt auf einem Viertel der Betriebsfläche, Getreide mit Silomais. Die Werte der THG-Emission verschlechtern sich im Vergleich zu einem Verkauf pflanzlicher Biomasse, aufgrund unvermeidbarer energetischer Verluste während der Prozesse der Vergärung und Umwandlung von Biogas zu Wärme und Strom. Tatsächlich leistet der Betrieb einen Beitrag zur CO₂-Vermeidung, in dem er Wärme und Strom aus Biomasse für die Substitution fossiler Energieträger bereitstellt. Die Systemebene Betrieb ist für die Bestimmung des Minderungspotenzials des Verfahrens der Energiegewinnung daher nicht geeignet. Dafür zeigen sich Auswirkungen auf andere ökologische Kriterien.

Der Ersatz von Getreide plus Stroh durch Silomais auf einem Viertel der Betriebsfläche, führt nach den Kalkulationswerten des VDLUFA, 2004 zu einer Humuszehrung. Unter den Bedingungen des Betriebes ist aber immer noch eine erweiterte Humusreproduktion von +124 kg C/ha gewährleistet, die ohne Biogasanlage überdurchschnittlich war.

Der N-Sollwert von Silomais entspricht in etwa dem von Getreide und führt deshalb über den Pfad der N₂O-Bildung nicht zu einer Erhöhung der THG-Emission, vorausgesetzt die Düngung erfolgt empfehlungskonform (Boden-N_{min}- und Pflanzenanalyse für die Abschöpfung des mit der Biogasgülle zugeführten N).

Eine zusätzliche THG-Quelle und auch Befruchtung der Gewässer mit N entsteht durch NH₃-N-Verluste nach Ausbringung der Biogasgülle, die mit 25 kg/ha aber noch im tolerablen Bereich liegt.

In Thüringen produzieren 102 landwirtschaftliche Biogasanlagen (Stand 1.1.2008) mit einer mittleren installierten Leistung von ca. 52 MW. 28 % der Gaserzeugung sind Wirtschaftsdünger-, 5 % bioabfallbedingt und 67 % aus dem Anbau nachwachsender Rohstoffe.

In den landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden zurzeit ca. 30 % der flüssigen Wirtschaftsdünger für die Gewinnung von Biogas genutzt (Reinhold, 2007). Der Anbau nachwachsender Rohstoffe beläuft sich auf insgesamt 21.783 ha (Tab. 12). Damit wird ein Netto-Energiegewinn von 1,22 PJ aus Wirtschaftsdünger und 2,00 PJ aus nachwachsenden Rohstoffen erreicht. Die Netto-CO₂-Vermeidung aus der Erzeugung von Biogas beträgt insgesamt 0,167 Mio. t CO₂-Äq. Das entspricht 5,52 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen.

Unter der Annahme einer 50%-igen Nutzung der Wirtschaftsdünger und der Erweiterung der Anbaufläche für Biogas-Rohstoffe auf 30.000 ha, ließe sich der Netto-Energiegewinn auf 6,097 PJ und die Netto-CO₂-Vermeidung auf 0,326 Mio. t CO₂-Äq erhöhen. Das bedeutet eine Reduzierung der landwirtschaftlichen THG-Emissionen um 10,80 %.

Tabelle 12: Netto-CO₂-Vermeidung durch Erzeugung von Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse in Thüringen

	Rohstoff													
	Wirtschaftsdünger			nachwachsende Rohstoffe										
	Rind	Schwein	HTK	Silomais		Getreidekorn		AWS		GPS				
Anbaufläche (ha)				4.458		9.877		959		6.489				
TM-Ertrag (t/ha)				11,2		6,91		7,6		8,0				
Biomasse (t oTS)	81.670	31.641	14.659	47.433		55.760		6.924		49.316				
Biogasausbeute (l/kg oTS)	363 Gü. 450 St.	400 Gü. 450 St.	500	600		700		520		520				
CH ₄ -Gehalt (%)	55	60/ 55	65	52		52		53		53				
Energiemenge Biogas pot. (MWh)	164.200	75.567	47.357	147.103		201.750		18.968		135.100				
	GJ		t CO ₂ -Äq.	GJ		t CO ₂ -Äq.	GJ		t CO ₂ -Äq.	GJ		t CO ₂ -Äq.		
Energiemenge/ CO ₂ -Vermeidung nutzbar ³ η _{el.} 0,38	1.200.180		67.210	614.892		34.434	843.314		49.950	79.286		4.440	564.720	31.624
η _{th.} 30 % v. 0,45	38.761.807		10.187	71.492		5.219	98.050		7.571	9.218		673	65.659	4.793
Prozessenergie ⁴	-10.910.731		-6.721	-61.489		-3.443	-84.331		-4.995	-7.929		-444	-56.472	-3.162
Energieaufwand/ CO ₂ -Emission Anbau/Ernte				-52.648		-6.814	-88.464		-13.587	-12.889		-1.748	-62.528	-7.886
Energiemenge/ CO ₂ -Vermeidung Rückf. Nährstoffe				+20.864		+1.205	32.630		+1.432	+5.509		+317	22.426	+251
N ₂ O-Emission Biogasgülle			-1.908			-743			-316			-199		- 848
Netto-Energie-Gewinn/ Netto-CO ₂ -Vermeidung	GJ		t CO ₂ -Äq.	GJ		t CO ₂ -Äq.	GJ		t CO ₂ -Äq.	GJ		t CO ₂ -Äq.	GJ	t CO ₂ -Äq.
	1.219.705		70.674	593.111		29.857	801.171		37.217	73.196		3.3039	533.805	25.808
im Jahr 2007	Summe WD: 1,22 PJ 70.674 t CO₂-Äq.			Summe Nawaro: 2,001 PJ			Summe Nawaro: 95.921 t CO₂-Äq.							
				kg CO ₂ -Äq./ ha			kg CO ₂ -Äq./ ha			kg CO ₂ -Äq./ ha				
				6.697			3.768			3.169			3.977	
Potenzial	PJ		t CO ₂ -Äq.	PJ				t CO ₂ -Äq.						
	3,341		193.583	2,756 PJ				132.105						
50 % Wirtschaftsdung			30.000 ha Anbaufläche Nawaro											

HTK...Hühnertrockenkot, Gü...Gülle, St...Stallmist

¹ 17,2 GJ/ t TS

² 9,94 kWh/ m³ CH₄

³ bezogen auf CH₄, Strom 11 GJ/MWh_{Strom} und 56 kg CO₂/GJ_{Strom}, 3,6 GJ/MWh_{Wärme} und 73 kg CO₂/GJ_{Wärme}

⁴ 10 % der Stromproduktion

⁵ Rückführung Nährstoffe: 60 % der N-Abfuhr, 100 % der P-, K-Abfuhr, N₂O-Emission Biogasgülle: 40 % NH₃-N-Verluste

Wenig sichere Kenntnisse gibt es bislang über die CH₄-Emissionen aus der Nachgärung im Freien. Um diese Verlustprozesse zu minimieren, schreibt die Novelle des EEG ab 2009 gasdichte Abdeckung der Gärrestbehälter für nach BImSchV genehmigte Neuanlagen vor. Des Weiteren ist unklar, inwieweit der im Gärbehälter entstehende gasförmige N in Form von NH₃ durch die gemeinsame Verbrennung mit CH₄ in die Atmosphäre gelangt.

7.2 Verbrennung

Das Verfahren nutzt den Prozess der vollständigen (offenen) Oxidation der organischen Substanz, bei der Kohlenwasserstoffe unter Verbrauch von Sauerstoff zu CO₂ und H₂O umgesetzt und die bei der Photosynthese gebundene Energie in Form von Wärme freigesetzt wird.

Geeignet sind Pflanzen oder organische Substanz mit einem hohen Trockensubstanzgehalt (i.d.R. > 85 %), wie Getreidekorn, -stroh und schnellwachsende Hölzer.

Im Verfahren der Verbrennung können Heizwärme und durch Kraft-Wärme-Kopplung Strom und Wärme bereitgestellt werden.

In Heizwerken mit direkter Erzeugung von Wärme wird ein energetischer Wirkungsgrad von rund 85 % erreicht. Da Wärme im Vergleich zu anderen Endenergien einen geringeren Nutzwert hat (exergetischer Wirkungsgrad bei 70 °C Nutzungstemperatur: 18 %, Hebecker et al., 2006), wird auch auf Kraft-Wärme-Kopplung in großen Heizkraftwerken (> 5 MW) orientiert. Dabei wird die Energie der pflanzlichen Biomasse auf Zwischenenergieträger übertragen, mit denen über den Antrieb von Turbinen, elektrische Energie erzeugt wird. Die in allen Prozessschritten übrig bleibende Wärme wird in Form von Heizwärme genutzt. Der energetische Wirkungsgrad liegt bei etwa 75 % (35 % Strom, 40 % Wärme) und der exergetische Wirkungsgrad bei 50 %.

Dennoch zeichnen sich Heizwerke dadurch aus, dass die erzeugte Wärme fast vollständig einer Nutzung zugeführt wird, was in anderen Verfahren der energetischen Nutzung von Biomasse nicht immer gewährleistet werden kann (Hering, 2009).

Im Verfahren Verbrennung im Heizwerk kann für 1 t Stroh eine Netto-CO₂-Vermeidung von 1.040 kg CO₂-Äq. und für einen Hektar Getreideganzpflanze von 9.151 kg CO₂-Äq. angenommen werden (Tab. 13). Durch Dampfkraft-Wärme-Kopplung lässt sich das CO₂-Vermeidungspotenzial auf 1.506 kg CO₂-Äq./t Stroh bzw. 13.802 kg CO₂-Äq./ha Getreideganzpflanze erhöhen. Hierbei ist eine 100%ige Nutzung der Wärme durch Einsatz in Industrieanlagen mit einer der Wärmebereitstellung entsprechenden Senke unterstellt.

Tabelle 13: Gewinnung von Energie und CO₂-Vermeidung durch das Verfahren Verbrennung

	Rohstoffe			
	Stroh		Getreideganzpflanze	
Ertrag t TM/ha	1		10	
Energienmenge/ CO ₂ -Vermeidung Biomasse pot. ¹	GJ/ha	kg CO ₂ -Äq./ha	GJ/ha	kg CO ₂ -Äq./ha
	17,2	1720	172	17.200
	GJ/ha	kg CO ₂ -Äq./ha	GJ/ha	kg CO ₂ -Äq./ha
Energienmenge/ CO ₂ -Vermeidung nutzbar				
Verbrennung im Heizwerk $\eta_{th.}$ 0,85 ²	14,6	1.067	146,2	10.673
Verbrennung im HKW ³	$\eta_{th.}$ 0,40	6,9	502	68,8
	$\eta_{el.}$ 0,35	18,4	1.030	183,9
Prozessenergie ⁴	- 0,2	- 13	- 1,8	- 128
Energieaufwand/ CO ₂ -Emission Anbau u. Ernte Ersatz Nährstoffe Stroh ⁵	entfällt - 0,24	entfällt - 14	- 10,32	- 1.394
Energienmenge/ CO ₂ -Vermeidung Reststoffe nutzbar	entfällt	entfällt	entfällt	entfällt
Netto-Energie-Gewinn/ Netto-CO ₂ -Vermeidung		kg CO ₂ -Äq./ha		kg CO ₂ -Äq./ha
Heizwerk $\eta_{el.}$ 0,85		1.040		9.151
HKW $\eta_{el.}$ 0,35, $\eta_{th.}$ 0,40		1.506		13.802

¹ 17,2 GJ/ t TM

² bei 73 kg CO₂-Äq./GJ Wärme

³ Biomasse-HKW mit Dampfkraft-Wärme-Kopplung, bei 11 GJ/ MWh_{elektr.} und 56 kg CO₂/ GJ_{elektr.}, 3,6 GJ/MWh_{therm.} und 73 kg CO₂/GJ_{therm.}

⁴ 1,2 % der thermischen Energie n. Hartmann, TFZ Straubing

⁵ Rückführung der mit Stroh entzogenen Nährstoffe durch Erhöhung Mineraldünger-Zukauf, bei Getreideganzpflanze ist dieser Anteil im Mineraldünger-Zukauf für den Gesamtnährstoffbedarf enthalten

Auch wenn Thüringen in Jena das einzige noch existierende Strohheizwerk Deutschlands besitzt, ist festzustellen, dass sich die energetische Nutzung von Stroh für die Wärme- und Stromproduktion noch nicht in Deutschland etabliert hat, anders als in Dänemark. Ein wesentlicher Grund ist, dass die Staub- und Kohlenmonoxidgrenzwerte nach 1. BImSchV (Kleinf Feuerungsanlagenverordnung) nicht sicher eingehalten werden können. Bei genehmigungspflichtigen Anlagen nach 4. BImSchV mit den Grenzwerten der TA Luft (FWL > 100 kW), kommen weitere Anforderungen dazu. Das betrifft vor allem HCl und Stickoxide. Auch das Thema Hochtemperaturkorrosion wird im Zusammenhang mit Strohheizkraftwerken diskutiert. Des Weiteren bleibt abzuwarten, ob andere für den Brennstoff Holz etablierte Verfahren (wie z.B. ORC) an einen Einsatz mit Stroh adaptiert werden können (Oberberger et al., 2001, Peisker et al., 2007).

Zurzeit wird Wärme in Deutschland vorrangig über Holz erzeugt.

Das Strohheizwerk in Jena hat einen jährlichen Strohbedarf von 1.500 t. Daraus errechnet sich ein Netto-Energie-Gewinn von 0,021 PJ und eine Netto-CO₂-Vermeidung von 0,0016 Mio. t CO₂-Äq.

Unter der Maßgabe einer ausgeglichenen Humusbilanz, beläuft sich das energetisch nutzbare Strohaufkommen in Thüringen auf ca. 1,2 Mio. t Trockenmasse. Unter der Annahme, dass davon 30 %, resp. 1 t TM/ha einer energetischen Nutzung im Heizwerk zugeführt werden, würde sich ein Netto-Energiegewinn von 5,1 PJ ergeben. Das entspricht einer Netto-CO₂-Vermeidung von 0,376 Mio. t CO₂-Äq. (Tab. 14).

Tabelle 14: Potenzial der Netto-CO₂-Vermeidung durch Erzeugung von Strom und Wärme aus landwirtschaftlicher Biomasse durch Verbrennung in Thüringen

	Rohstoff	
	Stroh	
energetisch nutzbares Strohaufkommen t TM ¹ bei etwa 3,44 t/ha	1.204.000 * 30 % = 361.200	
Energie menge/ CO ₂ -Vermeidung Biomasse pot.	GJ	t CO ₂ -Äq.
	6.212.640	621.264
	GJ	t CO ₂ -Äq./ha
Energie menge/ CO ₂ -Vermeidung nutzbar		
Verbrennung im Heizwerk $\eta_{th.}$ 0,85	5.280.744	385.494
Verbrennung im HKW $\eta_{th.}$ 0,40 $\eta_{el.}$ 0,35	2.485.056	181.409
	6.644.073	372.068
Prozessenergie ²	-63.369	-4.626
Energieaufwand/ CO ₂ -Emission Anbau u. Ernte Ersatz Nährstoffe Stroh	entfällt	entfällt
	-87.844	-5.077
Energie menge/ CO ₂ -Vermeidung Reststoffe nutzbar	entfällt	entfällt
Netto-Energie-Gewinn/ Netto-CO ₂ -Vermeidung		t CO ₂ -Äq./ha
Heizwerk $\eta_{el.}$ 0,85		375.791
HKW $\eta_{el.}$ 0,35, $\eta_{th.}$ 0,40		543.774

¹ Vetter & Warsitzka, 2006

² 1,2 % der thermischen Energie n. Hartmann, TFZ Straubing

Bei Verbrennung im Heizkraftwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung und Absicherung einer 100%igen Nutzung wie im Heizwerk, könnten 9,0 PJ in Form von Strom und Wärme bereitgestellt werden. Dadurch wäre eine CO₂-Vermeidung in Höhe von 0,54 Mio. t CO₂-Äq. möglich. Das sind knapp 18,0 % der landwirtschaftlichen Treibhausgas-Emissionen in Thüringen.

7.3 Erzeugung von Biodiesel

Pflanzenöl wird physikalisch-chemisch aus Ölsaaten gewonnen. In der dezentralen Kaltpressung wird die gereinigte Ölsaate, bei Temperaturen von max. 40 °C, durch mechanischen Druck ausgepresst und werden Schwebstoffe durch Sedimentation herausgefilitert. Übrig bleibt der Presskuchen mit einem Restölgehalt von 10 %, nutzbar als Tierfutter. Der energetische Wirkungsgrad, bezogen auf den Energie-Input aus Biomasse plus Prozessenergie liegt bei rund 45 %, ohne Prozessenergie sind es 48 %. Großtechnisch wird das Öl durch Hexanextraktion bei Temperaturen bis 80 °C herausgelöst. Zurück bleibt das Extraktionsschrot mit geringem Ölgehalt, ebenfalls verwendbar als Tierfutter. Die Lösemittel werden durch Verdampfen vom Öl getrennt, unerwünschte Begleitstoffe durch Raffination entfernt. Aufgrund der höheren Ölausbeute ist der Wirkungsgrad mit etwa 57 % höher als bei Kaltpressung.

Durch Umesterung des Pflanzenöls mit 10 % Methanol, das aus fossilen Energieträgern synthetisiert werden muss, wird Pflanzenölmethylester, Biodiesel, hergestellt. Biodiesel ist problemlos in allen Dieselmotoren einsetzbar. Das zusätzlich entstehende Glycerin wird in der Pharma- und Lebensmittelindustrie sowie der Ölchemie genutzt.

Geeignete Pflanzen sind Raps und Sonnenblumen. Raps wird bevorzugt, aufgrund der geringeren produktionstechnischen Aufwendungen, wenngleich die Ölausbeute bei Sonnenblumen höher ist.

Tabelle 15: Gewinnung von Energie und CO₂-Vermeidung durch das Verfahren Pflanzenöl und Biodiesel

	Rohstoff Winterraps	
Ertrag t TM/ha	3,8	
Energiemenge/ CO ₂ -Vermeidung Biomasse pot. ¹	GJ/ha	kg CO ₂ -Äq./ha
	103,4	8.786
Energiemenge/ CO ₂ -Vermeidung nutzbar		
Pressen kleintechnisch Ausbeute 0,48 ²	49,6	4.217
Pressen/Extraktion großtechnisch Ausbeute 0,57 ²	58,9	5.008
Prozessenergie Pressen/Extraktion ³	- 7,2	- 1.238
Prozessenergie Umesterung	- 9,8	- 302
Energieaufwand/ CO ₂ -Emission Anbau u. Ernte	- 11,31	- 1.520
Energiemenge/ CO ₂ -Vermeidung Reststoffe nutzbar		
Futter Presskuchen Ausbeute 0,52 ⁵	+ 53,75	+ 848 ⁶
Netto-Energie-Gewinn/ Netto-CO ₂ -Vermeidung	GJ/ha	kg CO ₂ -Äq./ha
Pflanzenöl, kleintechnisch + Futternutzung Presskuchen	84,81	2.307
Biodiesel, kleintechnisch + Futternutzung Presskuchen	75,00	2.005

¹ 27,2 GJ/t TM

² bezogen auf Biomasse-Energie, Substitution von Diesel mit 85 kg CO₂/GJ_{Rohöl}

³ 7 % der Biomasse-Energie in Form von Strom, 11 GJ/MWh_{Strom} * 56 kg CO₂/GJ

⁴ bezogen auf Biomasse-E, E-Gewinnung durch Vergasen und Endbereitstellung von Strom

$\eta_{el.}$ 0,40 und Wärme $\eta_{el.}$ 0,40 durch Dampf-Kraft-Prozess im HKW, bei 56 kg CO₂/GJ_{Strom}, 11 GJ/kWh_{Strom}, 73 kg CO₂/GJ_{Wärme} und 3,6 GJ/kWh_{Wärme}, Beispiel Presskuchen: $(103,4 * 0,18 * 0,4) + (103,4 * 0,18 * 0,4) = 14,88$ GJ/ha, $(103,4 * 0,18 * 0,4 * 73) + (((103,4 * 0,18 * 0,4) / 3,6) * 11 * 56) = 543,5 + 1273,9 = 1817,4$

⁵ bezogen auf Biomasse-Energie, bei 85 kg CO₂/GJ_{Biomasse}

⁶ Einsparung von THG-Emission für Herstellung von 53,77 GJ Brotweizen: $(53,77 \text{ GJ} / 17,2 \text{ GJ/t TM}) / 0,86 = 3,64$ t/ha Getreide/ 7 t/ha Brotweizen = ~ 52 % der THG-E für 1 ha Brotweizen = 1.630 kg CO₂-Äq./2 = 846 kg CO₂-Äq.

Je Hektar Raps entsteht bei Kaltpressung und Umesterung zu RME, ein Netto-Energie-Gewinn von 21,29 GJ. Der Betrag des Netto-Energie-Gewinns erhöht sich durch Nutzung des Rapskuchens in der Tierernährung auf 75,04 GJ/ha. Die Netto-CO₂-Vermeidung beläuft sich beim Verfahren Kaltpressung + Umesterung auf nur 1.157 kg CO₂-Äq./ha, mit tierischer Nutzung des Presskuchens werden es aber 2.005 kg CO₂-Äq./ha (Tab. 15).

Im Jahr 2007 wurden in Thüringen insgesamt 122.322 ha Raps angebaut, davon etwa 50.000 ha für non-food. Bei einem mittleren Ertrag von 3,5 t TM/ha und einer Ölausbeute von 40 %, ergeben sich daraus 175.000 t Rapssaat aus der im Jahr 2007 70.000 t Öl kleintechnisch durch Kaltpressung gewonnen wurden. Der Rapskuchen wird zu 100 % als Futter eingesetzt (Graf, 2008).

Durch die Gewinnung von Biodiesel aus Raps auf 50.000 ha, werden netto 3,45 PJ fossile Energieträger substituiert. In Kombination mit der Futternutzung des Presskuchens, werden 0,092 Mio. t CO₂-Äq. eingespart (Tab. 16), resp. 3,06 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen. Die aus phytosanitären Gründen maximal mögliche Anbaufläche mit Winterraps war im Jahr 2007 bereits ausgeschöpft. Eine Erweiterung dieses Minderungspotenzials ist nicht zu erwarten.

Tabelle 16: Potenzial der Netto-CO₂-Vermeidung durch Erzeugung von Pflanzenöl und Biodiesel aus Raps in Thüringen

			Rohstoff Winterraps	
energetisch nutzbares Rapsaufkommen t TM bei 3,5 t TM/ha und 50.000 ha Anbaufläche			175.000	
Energienmenge/ CO ₂ -Vermeidung Biomasse pot. ¹			GJ	t CO ₂ -Äq.
			4.760.000	
Energienmenge/ CO ₂ -Vermeidung nutzbar				
Pressen kleintechnisch	$\eta_{el.}$ 0,48 ²		2.284.800	194.208
Pressen/Extraktion großtechnisch	$\eta_{el.}$ 0,57 ²			
Prozessenergie Pressen/Extraktion ³			- 333.200	- 57.014
Prozessenergie Umesterung ⁴			- 451.316	- 13.908
Energieaufwand/ CO ₂ -Emission Anbau u. Ernte			- 521.013	- 69.997
Energienmenge/ CO ₂ -Vermeidung Reststoffe nutzbar				
Vergasung Presskuchen	η 0,18 ⁵			
Pressschrot	η 0,16 ⁵			
Futter Presskuchen	η 0,52 ⁶		+ 2.475.200	+ 38.963
Netto-Energie-Gewinn/ Netto-CO ₂ -Vermeidung			GJ	t CO ₂ -Äq.
Biodiesel, kleintechnisch + Futternutzung Presskuchen			+ 3.454.471	+ 92.252

¹ 27,2 GJ/t TM

² bezogen auf Biomasse-Energie, Substitution von Diesel mit 85 kg CO₂/GJ_{Rohöl}

³ 7 % der Biomasse-Energie in Form von Strom, 11 GJ/MWh_{Strom} * 56 kg CO₂/GJ

⁴ lt. Tabelle 16: 9,8 GJ/ 3,8 t TM = 2,58 GJ/t TS * 175.000, 302 kg CO₂-Äq./3,8 t TM = 79,5 * 175.000

⁵ bezogen auf Biomasse-E, E-Gewinnung durch Vergasen und Endbereitstellung von Strom

$\eta_{el.}$ 0,40 und Wärme $\eta_{el.}$ 0,40 durch Dampf-Kraft-Prozess im HKW, bei 56 kg CO₂/GJ_{Strom}, 11 GJ/kWh_{Strom}, 73 kg CO₂/GJ_{Wärme} und 3,6 GJ/kWh_{Wärme}, Beispiel Presskuchen: (103,4 * 0,18 * 0,4) + (103,4*0,18*0,4) = 14,88 GJ/ ha, (103,4 * 0,18 * 0,4*73) + (((103,4*0,18*0,4)/ 3,6)*11*56)= 543,5 + 1273,9 = 1817,4

⁶ bezogen auf Biomasse-Energie, bei 85 kg CO₂/GJ_{Biomasse}

7.4 Erzeugung von Bioethanol

Bioethanol entsteht im Prozess der alkoholischen Gärung. Ethanol wird aus dem Gärsubstrat über mehrere Destillationsschritte aufkonzentriert und absolutiert, bis zu einem Alkoholgehalt von > 99,7%. In dieser Form ist die Mischbarkeit mit Benzin erreicht und es kann eine Zumischung von 5 Vol% Ethanol erfolgen. Ethanol bzw. ETBE ist in Ottomotoren einsetzbar.

Rohstoffe für Ethanol sind zucker-, stärke- und cellulosehaltige Substrate. In Europa kommen dafür Weizen, Roggen, Triticale, Melasse, Zuckerrüben und Stroh infrage (Schmitz, 2005). Bei Verwendung von stärke- oder cellulosehaltigen Stoffen, ist vor der Gärung ein biochemischer Aufschluss notwendig.

Die Vielfalt, an Rohstoffen und die sich daran anknüpfenden Technologien der Produktion, der Lagerung, des Transports, der eigentlichen Energiegewinnung und der Reststoffverarbeitung, führt zu einer großen Schwankungsbreite im Netto-Energie- und CO₂-Gewinn (Schmitz, 2005).

Die Ethanolgewinnung aus zuckerhaltigen Biomassen erreicht einen exergetischen Wirkungsgrad von etwa 55 % (Hebecker et al., 2006). Im Reststoff der alkoholischen Gärung, der Schlempe sind noch 34 % der Eingangsexergie enthalten, bezogen auf die Summe aus Biomasse- und Prozessenergie. Schlempe ist ein eiweißreicher Futterstoff

für die Tierhaltung. Es besteht auch die Möglichkeit einer weiteren energetischen Nutzung durch Erzeugung von Biogas und Bereitstellung von Strom und Wärme.

In der ersten Stufe der Konversion von der Biomasseenergie aus Getreidekorn zu Bioethanol bleiben abzüglich energetischer Aufwendungen für die Produktion und den Gärungsprozess 39,76 GJ/ha für die Substitution fossiler Energieträger übrig (Tab. 17). Das entspricht einer CO₂-Vermeidung von 2.237 kg CO₂-Äq./ha. Durch Nutzung der Schlempe in der Biogasanlage erhöht sich die Energieausbeute. Ein Teil der Wärme kann als Prozessenergie für den Gärungsprozess eingesetzt werden. Der Netto-Energiegewinn erhöht sich auf 66,07 GJ/ha, die Netto-CO₂-Vermeidung auf 3.640 kg CO₂-Äq./ha. Etwas geringer ist die Netto-CO₂-Vermeidung in der Kombination Bioethanol/Schlempefutter mit 2.361 kg CO₂-Äq./ha.

In Bezug auf die produzierte Menge an Bioethanol liegt der Netto-Energiegewinn im Bereich von 17,8 bis 30,6 MJ/l und die Netto-CO₂-Vermeidung von 0,96 bis 1,49 kg CO₂-Äq./l.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt Schmitz, 2005 in einer Literaturstudie. Bei den Energiegewinnen zeigt sich eine erhebliche Spannweite von 4,3 bis 26,4 MJ/l. Die Treibhausgas-Einsparungen liegen im Bereich zwischen 0,5 und 1,5 kg CO₂-Äq./l.

Erhebliche Auswirkungen auf den Netto-Energiegewinn und die Netto-CO₂-Vermeidung hat das Ausgangssubstrat, der für die Konversion eingesetzte Brennstoff und die Nutzung der Reststoffe.

Die größte Bioethanolanlage Deutschlands steht in Zeitz, an der Landesgrenze zu Thüringen. Sie benötigt Rohstoffe von ca. 100.000 ha, die theoretisch zu einem Drittel aus Thüringen geliefert werden können. Für das Jahr 2008 wird aus Thüringen eine Liefermenge von etwa 80 Tt Weizen von ca. 13 Tha angegeben (Warsitzka, 2008). Ohne Berücksichtigung von energetischen Aufwendungen für die Trocknung der DGS-Schlempe ergibt sich für die Verfahrenskombination Bioethanol/ DDGS (Futtermittel) eine Netto-CO₂-Vermeidung von ca. 0,037 Mio. t CO₂-Äq., resp. 1,25 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen. Insgesamt können mit der Herstellung von Bioethanol derzeit 1,0 PJ fossile Energieträger ersetzt werden. Perspektivisch wird eine Erweiterung der Anbaufläche für die Erzeugung von Bioethanol auf bis zu 20 Tha für möglich gehalten. Daraus ergibt sich eine Netto-CO₂-Vermeidung von 0,057 Mio. t CO₂, resp. 1,90 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen.

Tabelle 17: Gewinnung von Energie und CO₂-Vermeidung durch das Verfahren Bioethanol

	Rohstoff Weizenkorn			
Ertrag t TM/ha	6			
Energienmenge/ CO ₂ -Vermeidung Biomasse pot. ¹	GJ/ha		kg CO ₂ -Äq./ha	
	103		10.354	
Energienmenge/ CO ₂ -Vermeidung nutzbar $\eta_{en.} 0,55$ ²	57 (2.449 Liter)		4.157	
Prozessenergie ³ in Form von Heizöl Bioenergie (Biogas)	- 8,28		- 605	
	0		0	
Energieaufwand/CO ₂ -Emission Anbau u. Ernte	- 8,96		- 1.315 ¹³	
Energienmenge/ CO ₂ -Vermeidung Reststoffe nutzbar $\eta 0,34$ ⁵				
Methan $\eta 0,75$ dv. $\eta_{el.} 0,30$ ⁶ $\eta_{th.} 30\%$ von 0,45 ⁶ Prozessenergie für Biogas ⁷ Biogasgülle f. Subst. Dünger ⁸ Rückführung Nährstoffe N ₂ O-Emission Biogasgülle	+ 21,97 (1.997kWh) + 3,24 (899 kWh) - 2,20 + 3,30		+ 1.231 + 230 - 123 + 188 - 123	
Futter ⁹	+ 35,20		+ 556 ¹²	
Schlempe f. Substitution Dünger ¹⁰ Rückführung Nährstoffe N ₂ O-Emission Schlempe	+ 3,79		+ 216 - 93	
Netto-Energie-Gewinn/ Netto-CO ₂ -Vermeidung	GJ/ha	MJ/l	kg CO ₂ -Äq./ha	kg CO ₂ /l
Bioethanol/P _{Heizöl} + Schlempefutter	74,91	30,6	2.794	1,14
Bioethanol/P _{Biogas} + Biogas + Biogasgülle ¹¹	66,02	27,0	3.640	1,49
Bioethanol/P _{Heizöl} + Schlempegedünger	43,05	17,8	2.361	0,96

¹ 17,2 GJ/t TM

² bezogen auf Biomasse-Energie, Substitution von Benzin 43 GJ/t bzw. 73 kg CO₂-Äq./GJ_{Benzin}

³ 8 % der Biomasse-Energie

⁴ 8,2 GJ/3,6= kWh_{Strom} * 11 GJ/kWh_{Strom} * 56 kg CO₂-Äq./GJ_{Strom}

⁵ bezogen auf Biomasse-Energie

⁶ (103*0,34)/17,2 = 2,0 t TS * 0,85 = 1,7 t oTS*700*0,55*9,94 = 6.506 kWh CH₄

6.506*0,3 = 1.952 kWh_{Strom} 6.506*0,45*0,3 = 878 kWh_{Wärme}

1,952 MWh_{Strom} * 11 GJ/kWh_{Strom} * 56 kg CO₂-Äq./GJ_{Strom} = 1.202 kg CO₂-Äq.

0,878 MWh_{Wärme} * 3,6 GJ/kWh_{Wärme} * 71 kg CO₂-Äq./GJ_{Wärme} = 224 kg CO₂-Äq.

⁷ 10 % der Stromproduktion aus Strom

⁸ Rückführung Nährstoffe: 60 % der N-Abfuhr, 100 % der P-, K-Abfuhr,
N₂O-Emission aus 1/2 der 40 % NH₃-N-Verluste durch Ausbringung Biogasgülle

⁹ 100 kg CO₂/GJ Schlempe

¹⁰ Rückführung Nährstoffe: 70 % der N-Abfuhr, 100 % der P-, K-Abfuhr,
N₂O-Emission aus 1/2 der 30 % NH₃-N-Verluste durch Ausbringung Schlempe

¹¹ Prozessenergie aus dem sonst nicht nutzbaren Anteil der Biogaswärme, d.h. ohne 602 kg CO₂-Äq./ha

¹² Einsparung von THG-Emission für Herstellung von 35,02 GJ Brotweizen, s. Tab. 16 ⁶

¹³ lt. Leitlinie für Biogas-Weizen

8 Übersicht über die Minderungspotenziale aus der Landwirtschaft

Durch sparsamen Einsatz von Betriebsmitteln und Steigerung der pflanzlichen und tierischen Leistungen in der landwirtschaftlichen Produktion, ließe sich der landwirtschaftliche Anteil der THG-Emission um rund 10 % reduzieren (Tab. 18).

Durch Gewinnung von Energie aus landwirtschaftlicher Biomasse, wird mit den derzeit entwickelten Verfahren und unter den agrarpolitischen Rahmenbedingungen im Jahr 2008, perspektivisch eine Minderung um 1,02 Mio. t CO₂-Äq. für möglich gehalten. Das entspricht 33,8 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen, wobei hiervon der überwiegende Anteil im außerlandwirtschaftlichen Bereich entsteht. Gegenwärtig können durch Erzeugung von Biogas, Biodiesel und Bioethanol bereits 0,30 Mio. t CO₂-Äq. eingespart werden, resp. 10 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen (Tab. 18).

Tabelle 18: Zusammenfassung der Minderungspotenziale von THG-Emissionen in der Landwirtschaft Thüringens

CO ₂ - Minderungspotenzial	Verfahren					
	Effizienter Betriebs- mitteleinsatz	Gewinnung von Energie aus landwirtschaftlicher Biomasse				
		Biogas/KWK/ Biogas- gülle	Verbrennung/ Heiz- werk bzw. Heizkraft- werk	Biodiesel/ Kraftstoff/ Rapskuchenfutter	Bioethanol/Kraftstoff/ Schlempefutter	Σ
Ist 2007						
Mio t CO ₂ -Äq.	-	0,166	0,0015	0,09225	0,037	
% der landw. THG in Thüringen	-	5,5	0,05	3,06	1,25	9,9
Anbau-/ Nutzungsumfang	-	30% der fl. WD ¹ , 22 Tha Nawaro		50 Tha W.-Raps	13 Tha Nawaro	
perspektivisch						
Mio t CO ₂ -Äq.	0,3	0,326	0,54	0,092	0,057	
% der landw. THG in Thüringen	9,8	10,8	18,0	3,06	1,90	33,8
Anbau- / Nutzungsumfang	-	50% der WD ¹ , 30 Tha Nawaro	30 % d. energetisch nutzbaren Strohaufk. ²	50 Tha W.-Raps	20 Tha Nawaro	

¹ WD...Wirtschaftsdünger, ohne Beachtung der Tierbestände unter 100 GV

² energetisch nutzbares Strohaufkommen unter Berücksichtigung ausgeglichener Humusbilanz 1,2 Mio. t TM, davon 30 %. Das sind etwa 1 t TM Stroh/ha

In die Kalkulation sind energetische Aufwendungen für Transporte und Logistik außerhalb des landwirtschaftlichen Unternehmens und für die Herstellung des Eiweißfutters aus Schlempe im Verfahren der Bioethanolherstellung nicht enthalten. Des Weiteren sind bisher noch nicht ausreichend quantifizierbare Emissionen der Abgase im Verfahren der Verbrennung und Biogaserzeugung (NO_x) sowie der Biogasgülle während der Lagerung (CH_4) im Verfahren der Biogaserzeugung, unberücksichtigt geblieben. Das berechnete THG-Minderungspotenzial kann deshalb niedriger ausfallen als hier ausgewiesen.

Die Netto- CO_2 -Vermeidung je Hektar liegt beim Verfahren der Verbrennung der Getreideganzpflanze, aufgrund des hohen energetischen Wirkungsgrades, am höchsten (Tab. 19). Zu beachten ist allerdings die Humuszehrung durch Abfuhr der Getreideganzpflanze. Bei energetischer Nutzung von 30 % des Strohaufkommens im Verfahren Verbrennung, besteht diese Gefahr nicht.

Dem folgt das Verfahren Biogas aus Silomais. Der Gunsteffekt der Netto- CO_2 -Vermeidung durch Rückführung der Nährstoffe wird zu einem großen Teil durch die N_2O -Emissionen aus den NH_3 -N-Verlusten der Biogasgülle aufgehoben.

Tabelle 19: Zusammenfassung der Minderungspotenziale der Verfahren der Energiegewinnung aus pflanzlicher Biomasse in $\text{kg CO}_2\text{-Äq./ha}$

	Verfahren der Energiegewinnung			
	Biogas Silomais/KWK/Biogasgülle	Verbrennung Getreideganzpflanze/Heizwerk	Biodiesel Raps/Kraftstoff/Rapskuchenfutter	Bioethanol Getreidekorn/Kraftstoff/Biogas/Biogasgülle
CO ₂ -Bindung pflanzliche Biomasse	17.900	17.200	9.302	10.320
Netto-CO ₂ -Vermeidung				
Bioenergieträger Endenergie	6.409	9.151	1.082	2.238
Netto-CO ₂ -Vermeidung Reststoff				
Bioenergieträger				1.306
Futter			800	
Dünger	59			62
Netto-CO₂-Vermeidung Summe	6.468	9.151	1.882	3.606
Humus kg C/ha Zufuhr	+ 500 B-G	0	+570	+ ... B-G + 530 Str
kg C/ha Abfuhr	- 680	-340	-340	- 340
C-Saldo	- 180	-340	+230	+ > 190

WD... Wirtschaftsdünger, ohne Beachtung der Tierbestände unter 100 GV
B-G... Biogasgülle, Str... Stroh

Deutlich geringer ist die Netto- CO_2 -Vermeidung aus der Gewinnung von Biodiesel aus Raps und Bioethanol aus Getreidekorn. Die Verwertung der Reststoffe als Futter oder Bioenergieträger erhöht den Beitrag zur Netto- CO_2 -Vermeidung deutlich. In der Summe bleiben diese beiden Verfahren aber unter dem Wert der Netto- CO_2 -Vermeidung von Biogas aus Silomais und Verbrennung.

Der Energiegewinn und die CO_2 -Vermeidung je ha landwirtschaftlicher Nutzfläche sind nicht allein ausschlaggebend. Es geht auch um die Bereitstellung von Gebrauchsenergieträgern für verschiedene Anwendungen in fester, gasförmiger und flüssiger Form.

Silomais bringt in das Energiegewinnungs-Verfahren eine hohe C-Menge ein. Die damit einhergehende Humuszehrung wird durch Rückführung der Biogasgülle nicht vollständig kompensiert, wobei die Abschätzung der Humusreproduktionsleistung von Biogasgülle derzeit noch unsicher ist. Im Verfahren Bioethanol aus Getreidekorn ist die C-Abfuhr für die energetische Nutzung deutlich geringer, dafür kommt es nicht zur Humuszehrung. Eine hohe Energieausbeute je Hektar darf die Reproduktion der organischen Substanz im Boden nicht gefährden. In den Verfahren Biodiesel und Bioethanol leisten die Nebenprodukte einen wichtigen Beitrag für die Tierernährung.

9 Schlussfolgerungen

9.1 Ist-Zustand

- Die Landwirtschaft hatte 2003 in Thüringen einen Anteil von 15,8 % an den Treibhausgas- (THG) Emissionen, davon zu gleichen Teilen über CO₂ (Kohlendioxid), CH₄ (Methan) und N₂O (Lachgas).
- Landwirtschaft ist nicht nur Quelle, sondern auch Senke von Treibhausgasen, indem sie das Potenzial grüner Pflanzen nutzt, Sonnenenergie in chemische Energie umzuwandeln und damit CO₂ in höhermolekulare organische Substanzen einzubauen. In der Thüringer Landwirtschaft wird mehr CO₂ in tierischen und pflanzlichen Produkten gebunden als an Treibhausgasen emittiert.

9.2 Minderungspotenziale in der landwirtschaftlichen Primärproduktion

- Minderungspotenziale landwirtschaftlicher Primärproduktion bestehen in einer geringen THG-Emission je Einheit Produkt und einer größtmöglichen Ausnutzung des knappen Faktors Fläche für die Bindung von Energie in pflanzlicher Biomasse für die Substitution fossiler Energieträger soweit es die Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln und der Schutz ökologischer Güter zulassen.
- Eine geringe THG-Emission je Einheit Produkt wird durch einen effizienten Einsatz von Produktionsmitteln erreicht. Das schließt den sparsamen Einsatz von Betriebsmitteln und die größtmögliche Ausnutzung des Ertragspotenzials des Standortes und Leistungspotenzials des Tieres ein.
- Etwa 45 % der THG-Emissionen kommen aus der N-Düngung. Durch Senkung des N-Überschuss-Saldos in Thüringen um 20 kg/ha ließen sich 3,6 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen reduzieren. Einsparungen im Strom- und Dieserverbrauch um je 10 % können zu einer Minderung um 1,4 % beitragen.
- Insgesamt ließen sich durch effizienten Einsatz von Produktionsmitteln rund 10 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen reduzieren.
- Extensivierung durch Reduzierung des Mineral-N-Aufwandes deutlich unter das betriebswirtschaftliche Optimum, stellt kein Minderungspotenzial dar. Der Ertragabfall ist i.d.R. größer als die Einsparung an Treibhausgasen und die THG-Emission je Einheit Produkt steigt. Wenn es jedoch gelingt, ein hohes Ertragsniveau mit erheblich geringerem Input an Mineral-N zu erzielen, kann dies die THG-Emission je Einheit Produkt mindern.
- In der Bindung von CO₂ in Humus wird kein anrechenbares Minderungspotenzial gesehen. Wenngleich es zu einer nachhaltigen Landbewirtschaftung gehört, einen optimalen Humusgehalt im Boden aufrechtzuerhalten, durch vollständigen Ersatz des bewirtschaftungsbedingten Humusverlustes mit organischer Substanz. Mais-Monokultur mit Güllewirtschaft entspricht diesen Vorgaben z. B. nicht.
- Die landwirtschaftlichen Produkte und Verfahren weisen unterschiedlich hohe spezifische THG-Emissionen auf. Entscheidend ist, dass alle Möglichkeiten einer Minimierung innerhalb des Verfahrens gesucht werden durch effizienten Einsatz der Produktionsmittel, insbesondere von Stickstoff. Ob ein Verfahren, ein Produkt oder eine Betriebsform aufgrund seiner höheren, unvermeidbaren, spezifischen THG-Emission eine geringere Wertung erfährt, kann erst nach Prüfung aller weiteren Umwelt-, sozialen und ökonomischen Wirkungen abwägend vorgenommen werden. Zum Beispiel ist die THG-Emission je GJ Milch und Fleisch vom Rind deutlich höher als die je GJ Fleisch vom Schwein. Dafür ist das Rind in der Lage, die Energie rohfaserreicher

Futterstoffe in den Grünlandregionen zu verwerten und ermöglicht auch dort dem Landwirt, sein Einkommen zu erwirtschaften.

9.3 Minderungspotenziale durch Gewinnung von Energie aus landwirtschaftlicher Biomasse

- Ein beträchtliches Minderungspotenzial besteht in der Gewinnung von Energie aus landwirtschaftlicher Biomasse.
- Unter dem Primat der Nahrungsmittelerzeugung wird perspektivisch durch energetische Nutzung von 50 % des Wirtschaftsdüngers, 30 % des verfügbaren Strohaufkommens und pflanzlicher Biomasse von 100 Tha (rd. 17 % der LN) eine THG-Minderung um 1,02 Mio. t CO₂-Äq. für möglich gehalten. Das entspricht 34 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen, wenngleich dieser Anteil zum größeren Teil im außerlandwirtschaftlichen Bereich realisiert wird.
- Derzeit werden in Thüringen etwa 30 % der Wirtschaftsdünger und pflanzliche Biomasse von 83 Tha (rd. 13 % der LN) in den Verfahren Biogas, Biodiesel und Bioethanol energetisch verwertet und damit rund 0,30 Mio. t CO₂-Äq. vermieden, resp. rund 10 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen.
- Der landwirtschaftliche Anteil an der Gewinnung von Energie umfasst im Wesentlichen die Bereitstellung von Biogas und bemisst sich derzeit auf 5,5 % der landwirtschaftlichen THG-Emissionen. Perspektivisch ließe sich dieser Anteil auf 10,8 % erhöhen.
- Durch die thermische Nutzung von Biomasse und die Erzeugung von Biogas werden höhere THG-Minderungen je Flächeneinheit erreicht als bei Herstellung von Biodiesel und Bioethanol. Dafür leisten letztere mit den anfallenden Nebenprodukten einen wesentlichen Beitrag für die Tierernährung.
- Die Berechnungen der THG-Minderung durch Energiegewinnung aus landwirtschaftlicher Biomasse beruhen auf den Anbauflächen und Tonnagen im Jahr 2008. Aufgrund Änderungen in den agrar- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen und Preisentwicklungen am Markt, werden sich diese Angaben ändern und eine Neuberechnung der Minderungspotenziale erfordern.

9.4 Fortsetzung der Arbeiten

- Weiterentwicklung des Indikators Treibhausgas-Emissionen insbesondere durch Aufnahme des Humusumsatzes und Prüfung der standort- und viehbesatzabhängigen Toleranzbereiche durch Anwendung im Betrieb.
- Benennen der THG-Emissionen landwirtschaftlicher Betriebsformen, Verfahren und Produkte sowie Bewertung im Zusammenhang mit den naturräumlichen Bedingungen der Bewirtschaftung und den gesellschaftspolitischen Anforderungen an die Landwirtschaft (Umweltverträglichkeit, Kulturlandschaftserhalt, Schaffung von Arbeitsplätzen und Sicherung von Einkommen im ländlichen Raum etc.) sowie Ausweisen von Zielkonflikten mit nachhaltiger Entwicklung
- Vergleich von Verfahren der Bewertung von THG-Emissionen aus der Landwirtschaft (insbes. die Unterschiede der Bezugsebene) und Darstellung der jeweiligen Grenzen der Anwendung.
- Weiterentwicklung der Methode zur Bewertung der Verfahren der Energiegewinnung aus landwirtschaftlicher Biomasse durch Aufnahme neuer Erkenntnisse zu THG-Emissionen während und nach den Energiegewinnungsprozessen.

- Praktische Messungen der Lachgasemissionen in der pflanzlichen Produktion unter Berücksichtigung des gesamten Stickstoffkreislaufs und der N-Umsetzung.
- Erfassung diffuser Methanemissionen an landwirtschaftlichen Biogasanlagen und Aufzeigen des evtl. gegebenen Minderungspotenzials.
- Tatsächliche Erfassung des Aufkommens klimarelevanter Gase (vornehmlich CO₂) in Agroforstsystemen und deren Bewertung hinsichtlich der Klimawirksamkeit des Anbausystems.

Literatur

Dämmgen, U., M. Lüttich, H. Döhler, B. Eurich-Menden, B. Osterburg, 2008: Nationaler Inventarbericht 2008 für 2006 – Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft (unveröff.)

Hülsbergen, K.-J., 2008: Energiebilanzen und klimarelevante Emissionen ökologischer und konventioneller Anbausysteme. Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammer e.V. (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD) am 22. und 23.4.2008 in Würzburg. S. 65-85

Eckert, H., G. Breitschuh, A. Vetter, 2006: Klimaschutz in der Landwirtschaft – Erfassung und Bewertung von Treibhausgasemissionen und deren Minderungspotenziale. Abschlussbericht. Hrsg. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 27 S.

Eckert, H., T. Breitschuh, U. Gernand, 2006: Umwelttestbetriebsnetz Thüringen. 3. und 4. Auswertejahr (2003/04). Auftraggeber Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt. 65 S.

Flachowski, Gerhard, 2007: Hysterie um die Methanbombe Milchkuh. In: Novo 88. Mai-Juni 2007. S. 32-33

Graf, Torsten, 2008: Mündliche Mitteilung. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Gräfe, Esther, 2008: Betriebswirtschaftliche Richtwerte Milchproduktion mit Färsenzukauf auf Acker- und Grünlandstandorten. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 17 S.

Gräfe, Esther, 2009: Mündliche Mitteilung

Haber, W., 1995: Das Nachhaltigkeitsprinzip als ökologisches Konzept. In: Fritz, P., J. Huber und H.W. Levi: Nachhaltigkeit in naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Perspektive. S. 17-30.

Hebecker, D., I. Purr und K. Purr, 2006: Konversions-, Speicher- und Versorgungstechnologien für die energetische Biomassenutzung. Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppe „Zukunftsorientierte Nutzung ländlicher Räume - LandInnovatio - “. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Berlin. 60 S.

Hering, Thomas, 2009: Mündliche Mitteilung. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Kuntz, H.G., P. Hirsch und S. Hähnlein, 2004: Beziehung zwischen Dichte und wesentlichen Inhaltsstoffen von Rindergülle. In: Landinfo, Heft 6, S. 28-32

Ihle, et al., 2003 : Analyse des Standes und prognostizierte Entwicklung der Emissionen treibhausgasrelevanter Gase in Thüringen. Institut für Energetik und Umwelt Leipzig. Bericht 2003

Ihle, P., B. Fritsche, K. Lindner, C. Schneider, 2005: Analyse des Standes und prognostizierte Entwicklung der Emissionen treibhausgasrelevanter Gase in Thüringen. Auftraggeber TLUG. Auftragnehmer Institut für Energetik und Umwelt gGmbH Leipzig. 153 S.

NIR, 2007: Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2007.

Obernberger, J., A. Hammerschmid, R. Bini, 2001: Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis des ORC-Prozesses-EU-THERME. In: Tagungsband zur VDI-Tagung „Thermische Nutzung von fester Biomasse“. Salzburg. S. 283-302

Peisker, D., T. Hering, A. Vetter, 2007: Energetische Verwertung von Stroh – Möglichkeiten und Grenzen. Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 7 S.

Peyker, W., J. Degner, G. Reinhold, W. Zorn, K. Gößner und M. Farack, 2007: Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Silomais. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 18 S.

Rahmstorf, S., 2004: Antworten auf Leserzuschriften zu Artikeln in Die Zeit und Bild der Wissenschaft. In: Homepage Stefan Rahmstorf

Reinhold, G., 2005: Masse- und Trockensubstanzbildung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 7 S.

Reinhold, G., 2006: Einfluss der Biogaserzeugung auf Rest-C im Gärrest und die Humusbilanz. Vortrag vor DLG-Ausschuss Ackerbau „Humusreproduktion im Silomaisanbau für Biogasanlagen“ in Frankfurt am 26.6.2007

Schellenhuber, H.J., 2006: Kipp-Punkte im Klimasystem. Interview mit Hans-Joachim Schellenhuber. Germanwatch.

Schmitz, N., 2005: Innovationen bei der Bioethanolerzeugung und ihre Auswirkungen auf Energie- und Treibhausgasbilanzen“. Landwirtschaftsverlag. 208 S.

Schönhusen, U., D. Fiedler, J. Voigt, 2002: Tierproduktion und anthropogener Treibhauseffekt. In: Forschungsreport des Forschungsinstituts für die Biologie landwirtschaftlicher Nutztiere Dummerstorf 2/2002. S. 42-45

VDLUFA, 2004: Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt des VDLUFA. 12 S.

Warsitzka, Ch., 2008: Mündliche Mitteilung. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft