

# THG-Emissionen im Futterbau und in der Milchproduktion

T. REINSCH, C. MALISCH, H. LORENZ, M. BÖLDT, T. PETERS, A. POYDA UND F. TAUBE

Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung / Abteilung Grünland und  
Futterbau/Ökologischer Landbau, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel

treinsch@gfo.uni-kiel.de

## Einleitung und Problemstellung

Die Rinderhaltung trägt weltweit mit 12,5 % zu den anthropogen erzeugten Treibhausgas (THG) -emissionen bei (Gerber et al., 2013). Die landwirtschaftlichen Quellen der wichtigsten THGe CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> sind ihrem Ursprung nach weitestgehend bekannt. CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub>O entstehen durch den Primärenergieverbrauch und bei der Bodennutzung, während die CH<sub>4</sub>-Emissionen zum größten Teil aus dem Energieverlust während der ruminalen Verdauung resultieren.

In Deutschland trägt die Landwirtschaft mit 7,5 % zu den anthropogen bedingten THG-Emissionen bei. Inklusiv der für die Landwirtschaft relevanten Sektoren Landnutzung und Landnutzungsänderung (LULUC) sowie der Emissionen aus Vorleistungen (Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel etc.) beträgt der Beitrag mehr als 13 %. Hiervon trägt die Tierhaltung einen Anteil von 80 %, wovon wiederum ca. 75 % auf die Rinderhaltung zurückzuführen sind (Lesschen et al., 2011). Nach neuesten Erkenntnissen lassen sich die THG-Emissionen durch Systemoptimierungen in der Milch- und Fleischproduktion um 15 bis 20 % reduzieren (<http://www.carbon-dairy.fr/>).

THG-Minderungsmaßnahmen in der Milchproduktion kommen in Schleswig-Holstein (S.-H.) eine übergeordnete Bedeutung zu. Im Ländervergleich weist S.-H. die höchsten Rinderdichten auf, was unabdingbar einen Effekt auf die Nutzungsintensität der landwirtschaftlich genutzten Flächen hat (Taube et al., 2014; Taube et al., 2016; Poyda et al., 2016). Aufgrund des vergleichsweise kleinen Anteils der THG-Emissionen aus der Industrie, trägt in S.-H. die Landwirtschaft mit mehr als 20 % zu den THG-Emissionen bei. Berücksichtigt man die zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Sektor LULUC, erhöht sich dieser Anteil aufgrund der großen Bedeutung landwirtschaftlich genutzter organischer Böden noch einmal deutlich (> 30 %).

Zur Umsetzung der Klimaschutzziele sind daher Minderungsstrategien im Milchsektor erforderlich, welche die gesamte Verfahrenskette mit einbeziehen (Flysiö et al., 2012). In einem ersten Schritt ist eine Potentialabschätzung notwendig. Prioritär sollten Minderungsmaßnahmen verfolgt werden, die kurzfristig hohe Reduktionen erzielen und gleichzeitig in Kongruenz zu anderen Umweltzielen stehen (Taube et al., 2013). Aufgrund des hohen Einflusses der Flächennutzung, spielt die Grundfutterbereitstellung eine Schlüsselrolle. Unterstellt man einen durchschnittlichen Milchviehbetrieb in S.-H. variieren die produktbezogenen Emissionen alleine durch die Standortbedingungen und Grundfutterleistungen um ±400 g CO<sub>2</sub> je kg Milch (Abb. 1). So sind in einem zweiten Schritt regional angepasste Minderungsmaßnahmen in S.-H. zu identifizieren.

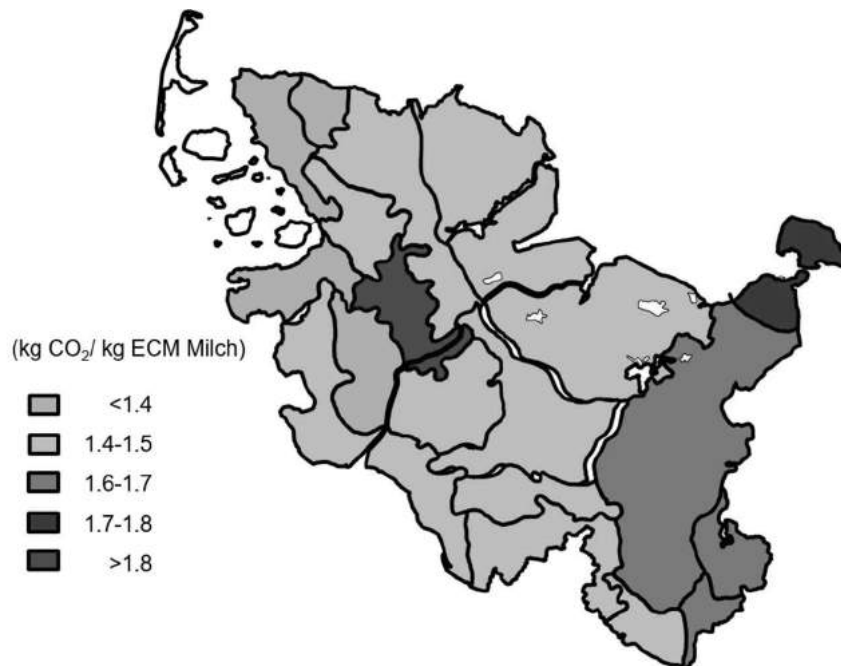


Abb.1: CO<sub>2</sub>-Fußabdruck je kg energiekorrigierter Milch (ECM) und Unterkulturräum in S.-H.. Unterstellt wurde ein durchschnittlicher Stallhaltungsbetrieb mit ~8000 kg ECM je Kuh und Jahr. Unterschiede ergeben sich aus den Standortbedingungen, der Flächennutzung, den Ertragsleistungen (Gras und Mais) sowie aus der N-Effizienz (N-Verfügbarkeit vs. N-Ertragsleistungen im Futterbau).

### *Futterbau*

Die THG-Emissionen während der Grundfuttererzeugung entstehen zum Teil durch den Einsatz von Betriebsmittel (Dünger, Pflanzenschutzmittel, Diesel). Weiterhin stellen innerbetriebliche Stickstoff (N)-verluste die wichtigste Quelle für direkte und indirekte N-Emissionen in Form von N<sub>2</sub>O, Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und N-Auswaschungen dar. In Abhängigkeit der Nutzungsintensität belaufen sich die Emissionen in der Grundfutterproduktion inkl. Ressourceneinsatz auf 1-3 t CO<sub>2</sub>-Äq. ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>, wovon 50-75 % den N<sub>2</sub>O-Emissionen aus Böden zuzuschreiben sind (ohne Boden-C). Die bedarfsangepasste Düngung im Futterbau stellt somit die wichtigste Minderungsmaßnahme dar und steht in direkter Beziehung zum Grundwasserschutz (Abb. 2). Mit zunehmendem N-Aufwand steigen die N<sub>2</sub>O-Emissionen exponentiell an, sobald der Pflanzen-N-Bedarf überschritten wird.

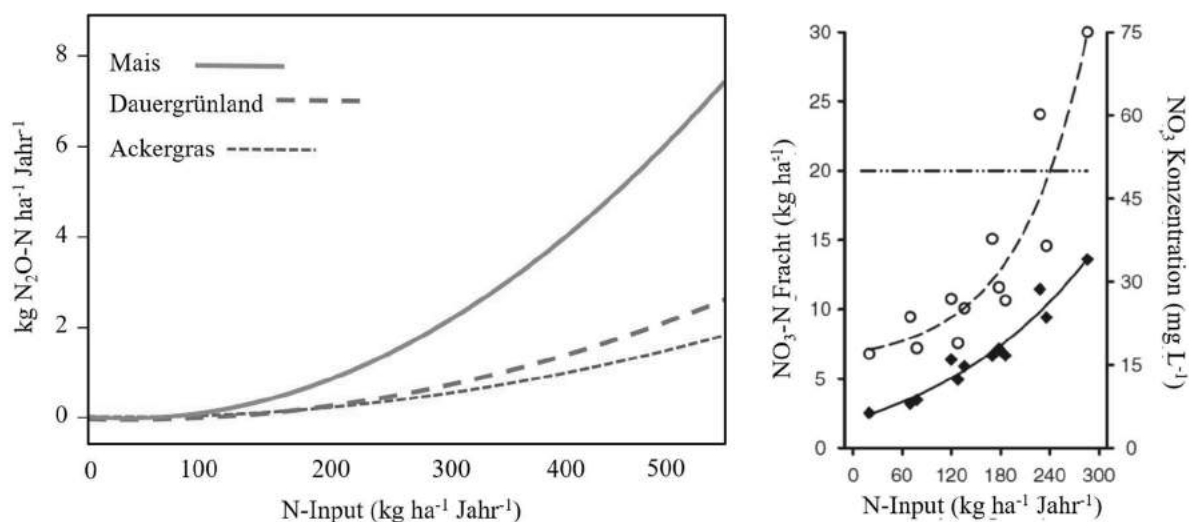


Abb.2: Einfluss der N-Düngungsintensität (N-Input) auf die  $\text{N}_2\text{O}$ -Verluste verschiedener Futterbaukulturen (Abbildung links) und die N-Auswaschung bei Mais mit (durchgängige Linie) und ohne (gestrichelte Linie) Zwischenfruchtanbau (Abbildung rechts) (Reinsch et al., in prep.; Wachendorf et al., 2006).

Diesem Risiko kann durch eine standortangepasste Fruchtfolgegestaltung und einer auf diese Weise verbesserten N-Ausnutzung begegnet werden. Beispielsweise bietet der Einbezug von Zwischenfrüchten im Ackerfutterbau eine gute Möglichkeit Stickstoff über Winter zu konservieren und gleichzeitig die Ziele des Grundwasserschutzes zu erfüllen (vgl. Abbildung 2). Damit verbundene  $\text{N}_2\text{O}$ -Minderungen sind hier allerdings nicht immer gewährleistet, insbesondere, wenn abfrierende Zwischenfrüchte eingesetzt werden (Böldt et al., 2017). Nichtsdestotrotz ergeben sich positive Effekte für den Bodenschutz sowie durch den verbesserten Vorfruchtwert eine mögliche Einsparung an Düngemitteln. Der Berücksichtigung des N-Transfers in der flächenspezifischen N-Düngeplanung kommt somit auch im Klimaschutz eine besondere Bedeutung zu. Dies gilt auch für die Verwendung und Weiterentwicklung von emissionsarmen Lagerungs- und Ausbringungstechniken für Wirtschaftsdünger (<http://balticslurry.eu/>). Durch technische Optimierungen und der damit verbundenen Reduktion von  $\text{NH}_3$ -Emissionen kommt es nach der Wirtschaftsdünger-ausbringung zu einer höheren N-Verfügbarkeit. Als Konsequenz kann es zu höheren  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen aus den genutzten Böden kommen, so dass eine THG-Minderung nur sicher erreicht werden kann, wenn entsprechend Mineraldünger eingespart werden. Die Verwendung von Mineraldüngern belastet die betriebliche THG-Bilanz durch die hohen  $\text{CO}_2$ -Emissionen während der Produktion und die Ausbringungsverluste mit  $11 \text{ kg CO}_2\text{-Äq. je kg N}$  (KTBL, 2017).

Die Nutzung von Klee grasbeständen im Futterbau trägt dazu bei, den betrieblichen Zukauf von N-Düngern und damit die Emissionen aus der Vorkette weiter zu reduzieren. So zeigte ein mehrjähriger Feldversuch (2005-2015) auf einem sandigen Lehm, dass 4-Schnitt genutzte Weißklee grasbestände ohne N-Düngung, bei einer ausreichenden Grundnährstoffversorgung, in Abhängigkeit des Narbenalters stabile Ertragsleistungen von 7-8 t TM je ha und Jahr erzielen können. Im Vergleich dazu erzielten die gleichen Grünlandbestände mit einer zusätzlichen N-Düngung von  $240 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  lediglich einen um 8 % höheren Rohprotein ertrag (Abb. 3).

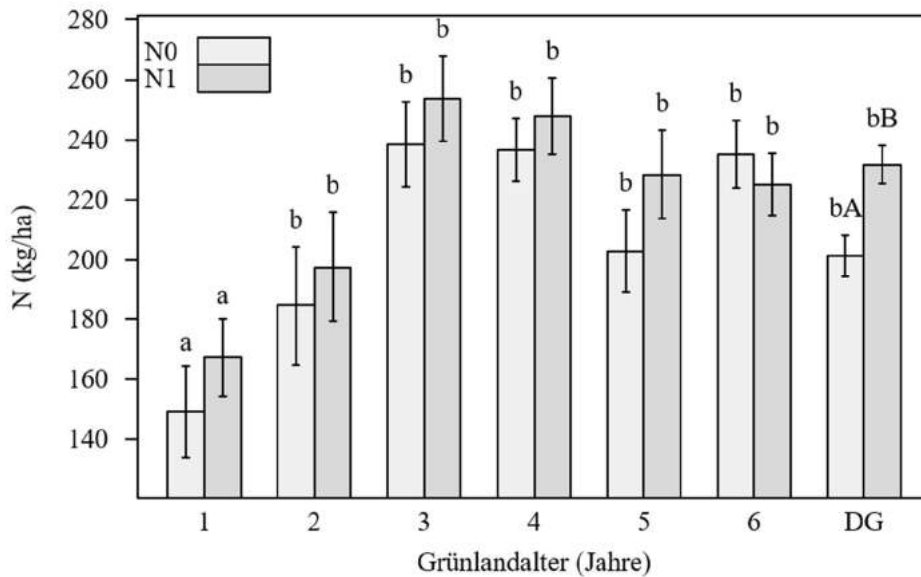


Abb. 3: N-Erträge über 4-Schnitte genutzter Grünlandbestände (Kleegrass); ungedüngt (N0) und gedüngt (N1: 240 kg N ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup> als Rindergülle). Unterschiedliche Großbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Düngestufen. Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Grünlandaltersstufen (1-6) und der > 16-jährigen Kontrolle (DG).

Durch die Etablierung von Leguminosen ergeben sich im Bereich des Klimaschutzes weitere positive Koppelwirkungen. Zum einen sind Futterleguminosen hochverdaulich und zum anderen besitzen viele Arten einen hohen Gehalt an sekundären Pflanzeninhaltsstoffen, insbesondere Tanninen, die in der Diskussion stehen, bei Wiederkäuern die verdauungsbedingten CH<sub>4</sub>-Emissionen zu reduzieren (Abb. 4).

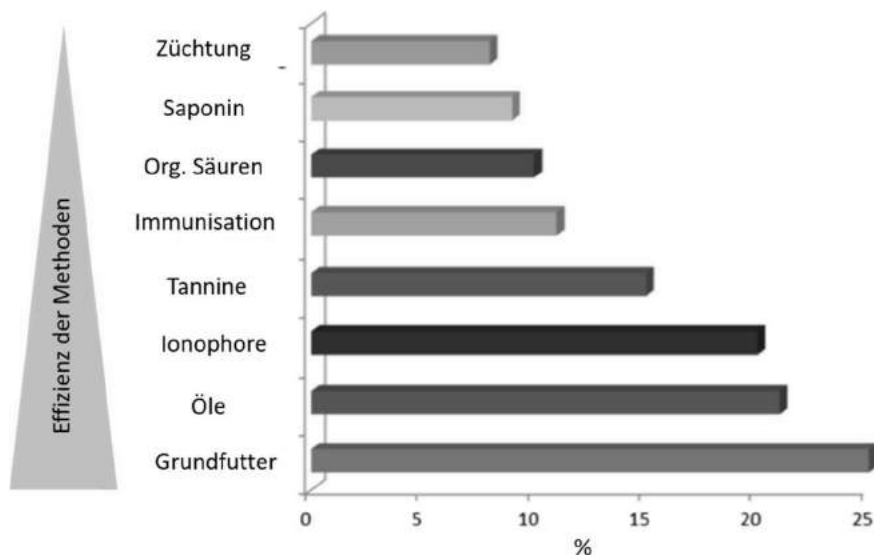


Abb. 4: Potentialabschätzung unterschiedlicher Maßnahmen zur Reduktion der verdauungsbedingten Methanemissionen bei Wiederkäuern (Bhatta, 2015).

Für mehrjährig genutzte Grünlandbestände ist Weißklee die Leguminose mit der größten Nutzungspersistenz, Ertragsleistung und Vertraulichkeit. Allerdings sind hohe Tanningehalte lediglich in der Blüte nachzuweisen, wodurch mengenmäßig nur ein geringer Effekt in der Tierfütterung erzielt werden kann. In Ackerfutterbausystemen ließen sich in den gemäßigten Klimaten Arten mit deutlich höheren Tanningehalten etablieren (z.B.

Esparssette (25-40 mg/g TM), Hornklee (10-25 mg/g TM) oder Sumpfhornklee (50-70 mg/g TM)), deren Ertragsleistungen in Abhängigkeit der Nutzungsfrequenz zwar nur durchschnittlich sind (Hamacher et al., 2016; Lorenz et al., 2017), denen aber ein hohes THG-Minderungspotential zugeschrieben wird, welches es aber noch genauer zu bestimmen gilt (<https://www.era-susan.eu/>). Auf Standorten mit ausreichender Wasserversorgung zeigen Rotkleebestände hohe Ertragsleistungen. Die hohen Gehalte an Polyphenoloxidasen (PPOs) zeigen bei der Milchviehfütterung eine Verschiebung des Urin- zu Kot-Stickstoffs, wodurch es zu einer Reduktion der Ammoniakverluste nach der Exkretion und damit auch zu einer THG-Reduktion kommen kann (Reinsch et al., 2017; Schulz et al., 2018). Zusätzlich ließen sich durch die vergleichsweise hohen Rohproteingehalte von Rotklee eiweißreiche Futtermittelimporte verringern, da energiereiche Kraftfuttermittel regional leichter verfügbar und mit geringeren THG-Emissionen während ihrer Produktion belastet sind (vgl. Tab. 1). Die verstärkte Nutzung von heimischem Protein kann zudem durch eine Diversifizierung der Anbaustrukturen die N-Effizienz der Systeme weiter verbessern (Ledgard, 2001) und somit THG-Emissionen reduzieren.

Tab. 1: Produktbezogene THG-Emissionen verschiedener Erzeugnisse (Biernat, 2016; Williams et al., 2006)

	Weizen	Gerste	Roggen	Mais	Sojabohne	Raps
kg CO <sub>2</sub> -Äq. je kg Produkt	0.41	0.72	0.38	0.65	1.03	1.06

### *Bodennutzung*

In Futterbausystemen sind durch die oftmals hohen Rückführungen von Ernteresten und Wirtschaftsdüngern die Humusbilanzen ausgeglichen. Eine Ausnahme stellt der mehrjährige Maisanbau dar, welcher auch bei hohen Rückführungen von Wirtschaftsdüngern zu einer negativen Humusbilanz führt (Abb. 5). Dauergrünlandflächen können über einen sehr langen Zeitraum effektive CO<sub>2</sub>-Senken darstellen (~400 kg C ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>), allerdings nehmen mit zunehmender Nutzungsintensität die N<sub>2</sub>O-Emissionen zu, so dass bei hohem Betriebsmitteleinsatz die THG-Bilanzen von Grünland ausgeglichen oder sogar positiv sein können (Skiba et al., 2009). Diese Situation wird im Besonderen verschlechtert, wenn regelmäßig Grünlanderneuerungsmaßnahmen durchgeführt werden, da so das Aggregatgefüge der Böden gestört und stabilisierter Kohlenstoff mineralisiert wird (Reinsch et al., 2018). Zudem garantiert eine Grünlanderneuerung in den Folgejahren nicht zwangsläufig stabile Mehrerträge (vgl. Abb. 3), sodass Grünlandpflegemaßnahmen zuerst in Betracht gezogen werden sollten. Sollte eine Erneuerung notwendig sein, ist eine Maßnahme im Frühjahr zu bevorzugen, um die THG-Emissionen und N-Auswaschungsverluste gering zu halten (Reinsch et al., 2018). Bei geeigneten Standortvoraussetzungen sollten Direktsaatverfahren eine stärkere Berücksichtigung erfahren, da hier der Boden-Humus-Vorrat weitestgehend erhalten werden kann (Struck et al., 2017), woraus sich weitere Optimierungseffekte für Wechselgrünlandssysteme ergeben (Hermann et al., 2014). Insgesamt muss dem nachhaltigen Grünlandmanagement eine hohe Bedeutung beigemessen werden, da hier die höchste Effizienz, d.h. die niedrigsten Emissionen je GJ Netto-Energie-Laktation im Vergleich zu anderen Futterpflanzen erzielt werden können (Reinsch et al., 2018; Schmeer et al., 2014).

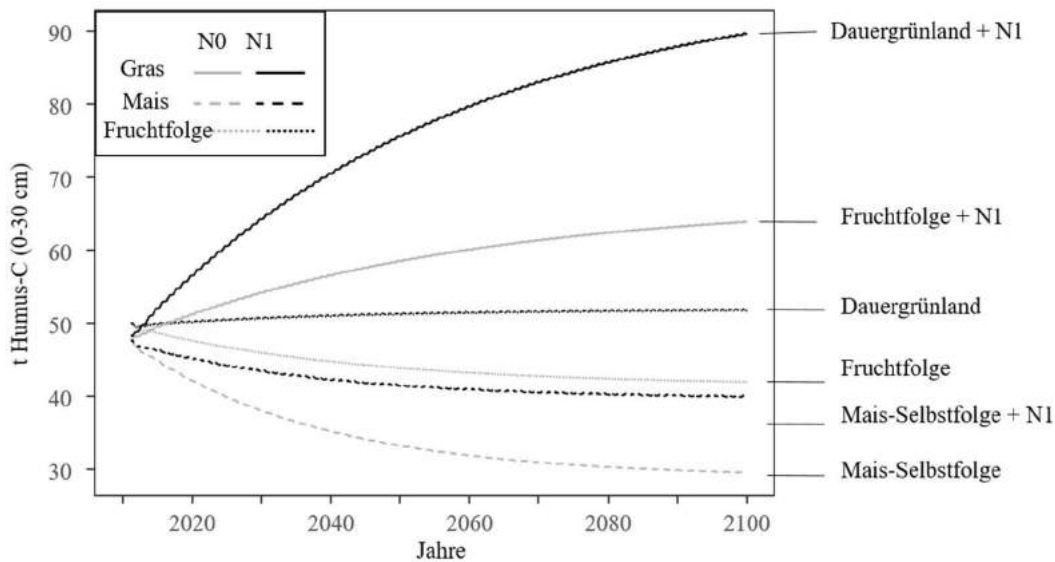


Abb. 5: Langfristige Veränderungen der organischen Bodensubstanz (0-30 cm) in verschiedenen Futterbausystemen mit (N1) und ohne Rindergülle (N0) (Loges et al., 2018).

Den größten Anteil an den landnutzungsbedingten THG-Emissionen in S.-H. haben die Moorböden. Aufgrund der großen Flächenkonkurrenz erstreckt sich die intensive Tierhaltung auf den sandigen und organischen Böden entlang des Geestrückens. Die nicht ackerfähigen Niedermoorböden werden fast ausschließlich für die Grundfuttererzeugung in der Milchviehhaltung genutzt. Zu diesem Zweck wird eine der größten Niedermoorregionen NW-Europas (Eider-Treene-Sorge-Niederung) großflächig entwässert. Kleinräumig unterscheidet sich der Grundwasserstand durch die topographische Lage stark. Optimierte Grundwassermanagement kann die THG-Emissionen aus Niedermoorböden stark reduzieren. Hierbei ist ein Grundwasserstand von 20 cm unter Flur im Jahresmitteln für schnittgenutztes Grünland anzustreben. Durch eine solche Maßnahme könnte die fortschreitende Mineralisierung des Torfkörpers und damit die CO<sub>2</sub>-Freisetzung nicht gestoppt, aber die THG-Emissionen um ~35 % je ha reduziert werden. Größte THG-Minderungen (~80 %) sind durch gezielte Renaturierungsprogramme, jedoch auf Kosten der Grundfutterproduktion, möglich (Abbildung 6).

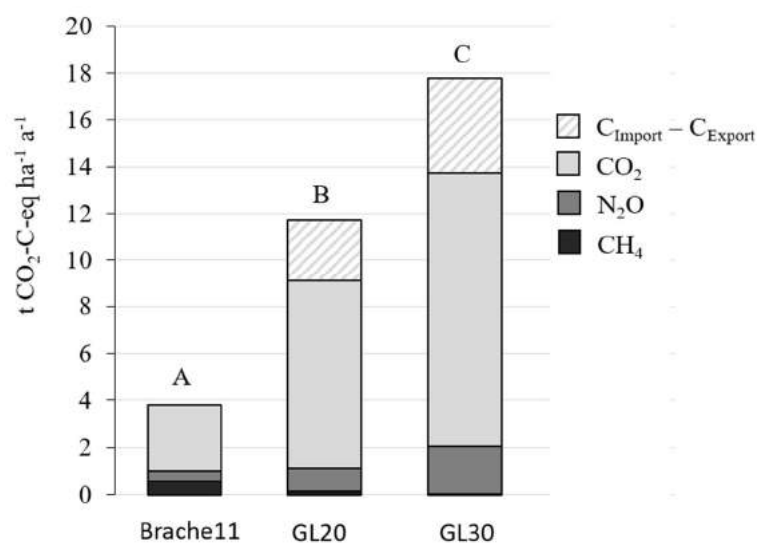


Abb. 6: Ermittelte THG-Emissionen aus Niedermoorböden in S.-H. in Abhängigkeit von Nutzung und Grundwasserflurabstand (GW); Brache11: ungenutzt, -11 cm GW; GL20: Grünland mit 2-3 Schnittnutzung, -20 cm GW; GL30: Grünland mit 3-4 Schnittnutzung, -30 cm GW (Poyda et al., 2016).

## Produktionssystem

Die Effizienzbewertung von Milchproduktionssystemen erfolgt für den Klimaschutz oft im Sinne einer Ökobilanz, d.h. die erzeugten THG-Emissionen werden als Carbon Footprint (CF) einer Produkteinheit ausgedrückt. In der Literatur findet sich eine große Spannbreite der erzeugten CO<sub>2</sub>-Äq. je kg Milch in Abhängigkeit der Standortbedingungen und des Managements (Ø1,13 CO<sub>2</sub>-Äq. je kg ECM; n=100). Seit den 60er Jahren waren in NW-Europa deutliche Effizienzsteigerungen durch eine Zunahme der Einzeltierleistungen zu verzeichnen (Capper et al., 2009). Dieser Trend stagniert bei abnehmender Bedeutung der Energiebereitstellung für den Erhaltungsbedarf ab einer Milchleistung von 5000 kg Milch Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup> (Gerber et al., 2011), sodass Standortbedingungen und das Betriebsmanagement zunehmend an Bedeutung gewinnen. Gruppiert man die vorhandenen Literaturwerte in drei typische Betriebsausrichtungen (vgl. Tab. 2), so sind im Mittel keine signifikanten Unterschiede zwischen den Systemen festzustellen.

Tab. 2: Betriebstypen in der spezialisierten Milchproduktion weltweit und deren Carbon Footprint (CF). Daten aus n=87 Einzelwerten (Lorenz et al, 2019).

Typ	System	Definition	Milchleistung (kg ECM (eigentlich FPCM))	CF (kg CO <sub>2</sub> -Äq. kg <sup>-1</sup> ECM)
A	Stallhaltung	kein Weidegang	9.184	1,11
B	Stall u. Weide	< 50 % der TM-Aufnahme von der Weide oder > 25 % Kraftfutter	7.392	1,15
C	Weidehaltung	> 50 % der TM-Aufnahme von der Weide; < 25 % Kraftfutter	5.404	1,0

Allerdings zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Systemen in Abhängigkeit der Einzeltierleistungsgrenzen (Abb. 7). In allen betrachteten Systemen sind bei einem guten Management hohe Effizienzen möglich, allerdings bei unterschiedlichen Leistungsniveaus (1 kg CO<sub>2</sub>-Äq. je kg ECM  $\triangleq$  5.500 kg ECM (C), 8000 kg ECM (B), 10.000 kg ECM (A)). Für Systemempfehlungen müssen regionale und betriebsinfrastrukturelle Aspekte berücksichtigt werden. Als erster Indikator dienen die Ertragspotentiale aus der Grundfutterleistung, vornehmlich Grünland, in Abhängigkeit des Standortes. In S.-H. gibt es im „Östlichen Hügelland“ auf den sandigen Lehmböden bei einer ausreichenden Wasserversorgung gute Voraussetzungen für hohe Graszuwachsrate, was für Weidesysteme attraktiv sein könnte (Peters et al., 2018). Zusätzlich würde die Diversifizierung der dort überwiegend markfruchtbaulich genutzten Flächen positive Koppeleffekte im Bereich Bodenschutz und Ressourceneffizienz mit sich führen. Bei einer unzureichenden Wasserversorgung sowie bei nicht tragfähigen Böden (Niedermoorflächen) ist die Gefahr der Bodendegradation durch weidende Tiere gegeben. Zudem können die punktuell hohen N-Ausscheidungen auf leichten (geringe Wasserhaltefähigkeit) und organischen Böden (hohes Boden-N-Angebot) zu erhöhten N-Verlusten und damit THG-Emissionen führen.

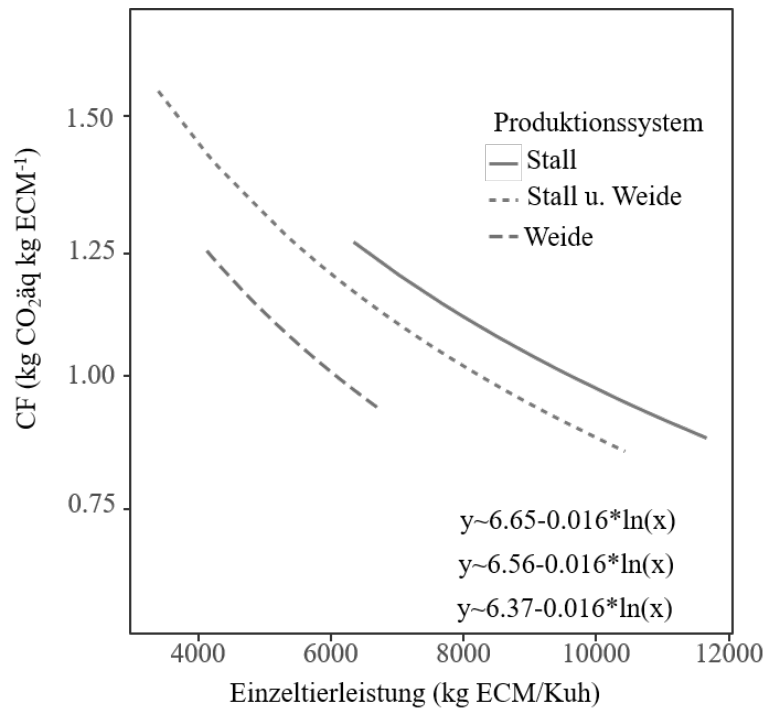


Abb.7: THG-Emissionen je kg ECM in Abhängigkeit des Produktionssystems und der Einzeltierleistung. Ergebnisse basieren auf vorhandenen Literaturergebnissen (Lorenz et al., 2019).

## Zusammenfassung

In Schleswig-Holstein leistet die Landwirtschaft im Allgemeinen, sowie die Milchproduktion im Speziellen, einen großen Beitrag zu den THG-Emissionen. Hier müssen geeignete Minderungsmaßnahmen entwickelt werden, um die gesetzlich vorgeschriebenen Klimaschutzziele zu erreichen (Minderung der nationalen THG-Emissionen um 95 % bis zum Jahr 2050 (Referenzjahr 1990)). Die Verbesserung der betrieblichen Stickstoffnutzungseffizienz im Futterbau sowie die Vermeidung der Ammoniakverluste während der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern sind gut dokumentiert und quantifizierbar. Weiterhin kommt den Leguminosen in der Grünlandwirtschaft eine übergeordnete Bedeutung zu, um Stickstoffdünger weiter einzusparen. Zusätzlich könnten sich durch den Einsatz geeigneter Futterleguminosen positive Koppelwirkungen in Bezug auf die Methanreduktion beim Rind ergeben. Diese Effekte sind allerdings noch nicht ausreichend quantifiziert und somit für die THG-Inventarisierung schwer abzuschätzen. Im Bereich der Bodennutzung kommt der Grünlandpflege eine übergeordnete Rolle zu, da nur so stabile Erträge bei gleichzeitig positiven Umweltwirkungen erzielt werden können. Auf organischen Böden ist eine Grünlandbewirtschaftung bei höheren Grundwasserständen anzustreben. Allerdings sind unter Klimaschutzaspekten hier langfristig großflächige Extensivierungen unvermeidbar. Systemoptimierungen auf Einzelbetriebsebene erfordern regionalisierte Methoden, um die gesamten Wohlfahrtseffekte ausreichend abbilden zu können.

## Literatur

BIERNAT, LARS (2016): Ausgewählte Parameter der Ökoeffizienz im ökologischen und konventionellen Marktfruchtbau Schleswig-Holsteins. 13. WiTa Ökologischer Landbau

BLUWSTEIN J., BRAUN M., BUGGE & HENRIKSEN C. (2015): Sustainable extensification as an alternative model for reducing GHG emissions from agriculture. The case of an extensively managed organic farm in Denmark. *Agroecol. Sust. Food* 39, 551-579. 10.1080/21683565.2015.1013240.



- BÖLDT M, LOGES R, KLUß C & TAUBE F. (2017): Einfluss von Zwischenfrüchten auf Lachgasverluste und Nitratauswaschung im ökologischen Marktfruchtbau in Abhängigkeit von der Vorfrucht. Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, 07. – 10. März 2017. 346-349. ISBN-13: 978-3-89574-925-4
- CAPPER, J. L., CADY, R. A. & BAUMAN, D. E. (2009): The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007, *Journal of Animal Science*, Volume 87, Issue 6, Pages 2160–2167, <https://doi.org/10.2527/jas.2009-1781>
- Davies B., Baulcombe D., Crute I., Dunwell J., Gale M., Jones J., Pretty J., Sutherland W. & Toulmin C. (2009): Reaping the benefits: Science and the sustainable intensification of global agriculture. Royal Society: London.
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., TEMPIO, G. (2013): Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)
- HAMACHER, M., LOGES, R. & TAUBE, F. (2016): Evaluation of fifteen leguminous and non-leguminous forage species to improve forage quality of temporary grasslands in northern Germany. *Grassland Science in Europe* 21. 263-265.
- HERRMANN, A., CLAUS, S., LOGES, R., KLUß, C. & TAUBE, F. (2014): Can arable forage production be intensified sustainably? A case study from northern Germany. *Crop Pasture Sci.* doi: 10.1071/CP13362
- KTBL (2017): Klimaschutz in der Landwirtschaft. Emissionsminderung in der Praxis. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.
- LEDGARD, S.F. (2001): Nitrogen cycling in low input legume-based agriculture, with emphasis on legume/grass pastures. *Plant Soil* 228, 43-59.
- LORENZ, H., LOGES, R., HAMACHER, M., KLUß, C. & TAUBE, F. (2017): The effect of defoliation frequency on the yield of grass clover swards with and without the inclusion of a variety of herbs and birdsfoot trefoil. *Grassland Science in Europe*, 22 – Grassland resources for extensive farming systems in marginal lands p.188-190
- LORENZ, H., REINSCH, T., HESS, S. & TAUBE, F. (2019): Is low-input dairy farming more climate friendly? A meta-analysis of carbon footprints from different production systems. *Journal of Cleaner Production*. 211, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.113>
- PETERS, T., REINSCH, T., LOGES, R., MALISCH, C., KLUß C. & TAUBE F. (2018): 'Smart grazing': modelling grass growth in rotationally grazed pastures. In: Sustainable meat and milk production from grasslands, Proceedings of the 27th General Meeting of the European Grassland Federation, Cork, Ireland, pp. 898-900.
- POYDA, A., REINSCH, T., KLUS, C., LOGES, R. & TAUBE, F. (2016): Greenhouse gas emissions from fen soils used for forage production in northern Germany. *Biogeosciences* 13, 5221-5244.
- SCHMEER, M., LOGES, R., DITTERT, K., SENBAYRAM, M., HORN, R. & TAUBE, F. (2014): LEGUME-based forage production systems reduce nitrous oxide emissions. *Soil and Tillage Research* 143, 17-25.
- SCHULZ, F., WESTREICHER-KRISTEN, E., KNAPPSTEIN, K., MOLKENTIN, J. & SUSENBETH, A. (2018): Replacing maize silage plus soybean meal with red clover silage plus wheat in diets for lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 101, 1216-1226.
- SKIBA, U., DREWER, J., TANG, Y.S., VAN DIJK, N., HELFTER, C., NEMITZ, E., FAMULARI, D., CAPE, J.N., JONES, S.K., TWIGG, M., ET AL. (2009): Biosphere–atmosphere exchange of reactive nitrogen and greenhouse gases at the NitroEurope core flux measurement sites: Measurement strategy and first data sets. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133, 139-149.
- STRUCK, IJ, KLUß, C., REINSCH, T., LOGES, R., HERRMANN, A. & TAUBE, F. (2017): Direktsaat als alternatives Aussaatverfahren im Silomaisanbau: Einfluss auf THG- Emissionen. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbau-wissenschaften*, Band 29, 148-149
- TAUBE, F., GIERUS, M., HERMANN, A., LOGES, R. & SCHÖNBACH, P. (2014): Grassland and globalization – challenges for north-west European grass and forage research. *Grass and Forage Science* 69, 2-16.
- TAUBE, F., HENNING, C., ALBRECHT, E., REINSCH, T. & KLUß, C.: Nährstoffbericht des Landes Schleswig-Holstein 2016. Im Auftrag des Ministeriums für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes S-H
- VAN GRINSVEN, H.J.M., ERISMAN, J.W., DE VRIES, W. AND WESTHOEK H. (2015): Potential of extensification of European agriculture for a more sustainable food system, focusing on nitrogen. *Environ. Res. Lett.* 10, 025002. [10.1088/1748-9326/10/2/025002](https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/2/025002).

WACHENDORF, M., VOLKERS, KC, LOGE,S R., RAVE, G. & TAUBE, F. (2006): Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. IV. Impact of slurry application, mineral N fertilizer and grass understorey on yield and nitrogen surplus of maize for silage. *Grass Forage Sci.* 61(3), 232-242. 10.1111/j.1365-2494.2006.00529.x

WILLIAMS, A.G., AUDSLEY, E. & SANDARS, D.L. (2006): Determining the Environmental Burdens and Resource Use in the Production of Agricultural and Horticultural Commodities. Natural Resource Management Institute, Cranfield University, Silsoe Research Institute, Bedford.