



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 103 | Ausgabe 1

Agrarwissenschaft
Forschung

Praxis

Wege zur Klimaneutralität der Sektoren Landwirtschaft und Bodennutzung (LULUC):

Eine semi-quantitative Potentialanalyse für Norddeutschland am Beispiel des Bundeslandes Schleswig-Holstein

Friedhelm Taube, John Nyameasem, Sandra Koop und Christof Kluß

1 Einordnung von NCC (Natural Climate Contributions)-Strategien entsprechend der Klimaberichterstattung in den Sektoren Landwirtschaft und LULUC

2 Ausgangssituation Schleswig-Holstein

3 Potentiale für NCC durch zusätzliche Kohlenstofffestlegung in landwirtschaftlich genutzten Böden

4 Handlungsfelder der Annäherung an Klimaneutralität für die Sektoren Landwirtschaft und LULUC

Herleitung von Klimaschutzprojektionen für Landwirtschaft und LULUC

Handlungsfeld 1 a: LULUC-Effekte einer Wiedervernässung organischer Böden in SH

Handlungsfeld 1 b: Flächenkompensation für Wiedervernässung durch Aufgabe der ineffizienten NaWaRo-Nutzungen vom Acker

Handlungsfeld 2: Reduktion der Tierhaltung

Handlungsfeld 3: Klima- und nährstoffoptimierte Anbausysteme

5 Diskussion der Projektionen

Gibt es andere Strategien zur Klimaneutralität der Sektoren Landwirtschaft und LULUC?

Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung der Projektionen und Schlussfolgerungen

1 Einordnung von NCC (Natural Climate Contributions)-Strategien entsprechend der Klimaberichterstattung in den Sektoren Landwirtschaft und LULUC

Das globale Agrar- und Ernährungssystem ist für etwa 25 % der anthropogenen THG-Emissionen verantwortlich, wobei der agrarischen Primärproduktion die dominante Rolle zukommt (Vermeulen et al., 2012). In Deutschland werden die THG-Emissionen der Landwirtschaft in der Nationalen Berichterstattung in der Kategorie 3 (CRF Sektor 3) berichtet. Die Berechnungsgrundlagen für die Sektoren haben sich in den letzten Jahren mehrfach erheblich verändert, so dass Zeitreihen unterschiedlicher Publikationsjahre kaum vergleichend bewertet werden können. Während das BMU im Jahr 2021 (zitiert in Grethe et al. (2021)) zum Beispiel für das Jahr 2019 einen Wert der THG-Emissionen des Sektors 3 von 68 Mio. Tonnen angibt, weist die gleiche Quelle UBA (2024) für das Jahr 2019 einen Wert von 57,7 Mio. Tonnen aus und aktuell für das Jahr 2022 einen Wert von 53,3 Mio. Tonnen. Die Reduktionsvorgaben für den Sektor Landwirtschaft wurden jedoch trotz den neuen Berechnungsgrundlagen nicht entsprechend angepasst. Dies hat zur Folge, dass der 2021 auf alten Kalkulationsgrundlagen beruhende Zielwert von 56 Mio. Tonnen für das Zieljahr 2030 nun bereits im Jahr 2022 auf der neuen Kalkulationsbasis ‚erreicht‘ wird (Expertenrat für Klimafragen, 2023). Zudem sind diese Änderungen nicht 1:1 in die Länderberichte z. B. für SH (Schleswig-Holstein) eingeflossen, so dass Unsicherheiten hinsichtlich der Datengrundlagen verbleiben, bzw. die verschiedenen Quellen zum Teil mit verschiedenen Zahlen arbeiten.

Treibhausgas-Emissionen der Landwirtschaft nach Kategorien

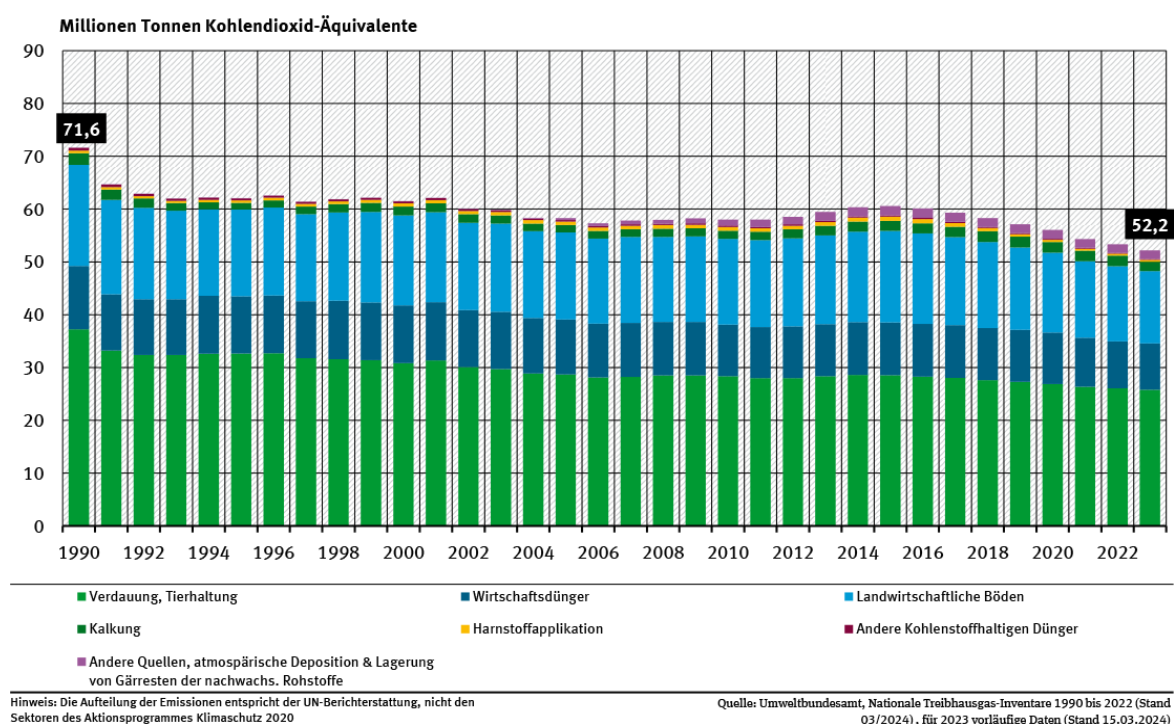
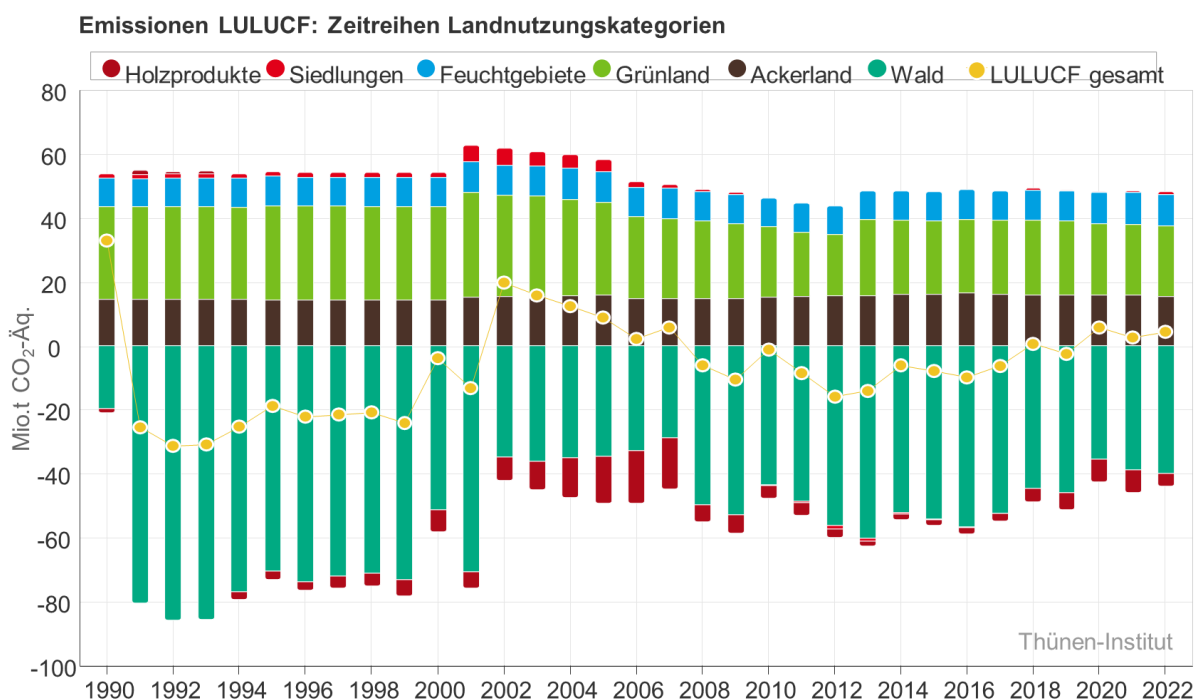


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft nach Kategorien (UBA, 2023)

Ähnliche Unsicherheiten sind auch für den Sektor 4 (LULUCF) gegeben, insbesondere deshalb, weil die jährlichen Abschätzungen für den Bereich der Forstwirtschaft deutlich schwanken (vgl. Abbildung 2), während die LULUC-Effekte für den Bereich der landwirtschaftlichen Bodennutzung (Acker/Grünland) seit 1992 mit einem Niveau von etwa 36 Mio. Tonnen nahezu unverändert sind. Bedingt durch die deutliche Abnahme der CO₂-Senkenfunktion in der Forstwirtschaft insbesondere innerhalb der letzten Jahre hat sich der gesamte LULUCF-Sektor von einer ausgeprägten Senke mit einem Niveau von etwa minus 30 Mio. Tonnen im Jahr 1992 seit wenigen Jahren zu einer zusätzlichen Quelle von etwa 4,38 Mio. Tonnen (2022) entwickelt (Gensior et al. 2023).

Unser Ansatz, Potentiale auf Basis von Literaturwerten mittels Projektionen der Reduktion von THG-Emissionen im Sinne von NCC für diese beiden Sektoren im Bundesland SH bis 2040 fortzuschreiben, ist somit vor dem Hintergrund der geschilderten Unsicherheiten in der Datenstruktur zu würdigen.



Zeitreihen der Treibhausgasemissionen (Summe aus CO₂, CH₄ und N₂O in [Mio. CO₂-Äquivalenten]) im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Landnutzungskategorien (Werte 1990 – 2022 aus NID 2024); positiv: Quelle; negativ: Senke

Abbildung 2: Zeitreihe der Emissionen aus LULUCF in Deutschland (Gensior et al., 2023)

Grundsätzlich sind NCC Projektionen für die Sektoren 3 und 4 (Landwirtschaft und LULUCF) nicht ohne die Berücksichtigung der notwendigen Umsteuerung der Ernährungsmuster der Menschen in Deutschland hin zu einem deutlich reduzierten Konsum von Lebensmitteln tierischer Herkunft (Kozicka et al., 2023; Grethe et al., 2021; van Zanten et al., 2023; DGE, 2024) zu diskutieren und zwar zumindest in dem Ausmaß, wie von der DGE bis 2024 empfohlen (die aktuell von der DGE publizierten Empfehlungen (DGE, 2024), den reduzierten Konsum von Nahrungsmitteln tierischer Herkunft betreffend, gehen

weit über die bisherigen hinaus). Dies wiederum hat gleichermaßen Auswirkungen auf den Sektor Landwirtschaft (Reduktion CO₂, Methan und Lachgas) und auf den Sektor LULUC (ohne Forst), da erhebliche Futterflächenbedarfe wegfallen und zugunsten der pflanzlichen Ernährung bzw. Bioökonomie genutzt werden können. Da ein erheblicher Anteil der wegfallenden Futterflächen – insbesondere für die Erzeugung von Milch und Rindfleisch – auf entwässerte Moore entfällt, die kaum ackerbaulich genutzt werden können, ergibt dies Freiräume für die notwendige Wiedervernässung der organischen Böden (Grethe et al., 2021). Grethe et al. (2021) beschreiben eine Projektion bis 2045, die eine Reduktion der THG-Emissionen um 50 % aus den Sektoren 3 und 4 vorsieht; ausgehend vom Jahr 2020 kann damit eine Minderung von 100 auf etwa 50 Mio. Tonnen CO₂eq erzielt werden. Dies wäre über umfangreiche Wiedervernässungen der organischen Böden (-30 Mio. Tonnen CO₂eq), eine durchschnittliche Halbierung des Konsums von Lebensmitteln tierischer Herkunft (-14 Mio. Tonnen CO₂eq) und eine Erhöhung der Stickstoffeffizienz bzw. Reduzierung der N-Düngermengen (-7 Mio. Tonnen CO₂eq) zu erreichen. Die Herleitung von NCC-Strategien im Sinne des Klimaschutzes für den Bereich Landwirtschaft und Ernährung bedeutet auch, neben der Anpassung der Konsummuster tierische Lebensmittel betreffend, weitere ‚Nebenbedingungen‘ zu erfüllen, die durch europäisches Umweltrecht fixiert sind, bisher aber nicht zielführend umgesetzt werden (EU-Wasserrahmenrichtlinie; EU-Nitratririchtlinie; EU-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie; EU-NERC-Richtlinie) – und schließlich ist die Einbettung von NCC in die europäischen Vorgaben im Rahmen der EU-*Farm to Fork*-Strategie (European Commission, 2020) und der nationalen Vorgaben der Biodiversitätsstrategie (BMU, 2007) zu gewährleisten. Mit der Verabschiedung des "Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework" (GBF), dem neuen globalen Rahmen des Übereinkommens über die biologische Vielfalt (CBD), liegen zudem seit Dezember 2022 neue globale Ziele zum Schutz der biologischen Vielfalt bis 2030 vor. Die Dringlichkeit eines solchen komplexen Lösungsansatzes ist jüngst durch Rockström et al. (2023) unterstrichen worden. Wie ein derartiges NCC-Konzept für den Bereich der landwirtschaftlichen Bodennutzung übersetzt auf das Bundesland SH mit Potentialen einer zusätzlichen Speicherung von Treibhausgasen in Form von organischem Kohlenstoff (C_{org}) ohne wesentliche Reduktion an verfügbaren Agrarrohstoffen für die Nahrungsmittelerzeugung und ohne die Einschränkung primär lokaler Schutzziele (Wasserschutz, Schutz der biologischen Vielfalt) verknüpft werden kann, ist Gegenstand der weiteren Ausführungen. Dieser Ansatz geht damit über ausschließlich auf ‚Klimaeffizienz‘ ausgerichtete Ansätze (vgl. Searchinger et al., 2018) hinaus.

2 Ausgangssituation Schleswig-Holstein

In Abhängigkeit des Industrialisierungsgrades der verschiedenen Bundesländer einerseits und der Intensität der landwirtschaftlichen Produktion andererseits gibt es regionale Unterschiede in Deutschland dahingehend, dass SH mit einem hohen Anteil an landwirtschaftlicher Fläche an der Gesamtfläche

(Tabelle 1) bei hoher Produktionsintensität und gleichzeitig vergleichsweise geringer Bedeutung des industriellen Sektors eine Größenordnung von über 20 % der THG-Emissionen für den Bereich Landwirtschaft ausweist. Wird die Quellgruppe LULUCF miteinbezogen, sind die Sektoren Landwirtschaft und LULUCF sogar für eine Größenordnung von über 40 % (IKEM und GMC 2021, MELUND 2022) verantwortlich, vgl. Tabelle 2.

Tabelle 1: Kennzahlen der Landnutzung in SH und Deutschland (DE) im Jahr 2020

	SH	DE
	(Tsd. ha)	
Landwirtschaftliche Nutzfläche (LF)	990	16.700
Ackerfläche	656 (66 %)	12.870 (72 %)
Grünlandfläche	321	4.750
Grünland + Acker auf org. Böden*	152	
Ackerfläche auf org. Böden*	41	
Grünlandfläche auf org. Böden*	111	
LF ohne org. Böden	838 (-15 %)	
Silomais	187	1.600
Silomais auf Moor	41 (22 %)	
GV-Besatz/ha	0,97	0,74
Milcherzeugung (Tsd. t)	3.097	32.155
THG-Emissionen (kg CO₂eq/kg ECM)	1,3	1,3

*Datengrundlage je nach Quelle stark variierend, hier sind Daten vom Thünen-Institut wiedergegeben – diese weichen von Daten aus SH (InVeKoS) erheblich nach oben ab

Während in östlichen Bundesländern, wie Mecklenburg-Vorpommern (MV) mit ähnlicher Bedeutung der Landwirtschaft wie in SH, die THG-Reduktionen seit 1990 (minus 29 %) für den Sektor 3 bedingt durch eine erhebliche Abstockung der Tierbestände direkt nach der Wiedervereinigung massiv ausgeprägt waren, hat diese Abstockung in den westlichen Bundesländern wie SH nicht in diesem Umfang stattgefunden - entsprechend sind die Reduktionswerte deutlich geringer (minus 17 %).

Tabelle 2: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Schleswig-Holstein (in Mio. t CO₂eq) (MELUND 2023, 2024)

	1990	2000	2010	2020	2030 ¹⁾
Energiewirtschaft	7,0	6,3	7,3	4,6	1,8
Industrie	6,2	5,8	4,2	3,8	2,5
Gebäude	7,2	6,1	5,2	4,9	2,9
Verkehr	6,2	6,4	5,2	5,3	2,8
Abfallwirtschaft	1,2	0,6	0,2	0,1	0,1
Landwirtschaft	6,2	5,5	5,3	5,2	4,3
ohne Energie	5,4	5,0	4,9	4,7	
Energie	0,7	0,5	0,4	0,4	
Insgesamt	33,9	30,7	27,4	23,9	14,4
LULUCF	5,1	4,6	4,5	4,6	
Wald	-0,2	-0,6	-0,5	-0,4	
LULUC (ohne Wald)	5,3	5,2	5,0	5,0	
Ackerland	1,6	1,6	2,3	1,7	
Grünland	3,3	3,3	2,4	3,0	
Feuchtgebiete	0,3	0,3	0,3	0,3	
Siedlungen	0,1	0,1	0,0	0,0	
THG inkl. LULUCF	39,0	35,3	31,9	28,5	

¹⁾ Ziel

Im Detail stellen sich die Emissionen des Sektors Landwirtschaft in SH entsprechend der Tabelle 3 dar.

Tabelle 3: Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft in Schleswig-Holstein (in Mio. t CO₂eq) (MELUND 2022, 2024)

	1990	2000	2010	2020
CH₄	3,6	3,3	3,1	3,0
Verdauung	2,9	2,6	2,5	2,3
Wirtschaftsdüngermanagement	0,7	0,6	0,5	0,5
Lagerung u. Vergärung von Pfl.	0,0	0,0	0,1	0,1
N₂O	1,7	1,5	1,7	1,5
Wirtschaftsdüngermanagement	0,2	0,2	0,2	0,2
Böden	1,5	1,4	1,4	1,3
CO₂	0,2	0,2	0,2	0,2
Düngung und Kalkung	0,2	0,2	0,2	0,2
Gesamt CO₂eq	5,4	5,0	4,9	4,7

Auch der Anteil der entwässerten organischen Böden an der landwirtschaftlichen Fläche (LF) und die damit verbundenen THG-Emissionen für den LULUC-Sektor sind in SH bedeutender ausgeprägt als im Durchschnitt Deutschlands (Tabelle 4). Damit ergeben sich umgekehrt höchste Reduktionspotentiale im LULUC-Sektor mit der Wiedervernässung der organischen Böden.

Tabelle 4: THG-Emissionen aus organischen Böden (in Mio. t CO₂eq)

		1990	2000	2010	2020
mineralische Böden	Ackerland	0,1	0,1	0,3	0,2
	Grünland	0,0	0,0	-0,1	-0,3
organische Böden	Ackerland	1,5	1,5	2,1	1,4
	Grünland	3,2	3,2	2,7	3,2
Biomasse	Ackerland	0,0	0,0	0,0	0,0
	Grünland	0,1	0,1	-0,2	0,1
Summe	Ackerland	1,6	1,6	2,3	1,7
	Grünland	3,3	3,3	2,4	3,0

nach MELUND (2023)

3 Potentiale für NCC durch zusätzliche Kohlenstofffestlegung in landwirtschaftlich genutzten Böden

NCC im engeren Sinne der zusätzlichen Festlegung von C_{org} in Böden adressiert für den Bereich der landwirtschaftlichen Bodennutzung im ersten Schritt zunächst die Potentiale, die durch die Photosynthese CO₂ aus der Atmosphäre entziehen und in Form von organischem Kohlenstoff (C_{org}) in Böden speichern oder freisetzen. In den letzten Jahren weist eine Vielzahl von Übersichtsarbeiten diese grundsätzlichen Möglichkeiten mit ihren quantitativen Effekten aus (vgl. Don et al., 2018). Das Prinzip dieses Ansatzes beruht darauf, dass dem Boden durch eine veränderte landwirtschaftliche Bodennutzung mehr C_{org} zugeführt wird, der idealerweise in Form von Ton-Humus-Komplexen akkumuliert wird (Schmidt et al., 2011), als durch auto- und heterotrophe Respiration entweicht. Dies impliziert, dass in Abhängigkeit der Abbaurate des zugeführten Materials im Boden stets eine erhebliche Zufuhr an C_{org} gewährleistet sein muss, um dieses Gleichgewicht zu erhalten oder besser im Sinne der Akkumulation zum Positiven zu verändern.

Der anthropogen verursachte Klimawandel wirkt sich diesbezüglich für Mitteleuropa zunehmend negativ aus, weil mit der Erhöhung der Temperaturen insbesondere im Winterhalbjahr eine erhöhte biologische Aktivität einhergeht und damit auch respiratorische Prozesse zunehmen, die darauf hindeuten, dass die Bodenkohlenstoffvorräte in Ackerböden tendenziell sinken dürften (EEA, 2022) und Länder wie Deutschland in Verbindung mit intensiver Landwirtschaft kaum Potentiale im Sinne des 4 Promille-Ziels ausweisen (Rodrigues et al., 2021) .

Maßnahmen zur Steigerung der C_{org} -Mengen in landwirtschaftlichen Böden lassen sich wie folgt nach ihren mengenmäßigen Potentialen aufzählen: Für Mitteleuropa sind die organische Düngung (insbesondere Stallmist) und die Umwandlung von Acker in Grünland als langfristig vielversprechende Lösungen ausgewiesen, die zusätzliche Speicherpotentiale beispielsweise bei Neuanlage von Grünland bis zu einem neuen dynamischen Gleichgewicht in der Größenordnung von plus 15-20 Tonnen C_{org} /ha in

Norddeutschland zulassen (Reinsch et al., 2018, Struck et al., 2020, Rios et al., 2022; Bai und Contrufu, 2022). Beide Maßnahmen sind jedoch auf absehbare Zeit mit der Tierhaltung verknüpft, d.h. eine alleinige Fokussierung auf diese Maßnahmen würde im Gegensatz stehen zu einer aus Klimaschutzgründen angestrebten Stärkung einer pflanzenbasierten Ernährung (WBAE, 2020) und einer damit verbundenen Reduktion der Tierhaltung und Futtererzeugung. Daneben weist der kontinuierliche Einsatz von Zwischenfrüchten und vor allem der Einsatz von Futtergräsern und Futterleguminosen auf Acker (Ley-Systeme) komplementär zu Silomais zusätzliche C-Festlegungspotentiale auf (Taube et al., 2023; Rios et al., 2022; Guillaume et al., 2023). Für temperierte Klimate Nordwest- und Mitteleuropas sind bei einem Mindestanteil von 30 % von Gras bzw. Klee gras in der Fruchtfolge der Ley-Systeme und mindestens jeweils 2 Hauptnutzungsjahren (Bodenruhe) der Futterbaukultur realistische Größenordnungen von jährlich 0,3 Tonnen C-Sequestrierungsleistung je Hektar über einen Zeitraum von 20 Jahren bis zu einem neuen dynamischen Gleichgewicht dokumentiert, d.h. etwa 6 Tonnen zusätzliche C-Speicherung je Hektar nach 20 Jahren (Menichetti et al., 2015; Poeplau et al., 2015; Johnston et al., 2017; Börjesson et al., 2018). In der internationalen Literatur sind große Bandbreiten diesen Wert betreffend aufgeführt in Abhängigkeit von Boden- und Klimaverhältnissen – die hier genannten 6 Tonnen C_{org}-Zusatzspeicherung nach 20 Jahren erscheinen insbesondere dann als konservativ angesetzt, wenn

(i.) die belegten Effekte der zusätzlichen Unterbodenspeicherung unter Ley-Systemen ebenso berücksichtigt werden (Menichetti et al., 2015), wie

(ii.) eine wahrscheinliche Substitution des Silomais durch Körnermais aufgrund von Zuchtfortschritten in den nächsten 20 Jahren (Taube et al., 2020).

Eine auf sandigen Böden bis zum Jahr 2040 realistische Kombination von perennierendem Futterbau (Klee gras) und Körnermais (Potential für Humanernährung) führt dem Boden erhebliche zusätzliche Kohlenstoffmengen zu, die aus dem ‚Humuszehrer‘ Silomais (Poyda et al., 2021) eine humusneutrale Pflanze Körnermais machen und so diese 6 Tonnen C_{org}/ha als konservativ-realistische Schätzung auch im Klimawandel erscheinen lassen, so wie dies für die Kombination aus mehrjähriger Luzerne in Kombination mit Körnermais in Nordamerika vielfach dokumentiert ist (vgl. Singh et al. 2023). Den Bereich Futterbau für Wiederkäuer betreffend sind somit solche Landnutzungsänderungen relevant, die Kohlenstoff-zehrende Kulturen wie Silomais durch humusmehrnde Kulturen wie Gras/Klee gras und Körnermais substituieren (Loges et al., 2018). Da neben organischem Kohlenstoff auch in unterschiedlich ausgeprägtem Maße weitere Verbindungen (z. B. Stickstoffverbindungen) zugeführt werden und dies häufig zu positiven N-Salden und daraus folgend zu einer Verengung des C/N-Verhältnisses in Böden führt, sind pflanzenart- und intensitätsspezifische Muster zu berücksichtigen (Vogeler et al., 2022). In Summe weisen die verschiedenen Studien dem Humusaufbau auf mineralischen Böden in Deutschland

– jenseits des Einsatzes von 2- bis 3-jährigen Ley-Systemen auf dem Acker – im Mittel maximale Akkumulationen von etwa 50 kg C_{org} -Bindung je ha und Jahr für einen Zeitraum von 10-15 Jahren bis zu einem dann neuen dynamischen Gleichgewicht auf – ausgehend von etwa 70 Tonnen C_{org} /ha unter Acker, somit über lange Zeiträume weit entfernt vom 4 Promille Ziel (Don et al., 2018).

4 Handlungsfelder der Annäherung an Klimaneutralität für die Sektoren Landwirtschaft und LULUC

Herleitung von Klimaschutzprojektionen für Landwirtschaft und LULUC

Vor dem oben geschilderten Hintergrund wird deutlich, dass NCC-Potentiale in einen größeren strukturellen Rahmen eingebunden werden müssen, die die Haupthandlungsfelder in den Kategorien Landwirtschaft und LULUC übergreifend adressieren. Unter dieser Prämisse sind für die Herleitung von Projektionen hinsichtlich einer realistischen politischen Umsetzbarkeit die CO_2 -Vermeidungskosten der Maßnahmen eine maßgebliche Größe. Werden diese CO_2 -Vermeidungskosten hergeleitet aus der Literatur hierarchisch geordnet, so stellt die Wiedervernässung entwässerter organischer Böden die effizienteste Maßnahme dar, gefolgt von der Reduktion der Tierhaltung und mithin der Umstellung von Ernährungsmustern hin zu einer stärker pflanzenbasierten Ernährung (Grethe et al., 2021). Die Interdependenzen zwischen beiden Maßnahmen ergeben sich aus der Tatsache, dass entwässerte organische Böden vornehmlich der Erzeugung von Nahrungsmitteln tierischer Herkunft (ASF) dienen (Milch/Rindfleisch) und eine Wiedervernässung somit regional/national direkt auf die verfügbare Menge an ASF wirkt. Daraus resultiert eine herzuleitende mittelfristig wünschenswerte Produktionsmenge an ASF, die nach einer mehr oder weniger kompletten Wiedervernässung relevant wird. Diese beiden Handlungsfelder sind somit maßgeblich für den Erfolg von NCC. Nachdem diese beiden Maßnahmen in Projektionen stimmig hergeleitet sind, können mit dem ‚fine-tuning‘ über das Anbauverhältnis bestimmter Kulturarten, das Niveau der Stickstoffdüngung, den Einsatz von Zwischenfrüchten und die Optimierung von Anbausystemen auf dem Acker auf der hierarchisch dritten Stufe die letzten großen Bausteine für NCC (wiederum unter Berücksichtigung der Kosten) hinzugefügt werden (vgl. Taube et al., 2023). Im Einzelnen führt dies zu folgendem Ansatz:

Für den Sektor **LULUC** werden in einem Handlungsfeld 1 die THG-Emissionen organischer Böden und die Flächenumnutzung für die Bioenergieerzeugung adressiert und entsprechend werden in einem ersten Schritt (Handlungsfeld 1a) die Effekte der Wiedervernässung der organischen Böden auf die Reduktion der THG-Emissionen und Einschränkungen der herkömmlichen landwirtschaftlichen Produktion analysiert. Hier schließen sich im zweiten Schritt (Handlungsfeld 1b) die mögliche Flächenkompensationen für den Wegfall an agrarischen Nutzflächen für Futter- und Nahrungsmittelerzeugung an.

Als solche werden die bisherigen Flächen zur NaWaRo-Biogaserzeugung (NaWaRo: Nachwachsende Rohstoffe) von Acker und Grünland im Umfang von etwa 60 Tsd. ha im Lande identifiziert, da NaWaRo-Biogaserzeugung von Acker und Grünland im Vergleich zu z. B. Agri-PV nicht mehr konkurrenzfähig in der Flächennutzungseffizienz ist, d. h. es wird so bis 2040 ein Teil der dann wiedervernässten Moorflächen durch die Bereitstellung bisheriger NaWaRo-Flächen für Flächen zur Nahrungs- und Futtermittelerzeugung kompensiert. Grundsätzlich ähnliche Argumentationslinien sind für die NaWaRo-Nutzung von Raps/Getreide in Form von Biodiesel/Ethanol für den Treibstoffsektor herzuleiten (ifeu, 2019) – wir drücken dies später pauschal in einer 15%igen Reduktion des Rapsanbaus aus.

Für die THG-Emissionen des Sektors **Landwirtschaft** sind die Tierhaltung und die mineralische N-Düngung von zentraler Bedeutung. Entsprechend wird in einem zweiten Schritt für den Sektor Landwirtschaft die Anpassung der Erzeugung von Produkten tierischer Herkunft für SH analysiert, bevor später im Handlungsfeld 3 die Reduktion der Emissionen durch verminderte Stickstoffdüngung (Lachgasemissionen) thematisiert werden wird.

Schleswig-Holstein weist mit 0,97 GV/ha neben Niedersachsen und NRW den höchsten GV-Besatz je ha LF auf. Eine Halbierung der Tierbestände auf max. 0,5 GV/ha scheint im Landesdurchschnitt auch deshalb geboten, da der Tierbesatz regional sehr unterschiedlich verteilt ist und mit einer Reduzierung insbesondere die ‚hotspots‘ der Tierhaltung mit mehr als 1,6 GV/ha adressiert werden (vgl. Nährstoffberichte SH, NDS, NRW), weil diese höchste Umweltkosten verursachen. Eine Reduktion der Tierbestände in diesem Umfang stellt sicher, dass die notwendige Mindestausstattung zur Bereitstellung von Ökosystemleistungen der Tierhaltung für den Naturschutz durch bspw. extensive Nutzung von Dauergrünlandbeständen weiterhin gewährleistet werden kann (DAFA, 2015). Sie stellt auch sicher, dass bei entsprechender Reduzierung des inländischen Konsums von Nahrungsmitteln tierischer Herkunft in der Größenordnung von minus 50–75 % (vgl. DGE) weiterhin Nahrungsmittel tierischer Herkunft für den Export bereitstehen. Zu unterscheiden ist aus Gründen der verfügbaren Flächenressourcen insbesondere zwischen den Tierarten/Produkten: So kann z. B. die Milcherzeugung das Dauergrünland als Futterbasis nutzen und damit Flächen, für die (im Gegensatz zu den Ackerflächen zur Erzeugung von Futter für Schwein und Geflügel) derzeit und bis zur angestrebten Zielerreichung im Jahr 2040 kaum eine alternative wirtschaftliche Verwertung besteht. Somit können diese Flächen zur Veredelung von nicht essbarem Protein aus Gras in tierisches Protein für die Humanernährung genutzt werden (Wilkinson and Lee, 2018). Nach 2040 weisen entsprechende Arbeiten zur alternativen Verwertung von Grünlandaufwüchsen im Sinne einer stofflich/energetischen Verwertung darauf hin, dass jenseits der tierischen Veredelung ökonomisch relevante Nutzungsoptionen im Bereich der Bioökonomie entstehen dürften (Grundmann et al., 2022). Entsprechend werden in der Potentialanalyse die Milchkühe um 35 % reduziert, alle weiteren Kategorien der Fleischerzeugung ausgehend vom Basisjahr 2020 um 50 %

(vgl. Grethe et al., 2021). Um die Bedeutung des Graslandes für die Milcherzeugung zu würdigen, wird unterstellt, dass 75 % des Energiebedarfs in der Futterration bis 2040 aus Gras/Klee gras bereitgestellt werden (vgl. Taube et al., 2023). Auf dieser Basis werden die freiwerdenden Flächen für die pflanzliche Nicht-Futter-Erzeugung ebenso kalkuliert, wie die Reduktion der THG-Emissionen aus dem Abbau der Tierhaltung im Sektor Landwirtschaft.

In einem dritten Schritt ‚klima- und nährstoff-optimierte Anbausysteme‘ werden nach den Schritten Wiedervernässung und Abbau der Tierhaltung die Sektoren Landwirtschaft und LULUC zusammengeführt, die Größenordnung der noch notwendigen Emissionsreduktionen bis zur Klimaneutralität des Sektors eingegrenzt und schließlich unter Berücksichtigung der weiteren Zielgrößen Wasserschutz (EU-Nitrat-Richtlinie, -WRRL, -MSRL) und Schutz der Biodiversität (Biodiversitätskonvention) weitere Potentiale zur Zielerreichung quantifiziert (Teil-Substitution der mineralischen Stickstoffdünger durch Leguminosen; Steigerung der Stickstoffnutzungseffizienz; C-Festlegung in Böden; Anpassung Anbausysteme (Fruchtfolgen)).

Die drei Handlungsfelder werden in ihrer Hierarchie in Abbildung 3 grafisch dargestellt.

Jährliche Emissionen in Mio. t CO₂eq

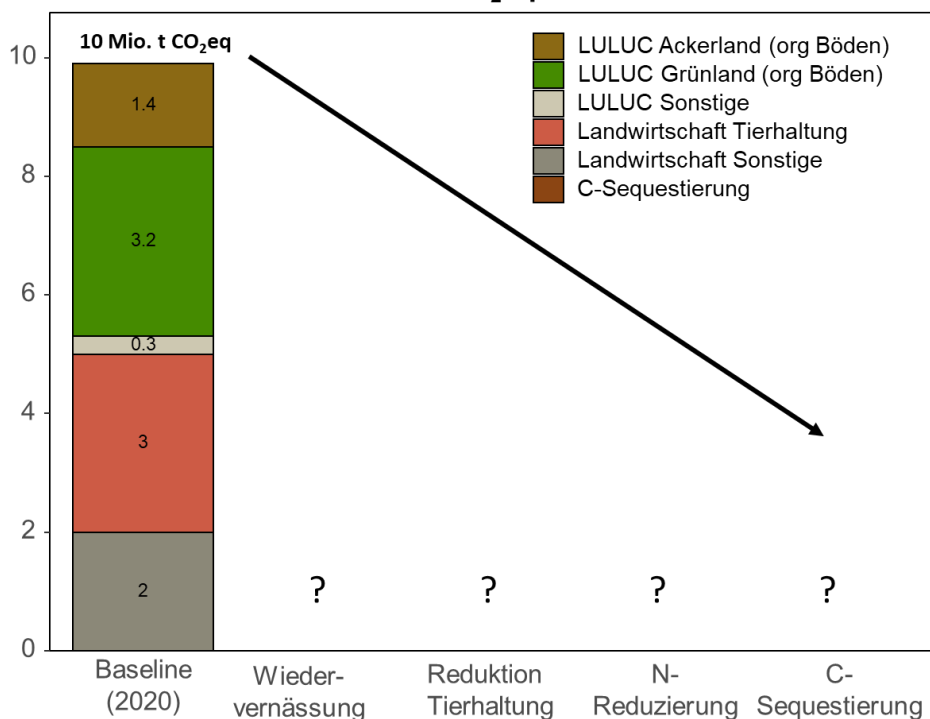


Abbildung 3: Hauptemittenten aus Landwirtschaft und LULUC – hierarchisch hergeleitete Projektionen auf dem Weg in Richtung Klimaneutralität

Handlungsfeld 1 a: LULUC-Effekte einer Wiedervernässung organischer Böden in SH

Die Wiedervernässung der organischen Böden ist die zentrale Maßnahme zur Reduktion der THG-Emissionen aus dem LULUC-Sektor. Ausgehend von den Flächenumfängen und dem Milcherzeugungsvolumen in Tabelle 5 kann geschlussfolgert werden, dass derzeit etwa 20 % des Futterbaus zur Milcherzeugung auf entwässerten organischen Böden erfolgen. Basierend auf der Annahme, dass eine Wiedervernässung bis zum Jahr 2040 linear und vollständig abläuft, kann geschlussfolgert werden, dass die LULUC-Effekte in SH von 4,7 Mio. Tonnen auf 760 Tsd. CO₂eq (Tabelle 5) reduziert werden, wodurch sich ein jährliches Einsparungspotenzial von 3,9 Mio. t CO₂eq ergibt.

Tabelle 5: Veränderung der THG-Emissionen durch Wiedervernässung organischer Böden

Jahr	Flächennutzung	Tsd. ha	t CO ₂ eq/ha	Mio. t CO ₂ eq
2020	Grünland Moor	111	~29	3,2
	Acker auf Moor	41	~35	1,4
	LF auf Moor	152	~32	4,7
2040	G&A wiedervernässt*	152	~5	0,8
	Jährliche Einsparung ab 2040 im Vergleich zu 2020			3,9

Quelle: Tiemeyer et al. 2020; *Poyda et al. 2016

Verlust an Futterflächenkategorien durch Wiedervernässung organischer Böden in SH

Um die Gesamtheit der ‚fehlenden‘ landwirtschaftlichen Flächen in Folge einer Wiedervernässung org. Böden inklusive der anteiligen Wertschöpfung abzuschätzen, ist die Ausgangssituation zu charakterisieren. Die Ist-Situation für den Flächenbedarf für die Kategorie Rind in SH lässt sich entsprechend Tabelle 6 herleiten, dabei wird unterstellt, dass die Ackerfläche auf organischen Böden weitestgehend durch Silomais belegt ist und die landwirtschaftlichen Flächen auf organischen Böden somit durchweg als Futterflächen (abzgl. NaWaRo-Biogas) zu bewerten sind.

Tabelle 6: Effekte einer Wiedervernässung organischer Böden für den Verlust an Futterflächen entsprechend der Tier-bzw. Verwertungsarten in SH (Flächen-, Tierdaten 2020)

Tierarten/-anzahl SH		Bedarf (t TM / Tier)	Grünland (G)	Mais (M)	G+M	Getreide
Tierart	Anz. (Tsd.)	(Grünl. + Mais + Konz)	(in Tsd. Hektar)			
Mutterkühe	40	4,5 (G)	26	0	26	0
Milchkühe	370	7,5 (3,5G+2M+2Gtr)	162	67	229	99
Mastbullen	75	3,3 (0,8G+1,6M+0,9Gtr)	8	11	18	9
Färsen	230	3,5 (2,7G+0,6M+0,2Gtr)	78	13	90	6
SH - Flächenbedarf Summe Rind SH			273	91	363	114
SH - Ist Fläche SH			321	187	508	281
Nicht erklärt: Schafe, Pferde, Biogas, Naturschutz			48	96	145	
Organische Böden			111	41	152	
davon NaWaRo				10		
Wegfall organischer Böden nach Nutzungskategorien in ha nach Wiedervernässung		Milcherzeugung	33	15		20
		Mutterkuhhaltung	26	0		
		Mast	6	17		2
		Färsenaufzucht	39	6		
		NaWaRo Biogas	0	10		
Hektar-Summe org. Böden in der Landwirtschaft			104	48		
Restflächen (Naturschutz etc.)			7			

(Netto-TM-Erträge: Mais (M) 11 t/ha; Grünland (G) intensiv für Milcherzeugung (inkl. Mastbullen und Färsen) 8 t/ha, Grünland ext. für Mutterkuhhaltung 7 t/ha, Getreide (Gtr) 7,5 t/ha)

Statistikamt Nord 2024. Die Viehhaltung in Schleswig-Holstein 2020

Wirtschaftliche Betroffenheit des Sektors bei Verlust der entwässerten organischen Böden für Tierhaltung und Biogaserzeugung

Die Gesamt-Fehl Futterbaufäche bei Wiedervernässung der organischen Böden und ‚business as usual‘-Projektion in der Tierhaltung in SH entspricht ca. 152 Tsd. ha, von denen knapp ein Drittel (48 Tsd. ha) für die wirtschaftlich attraktivste Form der landwirtschaftlichen Bodennutzung (Milcherzeugung) genutzt werden und zwei Drittel der Flächen extensiven Haltungsverfahren mit geringer Bodenrente gewidmet sind, die jedoch potentiell bei Wegfall (vollständige Vernässung) Konfliktpotentiale mit dem Naturschutz (FFH) beinhalten dürften. Etwa 10 Tsd. ha werden für die Biogaserzeugung auf Maisbasis eingesetzt. Werden die aktuellen Bodenrenten der verschiedenen Landnutzungen für die bewirtschafteten organischen Böden akkumuliert, ergibt dies mit Stand 2020 die in Tabelle 7 dargestellten Renten des Sektors (hergeleitet nach Haß et al., 2022; verschiedene Jahrgänge Buchführungsverband und LK S-H).

Tabelle 7. Bodenrenten der Futterbau- und Biogasbetriebe ohne und mit Direktzahlungen der 1. Säule der EU-Agrarpolitik in Höhe von 190 €/ha (Stand 2020)

Produktionsaktivität	Bodenrente (Euro/ha)		Fläche (Tsd. ha)	Bodenrente Summe Mio. Euro	
	ohne Prämien	mit Pr.		ohne Pr.	mit Pr.
Mutterkuhhaltung	Negativ*	170	26	-	4,4
Rindermast/Färsen (Mast)	30*	250	68	2,0	17,0
Milch	300*	600	48	14,4	28,8
Biogas	250*	1000	10	2,5	10,0
Summe				18,9	60,2

*Mehrjährige Daten Buchführungsverband SH/ Landwirtschaftskammer SH

In Summe werden auf diesen 152 Tsd. ha vor Wiedervernässung aktuell Bodenrenten von etwa 60 Mio. € p. a. realisiert, von denen etwa 40 Mio. € auf staatlicher Förderung beruhen, d. h. Nettobodenrenten ohne Förderung liegen in einer Höhe von 20 Mio. € p. a. Dagegen stehen aktuell 4,6 Mio. Tonnen CO₂eq, die in einer ‚business as usual‘ - Projektion mit CO₂-Zertifikatekosten für die Jahre 2025/2030 von 45 bzw. 85 €/Tonne mit dann 207 bzw. knapp 400 Mio. € p. a. als soziale Kosten zu Buche schlagen – Faktor 10-20 zu den aktuellen Bodenrenten. Es ist somit unstrittig, dass die Vermeidung sozialer Kosten durch eine Wiedervernässung der organischen Böden die derzeitigen Bodenrenten der Landnutzer nicht nur mehrfach übersteigt, sondern es ist auch eine vergleichsweise kurzfristig leistbare Kompensation für die Betriebe dahingehend denkbar, dass etwa 74.000 ha theoretisch z. B. zur Freiflächen-PV zur Verfügung stünden, weil das dem Umfang der Flächen entspricht, der nicht einem Schutzstatut (FFH, etc.) unterliegt (Latacz-Lohmann et al., 2023). Bei unterstellten konservativen Bodenrenten von 2.000 €/ha aus Freiflächen-PV auf wiedervernässten organischen Böden würde eine Größenordnung von 10.000 ha ausreichen, um die Nettobodenrenten (ohne Agrarförderung) auszugleichen. Diese kurzfristig zu leistende Kompensation für die Landnutzer ist geboten, um eine breite Akzeptanz der Wiedervernässung zu befördern und ist ebenso geboten, weil alternative Nutzungsoptionen, Stichwort Paludi-Kulturen, noch einen längeren Zeitraum benötigen werden, um ökonomisch tragfähige Prozessketten zu etablieren.

Neben der Reduktion der THG-Emissionen wirkt eine Wiedervernässung der Moore synergistisch in Richtung der Reduktion von Nährstoffeinträgen in Gewässer und je nach Wiedervernässungs- und Nutzungsgrad in Richtung positiver Effekte auf Biodiversitätsparameter. Bezüglich der Belastung der Nordseeküstengewässer mit Nährstoffeinträgen ist die Eider nach wie vor als problematisch einzustufen hinsichtlich hoher Stickstoff- und Phosphatfrachten. Eine Wiedervernässung würde die Situation deutlich entschärfen, da die Stickstoffüberschüsse in dieser Gebietskulisse von überschlägig 150 kg N/ha (Henning und Taube, 2022) auf nahe Null sinken und so die N-Gesamtbelastung in Form von Überschüssen aus entwässerten Mooren um über 20 Tsd. Tonnen Stickstoff sinken würde.

Handlungsfeld 1 b: Flächenkompensation für Wiedervernässung durch Aufgabe der ineffizienten NaWaRo-Nutzungen vom Acker

Die derzeitige Förderung des Energiepflanzenanbaus auf Ackerflächen (Biodiesel, Biogas) in Deutschland ist ökonomisch ineffizient (Isermeyer, 2022). In SH zeigt somit insbesondere die Aufgabe der Biogaserzeugung aus Ackerkulturen (Silomais) weitere Möglichkeiten auf, Freiräume einer alternativen Bodennutzung im Sinne von NCC zu schaffen. Insbesondere mit Blick auf die Landnutzungseffizienz sind andere Strategien der Energieerzeugung auf Agrarflächen opportun. Mit Freiflächen und Agri-Photovoltaik (Agri-PV)-Anlagen können gegenüber der Biogasproduktion zehn- bis zu dreißigfache Energieerträge je ha (Isermeyer, 2022; Böhm, 2023) realisiert werden. Dementsprechend bietet sich insbesondere in den wiederzuvernässenden Gebietskulissen der organischen Böden und den ertragsarmen grundwasserfernen Ackerstandorten (AZ <25) die Förderung solcher Anlagen an, um wertvolle Ackerflächen für die Nahrungsmittelerzeugung zu schonen. Biogaserzeugung wird von gewisser Relevanz bleiben, jedoch vornehmlich auf der Basis biogener Reststoffe. In der Konsequenz wird somit die derzeitige Maisanbaufläche zur Biogaserzeugung bis 2040 weitestgehend frei (UBA, 2020).

Der Kalkulation für diese Projektion liegt die Annahme (Ableitung nach FNR, 2022) zugrunde, dass ein Drittel der Silomaisanbauflächen zur Biogaserzeugung und nicht zur Futtererzeugung genutzt werden (Futter:Biogas = 67:33), siehe Tabelle 3. In Bezug auf den bezogenen Substrateinsatz in Biogasanlagen für 2019 gehen 49 % Wirtschaftsdünger ein (66 % Rindergülle, 16 % Schweinegülle, 12 % Rinderfestmist) sowie 46 % NaWaRo (davon 74 % Mais, 10 % Gras, 8 % Getreide, 8 % sonstiges). Das bedeutet, dass derzeit NaWaRo und Wirtschaftsdünger Masse-bezogen etwa gleiche Anteile aufweisen. Die Bruttostromerzeugung aus Biogas betrug im Jahr 2020 in SH 2.725 GWh. Ein Hektar Freiflächen Photovoltaik erzeugt ca. 1 GWh PV-Strom pro Jahr, für die gleiche Menge Strom werden durchschnittlich je nach Quelle 30–40 ha Energiepflanzenanbau benötigt. Das bedeutet: wenn kein Silomais mehr für die Biogaserzeugung angebaut wird, werden in SH etwa 60 Tsd. ha Anbaufläche und somit etwa 10 % der Ackerfläche frei für Potentiale im Sinne ‚klima- und nährstoff-optimierter Anbausysteme‘, wie bspw. durch integrierte Ley-Fruchtfolgen bzw. Ansätze im Sinne einer Hybridlandwirtschaft (Taube et al., 2023).

Eine weitere Quelle der NaWaRo vom Acker, die es in dieser Dimension mit der Perspektive 2040 kritisch zu diskutieren lohnt, ist der Einsatz von Raps zur Erzeugung von so genannten Biokraftstoffen (Rapsöl, Biodiesel). Von den 1,1 Mio. ha Rapsanbau in Deutschland mit Schwerpunkten in MV und SH werden nur 33 % der Rapsölerzeugung zu Nahrungsmittelzwecken (Öl) verwendet, während 8 % als Futteröle in der Tierhaltung Verwendung finden und knapp 60 % in die industrielle Verwertung gehen, insbesondere in Biodiesel-Kraftstoffe (BLE, 2023). Während das Ende der Biogaserzeugung vom Acker (Mais) absehbar erscheint, ist dies für den Biokraftstoffbereich trotz geringer Landnutzungseffizienzen

bisher nicht so klar absehbar, da die Verfügbarkeit von Alternativen im Kraftstoffsektor komplexer ist als im Stromsektor. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Kombination aus einer Reduktion der Tierhaltung (reduzierter Bedarf am Eiweißfuttermittel Rapsextraktionsschrot) und einer Infragestellung des Biodieselsektors aufgrund anderer Effizienzen/Trends im Transportbereich (Elektroantriebe/Wasserstoff) und aufgrund der aktuell intensiv geführten iLUC-Debatte (iLUC - Indirect land use change impacts of biofuels) eine ähnliche Reduktion auslösen wird wie im Bereich Biogas aus Mais. Andererseits zeigen Fortschritte in der Pflanzenzüchtung (vgl. BMBF-Projekt RaPEQ), dass die Eiweißkomponente im aktuellen Nebenprodukt Rapsextraktionsschrot in den nächsten 20 Jahren neben dem Öl zu einer zweiten Hauptkomponente Protein für die menschliche Ernährung (Hertzler et al., 2020) entwickelt werden dürfte. In einer solchen Projektion entfällt die Verfügbarkeit der Rapseiweißkomponente für die Tierernährung weitgehend und der Raps hätte das Potential zur ausschließlichen Nahrungspflanze ohne Koppelprodukte. Wir berücksichtigen diese teilweise gegenläufigen Auswirkungen auf den Rapsanbau später pauschal mit einer Abnahme des Rapsanbaus um 15 % in SH bis 2040 – eine Größenordnung, die auch aus pflanzenhygienischen Aspekten geboten erscheint, nachdem klassische Rapskrankheiten aufgrund zu enger Fruchtfolgen in den letzten Jahren zunehmen (UFOP, 2017).

In Summe werden durch die Substitution von Biogas-Mais (60 Tsd. ha) und Biodiesel-Raps (10 Tsd. ha) durch effizientere Technologien bis 2040 Flächenfreisetzungen für alternative Nutzungen von 70 Tsd. ha auf nicht durch Wiedervernässung betroffenen Mineralböden verfügbar – damit ist nahezu die Hälfte der durch Wiedervernässung der organischen Böden nicht mehr verfügbaren Flächen zur Erzeugung von Agrarrohstoffen kompensiert.

Da sowohl Silomais als auch Raps mit vergleichsweise hohen Stickstoffüberschüssen und N-Verlustpotentialen über den Pfad Sickerwasser gekennzeichnet sind (Svoboda et al. 2013, Biernat et al., 2020), wirkt auch diese Reduktion komplementär in Richtung des Schutzes der Gewässer vor Nährstoffeinträgen.

Handlungsfeld 2: Reduktion der Tierhaltung

Die Anpassung der Ernährungsmuster der Bevölkerungen in hoch entwickelten Ländern stellt einen Schlüssel gleichermaßen zur Ernährungssicherheit durch Steigerung der Landnutzungseffizienz (van Zanten et al., 2023), zur Gesundheit (DGE, 2024) und zur Reduktion von THG-Emissionen (Reduzierung der produktspezifischen Emissionen) dar (van Zanten et al., 2018; Agora Agriculture, 2024). Das Ausmaß dieser Anpassungsnotwendigkeiten wird kontrovers diskutiert. Während verschiedene Autoren im Hinblick auf Gesundheitsaspekte eine Reduktion des Verzehrs von Nahrungsmitteln tierischer Herkunft um bis zu 75 % postulieren (vgl. Willett et al., 2019) bzw. die Empfehlungen in Verbindung mit Umweltwirkungen noch deutlich stärker einschränken (Schäfer et al., 2024), verweisen andere Auto-

ren zudem auf die unterschiedliche Relevanz der Flächenkonkurrenz zwischen Futter- und Nahrungspflanzen. Unter Einbezug dieses Aspekts wird ersichtlich, dass das weltweite Grasland primär bzw. nahezu ausschließlich durch Weidetiere genutzt werden kann und so eine Landnutzungskonkurrenz zur direkten menschlichen Ernährung ausgeschlossen ist. Dies berücksichtigend, gehen Grethe et al. (2021) von Reduktionspfaden in Höhe von 50 % für alle Fleischsorten und 35 % für Milchkühe aus, wobei eine Konzentration auf Grünlandfutter in der Futterr ration vorgeschlagen wird. Der tatsächliche Trend ist jedoch seit Jahren in Deutschland ein anderer: So betrug der Grünlandanteil in der Futterr ation einer typischen Milchkuh in Norddeutschland mit einer Leistung von ca. 6000 kg Milch im Jahr 1990 etwa 60–65 % und beruhte im Sommer auf Weidefutter. Heute dagegen dominieren Milchleistungen von ca. 9000 kg und teilweise werden deutlich darüber liegende Leistungen verzeichnet. Diese werden weitgehend ohne Weidegang erreicht und die Energiebereitstellung aus Gras beträgt nur noch 25–30 %. Der größte Teil des Futters kommt in diesen Herden somit vom Acker durch den steigenden Einsatz von Silomais, Futtergetreide und Ölsaaten, wie in der Tabelle 8 beispielhaft gezeigt. Dies induziert Landnutzungskonkurrenzen, die sich aus der Rationsgestaltung ergeben und die sich bei höchsten Einzeltierleistungen den Verhältnissen beim Schwein annähern können.

Tabelle 8. Rationen auf Basis gebräuchlicher Futtermittel für unterschiedliche Leistungshöhen und Grobfuttersituationen

Verfahren Leistung		Mais betont		Gras betont	
		Milchkuh 8.000 kg ECM	Milchkuh 10.000 kg ECM	Milchkuh 8.000 kg ECM	Milchkuh 10.000 kg ECM
		plus 0,9 Kalb (je Kuh und Jahr)			
Futterraufwand	• Heu	kg TM	350	350	350
	• Grassilage	kg TM	1.600	1.650	3.000
	• Maissilage	kg TM	3.200	3.250	1.500
	• Stroh	kg TM	200	200	1.600
				200	200
	MLF Prot.-Erg. (RES, Harnstoff)	kg FM	950	1.150	580
	MLF Energ.-Erg. (W, M, M.s.)	kg FM	500	1.150	750
	Mineralfutter mit P	kg FM	37	37	1.150
				37	1.600
					37

DLG-Merkblatt 444, 1. Auflage, Stand: 1/2020. 3.2 Kalkulation der Nährstoffausscheidungen bei bedarfsgerechter Energie- und Nährstoffversorgung auf Basis gebräuchlicher Futtermittel für unterschiedliche Leistungshöhen und Grobfuttersituationen

Eine Reduktion der Schweinefleischerzeugung um 50 % auf 60 Tsd. Tonnen p. a. setzt in SH etwa 18 Tsd. ha Getreideflächen frei (Tabelle 9). Eine Halbierung der Rindfleischerzeugung aus Intensivmast und Mutterkuhhaltung wird durch die Aufgabe der entwässerten Moorstandorte bis 2040 übererreicht – es bleiben somit etwa 15 Tsd. ha Grünland, die theoretisch auf Mineralböden zusätzlich durch entsprechende Mastverfahren belegt werden könnten, um eine Versorgung in der Größenordnung von 25 Tsd. Tonnen Rindfleisch p. a. zu gewährleisten. Milcherzeugung und Färsenaufzucht werden bereits

durch die Wiedervernässung um etwa 20 % reduziert von 370 Tsd. auf 295 Tsd. Kühe plus Nachzucht, ein weiterer Abbau um etwa 40 Tsd. Kühe auf dann insgesamt minus 35 % im Vergleich zu 2020/2021 ist auf Mineralböden in den ‚hotspots‘ ohnehin nach den Vorgaben der EU-Nitratrichtlinie und -Wasserrahmenrichtlinie geboten (vgl. Nährstoffberichte SH). Dies setzt – bei Unterstellung des technischen Fortschritts in der Milcherzeugung/Kuh von 1 % p. a. (entsprechend der Trends in den letzten zwei Jahrzehnten laut BMEL-Statistiken) weitere ca. 30 Tsd. ha bisherige Futtergetreideflächen für alternative Nutzungen frei. In Summe wird durch den so dargelegten Abbau der Tierhaltung der Flächenverlust von 152 Tsd. ha organischer Böden bis zum Jahr 2040 nicht nur vollständig kompensiert, sondern darüber hinaus werden weitere Nutzungsoptionen eröffnet, die aus den zusätzlich verfügbaren 60 Tsd. ha Biogasmais plus 10 Tsd. ha Biodieselraps resultieren. Dieser Ansatz berücksichtigt noch nicht, welche Effekte eine auf ‚Graslandmilch‘ ausgerichtete Milcherzeugung mit limitiertem Einsatz von Konzentratfuttermitteln auslöst. Eine solche Projektion wird im Handlungsfeld 3 hergeleitet.

Tabelle 9: Projektion der Größenordnungen der Reduktionseffekte der Tierhaltung in SH auf Produktmengen, Tierzahlen und Futterflächenansprüche (Kalkulationsgrundlage: DLG-Merkblatt 444)

Tierart/Produkt (Anzahl)	Umfang		Reduk- tion	Futterflächenanspruch (Tsd ha)		
	2020	2040			2020	2040
Milch inkl. Färsenaufzucht						
Milch (Tsd. t)	3097	2013	35 %	Grünland	240	160
Milchkühe (Tsd.)	370	240	35 %	Silomais	80	52
Färsen (Tsd.)	230	150	35 %	Getreide	105	70
Verfügbares Grünland nach Vernässung:					130	
Fehlfläche Grünlandmilch:					30	
Rindfleisch (Tsd. t)						
Mast + MuKu	50	25	50 %	Grünland	32	16
				Silomais	17	8
				Getreide	6	3
Fehlfläche Grünlandmast nach Vernässung:					16	
Schweinefleisch (Tsd. t)						
	119	60	50 %	Getreide	36	18
Summe Freisetzung Ackerfläche auf Mineralböden (netto) nach Vernässung und Reduktion Tierhaltung						
				Fehlfläche Grünland		-46
				Acker Milch		+ 30
				Acker Schwein		+ 18
				Saldo		+ 2

Welche Nutzungsoptionen sich unter Berücksichtigung weiterer Schutzziele (Wasser, Biodiversität) im Sinne *klima- und nährstoffoptimierter Anbausysteme* anbieten, wird im Handlungsfeld 3 erläutert.

Die Reduktion der Tierhaltung verursacht im Jahr 2040 unter anteiliger Berücksichtigung der Werte des 2. Nährstoffberichtes für SH (Henning und Taube, 2020) eine Reduktion der Futterflächen um 175 Tsd. ha. Der Bedarf an Mineraldünger zur Düngung der Futterpflanzen im Lande sinkt bei einer überschlägigen Menge von 100 kg N/ha um mehr als 17 Tsd. Tonnen, der Import an Eiweißfuttermitteln aus Regionen jenseits von SH sinkt bei überschlägig 50 kg N/ha um 9 Tsd. Tonnen, der Anfall an Gülle-N sinkt um etwa 32 Tsd. Tonnen (-40 %).

Handlungsfeld 3: Klima- und nährstoffoptimierte Anbausysteme

Die obigen Ausführungen haben gezeigt, dass die Wiedervernässung der organischen Böden in SH ohne Einschränkung der Ernährungssicherheit, allein durch implizite Anpassung des Konsums von Nahrungsmitteln tierischer Herkunft bzw. explizite Einschränkung der Nutztierhaltung auf ein nachhaltigeres Maß, gelingen kann. Selbst ohne die Annahme von Ertragssteigerungen durch technischen Fortschritt, bestehen durch Berücksichtigung der freiwerdenden 70 Tsd. ha Ackerfläche (ehemalige Biogas-Mais-/Biodiesel-Raps-Flächen auf dem Acker) zusätzliche Optionen, um ‚klima- und nährstoffoptimierte Anbausysteme‘ mit den umfänglichen Ansprüchen weiterer Schutzziele (z. B. Wasser- und Biodiversitätsschutz) zu verknüpfen. Simultan können die Emissionen aus der Düngung reduziert werden und NCC durch Kohlenstofffestlegung in Böden gewährleistet werden. Übergeordnet gilt für dieses Handlungsfeld 3 das Primat, dass neben den Klimaschutzzielen auch weitere Nachhaltigkeitsziele (Nährstoffeffizienz für Wasserschutz; Biodiversität) umgesetzt werden. Gleichzeitig dienen Ackerflächen primär der direkten Nahrungsmittelerzeugung und sekundär der Bereitstellung von Rohstoffen für die Bioökonomie und erst an dritter Stelle der Bereitstellung von Futter. Für Milch und Rindfleisch werden in dieser Projektion primär Dauergrünlandfutter und anteilig Reststoffe der pflanzlichen Erzeugung auf dem Acker bereitgestellt und so eine Nahrungskonkurrenz zur menschlichen Ernährung auf dem Acker minimiert. Es wird somit davon ausgegangen, dass das Paradigma hin zu einer Kreislaufwirtschaft, die in der Tierernährung neben dem Grasland nahezu ausschließlich Reststoffe der pflanzlichen Erzeugung einsetzt, bis 2040 weitgehend umgesetzt wird (vgl. Vermeulen et al., 2012; van Zanten et al. 2023; Kozicka et al., 2023). Dies koinzidiert mit den Zielgrößen den nationalen Stickstoffsaldo betreffend, der im Vergleich zu 2020 bis 2045 in Deutschland mit etwa 50 kg N/ha halbiert werden soll (vgl. Grethe et al., 2021). Die Milcherzeugung betreffend induziert das ein neues Optimum der Milchleistung/Kuh. Während derzeit die Maximierung der Milchleistung (wie oben in Tabelle 8 gezeigt) jenseits von 10 Tsd. kg ECM zumeist in spezialisierten Betrieben mit der Konsequenz sehr hoher Stickstoff- und Phosphorüberschüsse (Reinsch et al., 2021; Sieve et al., 2023) im Zentrum steht, werden dann Milchleistungen je nach Rasse in der Größenordnung von etwa 7.000 bis 8.000 kg ECM relevant. Dies ist dadurch zu begründen, dass dies die Größenordnung ist, die mit deutlich reduziertem Einsatz

von Konzentratfuttermitteln (importierte Ackerfläche; importierte Acker-Energie in Form von Getreide/Raps- und importierte Eiweißkomponenten in Form von Soja- und Rapsextraktionsschrot), weitgehend aus Gras (~75 %) bei reduzierter Düngung erzielt werden kann (Steingaß, 2010; Reinsch et al. 2021; Flachowsky und Hachenberg, 2009). Zehetmeier et al. (2012) und Lorenz et al. (2019) zeigen zudem, dass ab einer Milchleistung jenseits von etwa 7.000 kg ECM der CO₂-Fußabdruck je kg ECM nicht mehr primär durch Milchleistungssteigerungen reduziert wird bzw. Milchleistungssteigerungen somit nicht mehr deutlich positiv auf die THG-Reduktionen wirken – entsprechend werden sie in dieser Projektion vernachlässigt. Nyameasem et al. (2024) und Alderkamp et al. (2025) zeigen, dass derartig optimierte Systeme im Vergleich zum Status Quo Umweltkosten für Überschüsse an N und P sowie zusätzliche CO₂-Emissionen in einer Größenordnung von bis zu 0,30 EURO je kg erzeugte ECM vermeiden können.

In der Tabelle 9 wurde aufgezeigt, dass ohne Anpassungen in Schritt 3 der Verlust an entwässerten Moorfutterflächen bei unterstelltem technischem Fortschritt (Milchleistung/Kuh +1 % p. a.) in einer ‚business as usual‘-Projektion bis 2040 mit dann 260 Tsd. Milchkühen Milchmengen im Lande in der Größenordnung von 2,6 Mio. Tonnen erzielt würden. 75 % des Wertes von 2020, jedoch mit einem zunehmenden Anspruch an Ackerflächen und ohne Erfüllung der Randbedingungen aus Schritt 3 (Klima- und nährstoffoptimierte Anbausysteme: Reduktion der Nährstoffüberschüsse, C-Sequestrierung auf den Ackerflächen etc.). Wird nun entsprechend diesen Kriterien anders als in Tabelle 9 die verfügbare Fläche mit Milchleistungen von 7.000 kg ECM ‚Grünlandmilch‘ verknüpft, dann sinkt die erzeugte Milchmenge um 40 % auf etwa 1,8 Mio. Tonnen ECM p. a. ab (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Milcherzeugung plus Färsenaufzucht bis 2040 aus Grünland- plus Kleeergrasfutter (75 % des Energie- und Proteinbedarfs; Mais 5 % und Konzentrat 20 % bei 250 Tsd. Kühen) im Vergleich zum Ist-Zustand 2020

	Futterbasis (Tsd. ha)	Fläche (Tsd. ha)	Milchkühe (Tsd.)	Milchleistung	
				aus Futterbasis pro Kuh (kg ECM)	Summe (Tsd. Tonnen ECM)
Ist 2020	Grünland (240) + Mais (80) + Getreide (105)	425	370	8.370	3.097
2040 (nach Wiedervernässung Moor)	Grünland 116, Mais 37; Konzentrat/Getreide 50; + 50 Kleeergras (bestehende Ackerergrasflächen von 37 werden zusätzlich in Kleeergras überführt)	260 (-39 %)	260 (-30 %)	7.000 (-15 %)	1.820 (-41 %)

Voraussetzung für die Umsetzung einer solchen Projektion ist eine deutlich effizientere Futterwirtschaft mit resultierenden Grobfutterleistungen vom Grünland in einer Größenordnung von über 5000

kg ECM/Kuh. Im Modellvorhaben ‚ökoefiziente Weidemilcherzeugung Lindhof‘ (Reinsch et al., 2022; Mues et al., 2021; Taube et al., 2023; Nyameasem et al., 2024) wurden die Herausforderungen an die Futterwirtschaft für eine Milcherzeugung aus 75 % Grünlandfutter umgesetzt. Im Vergleich zum *Status quo* bedeutet dies vor allem wesentlich bessere Futterqualitäten vom Grünland (Weißklee-Kräuter-Grasbestände auf Dauergrünland; Rotklee-Kräuter-Grasbestände im Ackerfutterbau, verbunden mit Mähweidenutzungen), die zu höheren Energiedichten (6,6 statt 6,1 MJ NEL/kg TM) und Proteinqualitäten führen und so den Bedarf an Konzentratfuttermitteln deutlich begrenzen.

Klima- und nährstoffoptimierte Anbausysteme durch Hybridlandwirtschaft regelbasiert umsetzen

Warum eine Größenordnung von +90 (2x 45) Tsd. ha 2-jähriges Rotklee-Gras als Kompensation für den Abbau an Silomais und anteilig Ackergras? Wie in Kapitel 2 ausgeführt, hat die Nutzung von Ackerfutter in einer zirkulären Landwirtschaft primär dann eine Berechtigung, wenn es sich (i.) um Reststoffe handelt (van Zanten et al. 2023) oder (ii.) mit den Futterbausystemen Ackerbausysteme resilienter gestaltet werden können (vgl. Taube et al., 2023). Während heute Silomais in Selbstfolge den Anbau mit negativen Konsequenzen für die gespeicherten Kohlenstoffmengen im Boden (Rios et al., 2022) dominiert und nach wie vor mit hohen Nährstoffverlusten über den Pfad Sickerwasser im Winterhalbjahr einhergeht (Vogeler et al., 2022), würde der Einsatz von temporärem Klee-Gras-Ackerfutterbau die gegenteilige Wirkung aufweisen. Der zentrale Ansatz in diese Richtung ist die Umsetzung von so genannten ‚Hybridsystemen‘. Taube (2021) versteht darunter die Kombination zentraler Elemente des konventionellen und ökologischen Landbaus (‚das Beste aus zwei Welten‘) mit dem Ziel, eine ‚ökologische Intensivierung‘ dahingehend zu gewährleisten, dass die Ernährungssicherheit nicht eingeschränkt wird, Verlagerungseffekte vermieden werden, die Biodiversität gesteigert und der Umweltfußabdruck der erzeugten Produkte maßgeblich reduziert wird. Zentrale Elemente sind dabei – im Gegensatz zur Diskussion um die bisher nicht verbindlich Regel-definierte ‚regenerative Landwirtschaft‘ – definierte 5- bis 6-gliedrige Fruchtfolgen, die zur Hälfte nach Standards in Anlehnung an den ökologischen Landbau und zur Hälfte nach Standards des konventionellen Landbaus mit hohem Anteil von Leguminosen eine bessere Kreislaufwirtschaft gewährleisten als bisherige spezialisierte Systeme. Ein zentrales Element dieses Ansatzes sind zweijährige Klee-Gras-Kräuter-Systeme (KG) als Basis zur Wiederkäuerernährung, die in Anlehnung an den ökologischen Landbau bewirtschaftet werden (kein mineralischer N-Dünger, kein chemisch-synthetischer Pflanzenschutz), die Stickstoff und Bodenkohlenstoff akkumulieren (Taube et al., 2023; Loges et al., 2018; Rios et al., 2022), Nitratbelastungen des Sickerwassers nahezu vollständig (< 5 kg N/ha) eliminieren (Smit et al., 2021), die N₂O -Emissionen gegenüber mineraldüngerbasierten Systemen deutlich reduzieren (Schmeer et al., 2014) und chemischen Pflanzenschutz in Form von Herbiziden nahezu überflüssig machen (Jensen et al., 2025) – ganz im Gegenteil

bieten sie Nützlingen umfänglich Nahrung (Beye et al., 2022). Zudem sorgen diese Systeme als Futterbasis der Milcherzeugung für niedrigste Methan- und THG-Emissionen der erzeugten Milch (Loza et al., 2021; Reinsch et al., 2021; Taube et al., 2023; Eismann et al., 2024) und sehr geringe Stickstoff-Fußabdrücke je kg Milch (Lorenz et al., 2019; Reinsch et al., 2021). Nach zweijährigem Anbau von KG-Mischungen sind unerwünschte Unkräuter/Beikräuter so dezimiert, dass eine Sommerung als Folgefrucht weder eine zusätzliche Düngung noch chemischen Pflanzenschutz erfordert und dennoch ca. 75-85 % des Ertrages einer konventionellen Sommerung (Hafer/Körner-Mais) realisiert, bevor dann drei weitere Fruchtfolgeglieder intensiv konventionell bewirtschaftet werden (z. B. Raps, Weizen etc.). Der aktuelle Silomaisanbau (Humuszehrung) zur Futtererzeugung wird in einer solchen Projektion bis 2040 zu 80 % einerseits durch KG-Systeme und andererseits durch Körnermais (Marktf Frucht für Humanernährung, bedingt durch Zuchtfortschritt) substituiert, so dass lediglich eine Größenordnung von deutlich unter 40 Tsd. ha Silomais verbleibt.

Klee gras und Dauergrünland werden im Sinne der Kreislaufwirtschaft lediglich mit organischer Düngung entsprechend dem Gülleanfall (~120 kg N/ha) versorgt und erreichen damit aufgrund der zusätzlichen Stickstoff-Fixierung durch Weiß- und Rotklee sowie der hohen Energiedichten Energie-Ertragsniveaus von 85 % auf dem Dauergrünland und 75 % auf dem Acker im Vergleich zu Silomais (Trott et al., 2004; Loges, 1998) und erfüllen zudem umfängliche Ökosystemdienstleistungen. In der Kalkulation in Tabelle 10 sind diese Ertragsreduktionen in MJ NEL-Erträgen als entsprechend reduzierte Milchleistung ausgewiesen.

Mit der Umwandlung bisheriger Silomais- und Acker grasflächen in Klee gras-Flächen werden 2040 etwa 90 Tsd. ha mit Klee gras belegt (2-jährig je 45 Tsd. ha). Nach dem 2-jährigen Klee gras folgt eine Sommerung (z. B. Körnermais/Hafer), die ohne zusätzliche Mineraldüngung und chemischen Pflanzenschutz, aber mit ca. 60 kg N/ha aus Gülle 90–100 % der Ertragsleistung realisiert, da das 2-jährige Klee gras N-Transfers für die Folgefrucht von insgesamt ca. 160 kg N/ha bereitstellt (1. Folgejahr 120 kg; 2. Folgejahr 40 kg). Bezüglich der Bedarfe an mineralischem N-Dünger für die Landwirtschaft in SH bedeutet dies, dass nach dem Wegfall von 150 Tsd. ha wiedervernässter Moorflächen eine ähnliche Größenordnung an Ackerflächen auf Mineralböden den mineralischen N-Bedarf Null aufweist, ebenso wie das Dauergrünland. In Summe reduziert das den mineralischen N-Bedarf im Vergleich zu 2020 um mindestens 50 %. Begleitet von einer ambitionierten Düngegesetzgebung und einem flächendeckenden Vollzug (Stoffstrombilanzverordnung z. B. nach Taube et al., 2020) ist so gewährleistet, dass die Stickstoffüberschüsse deutlich zurückgehen und sich dem Optimum nähern, mit der Konsequenz deutlich niedrigerer N₂O-Emissionen für den Sektor 3. Die resultierenden Änderungen der Flächennutzungen für SH (Abbildung 4) sind in der Projektion wie folgt zu charakterisieren: In SH wird die für die Erzeugung von ASF verfügbare landwirtschaftliche Fläche durch wiedervernässte organische Böden um 152

Tsd. ha eingeschränkt. Klassisches Dauergrünland wird dadurch am stärksten betroffen und von 321 auf 210 Tsd. ha reduziert. Silomais sinkt durch den Wegfall von NaWaRo-Biogas und den Abbau der Tierhaltung von 187 auf 37 Tsd. ha, Raps um 15 % von 67 auf 57 Tsd. ha. Die so zusätzlich verfügbaren ca. 160 Tsd. ha werden folgendermaßen neu genutzt (in 1.000 ha): +25 Brotgetreide/Winterweizen; +25 Körnerleguminosen; +30 Körnermais/Feuchtmals; +50 Klee gras; +30 naturschutzrelevante Flächen (Extensivgrünland-Neuanlage mit PV/Agroforst) mit Biotopvernetzung. Die Kategorie ‚naturschutzrelevante Flächen‘ stellt einen Proxi für verschiedene Landnutzungsoptionen dar, die unter Einbeziehung von erwartetem technischen Fortschritt Schnittstellen zwischen Naturschutz und Bioökonomiefunktionen bedienen (Agri-PV, Fasern für die Bioökonomie etc.). Da auch das bestehende Ackergras sukzessive in Klee gras umgewandelt wird, entstehen in Summe etwa 90 Tsd. ha Klee gras.

Anbaufläche in 1000 ha

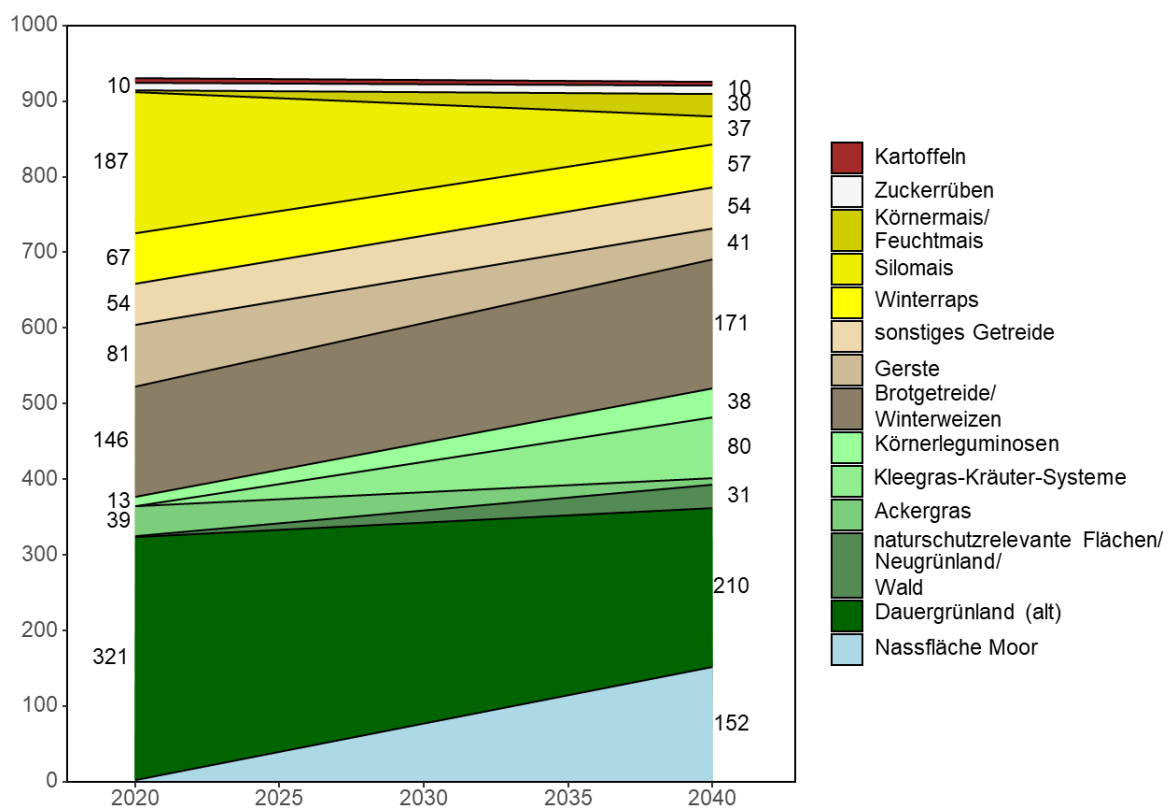


Abbildung 4. Veränderung der Landnutzung am Beispiel SH von 2020 bis 2040 in 1000 ha

Tabelle 11: Projektierte Anpassung Flächennutzung SH bis 2040 in 1000 ha

Landnutzung	Schleswig-Holstein			
	2020	minus	plus	2040
Dauergrünland (alt)	321	111		210
Nassfläche Moor	3		149	152
Naturschutz/Neugrünland/Wald	1		30	31
Ackergras	37	37		0
Körnerleguminosen	13		25	38
Klee gras-Kräuter-Systeme	2		88	90
Silomais	187	150		37
Körnermais/Feuchtmais	2		28	30
Winterraps	67	10		57
Brotgetreide/Winterweizen	146		25	171
Gerste	81	40		41
sonstiges Getreide	54			54
Zuckerrüben	10			10
Kartoffeln	6			6
Summe	930	341	337	926

Für den Fall, dass die Potentiale für die Flächennutzung zur Futtererzeugung für Milchvieh nicht genutzt werden, sinkt vornehmlich der Anteil von Silomais weiter ab und steigt der Anteil von Körnermais weiter an – Futterbaubetriebe werden so zunehmend zu Gemischtbetrieben. Aus den skizzierten Projektionen resultieren die folgenden potentiellen THG-Emissionen für die Sektoren 3 und 4, wie in Tabelle 12 bis 14 dargestellt.

Tabelle 12: Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft in SH bis 2040 (Mio. t CO₂eq)

	1990	2000	2010	2020	2040
CH₄	3,6	3,3	3,1	3,0	1,8
Verdauung	2,9	2,6	2,5	2,3	1,4
Wirtschaftsdüngermanagement	0,7	0,6	0,5	0,5	0,3
Lagerung u. Vergärung von Pfl.	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
N₂O	1,7	1,5	1,7	1,5	0,9
Wirtschaftsdüngermanagement	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Böden	1,5	1,4	1,4	1,3	0,8
CO₂	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Düngung und Kalkung	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Gesamt CO₂eq	5,4	5,0	4,9	4,7	2,8

Tabelle 13: Veränderung der THG-Emissionen durch LULUC-Effekte der Projektionen und Wiedervernässung organischer Böden + LULUC(F) (Agrar) SH

Jahr	Flächennutzung	Tsd. ha	t CO ₂ eq/ha	Mio. t CO ₂ eq
2020	Grünland auf Moor	111	~29	3,2
	Acker auf Moor	41	~35	1,4
	LF auf Moor	152	~32	4,7
2040	G&A wieder vernässt	152	~5	0,8
	jährl. Einsparung ab 2040 im Vergleich zu 2020			3,9
	Zusätzliche CO₂-Festlegung bis 2040*			3,5

Quelle: Thünen-Institut, 2023, 1 kg C -> 3,67 kg CO₂

* SH Mineralböden +6 t C/ha für 60 Tsd. ha KG/KM** +20 t C/ha für 30 Tsd. ha Neugrünland/Wald** = 960 Tsd. t C;

** vgl. Guillaume et al., 2022; Antony et al., 2022

Tabelle 14: Treibhausgasemissionen (Mio. t CO₂eq) LULUC (MELUND, 2024)

In Mio. Tonnen CO ₂	1990	2000	2010	2020	2040
Mineralboden	0,0	0,0	0,2	-0,1	0,0
Org. Boden	4,7	4,7	4,7	4,6	1,2
Biomasse	0,1	0,0	0,1	0,3	-0,5
jährliche C-Festlegung*					-0,2
abzgl. Gülle/Gärr.**					0,7
Gesamt CO₂eq***	4,8	4,8	5,0	4,8	1,2
LULUCF insg.	5,1	4,6	4,5	4,6	
LULUC (ohne Wald)	5,3	5,2	5,0	5,0	

Quelle: MELUND (2024), ergänzt durch

* zusätzliche C-Sequestrierung Boden aus Klee gras + Körnermais;

** abzüglich reduzierter Gülle-/Gärrestanfall durch Abbau Tierhaltung (8 Mio. Tonnen FM) mit C/N 10:1) x CUE 0,2 p. a.;

*** Summe aus * und **

Werden die Projektionsergebnisse aus Tabelle 12 und Tabelle 14 in Abbildung 3 aggregiert (Landwirtschaft +2,8 Mio. t CO₂eq + LULUC Agrarflächen 1,2 Mio. t CO₂eq), dann wird deutlich, dass eine klimaneutrale Situation nicht erreicht wird, jedoch weit mehr als eine Halbierung der THG-Emissionen, wenn neben der Wiedervernässung der organischen Böden und dem Abbau der Tierhaltung insbesondere die begrenzten zusätzlichen C-Speicherpotentiale der Mineralböden genutzt werden. Dies kann durch hohe Kohlenstoffzufuhr über den Ausbau des Landnutzungswandels hin zur Kombination von mehrjährigem Klee gras und Körnermais umgesetzt, kontinuierlich erhalten und fortgeschrieben werden. Während andere diskutierte Optionen des ‚carbon farming‘ (bspw. Agro-Forstsysteme) in der Regel eher kleinflächig zur Geltung kommen dürften, stehen mit der genannten Kombination aus Klee gras und Körnermais ganz andere Flächenpotentiale zur Verfügung. In Summe werden nach diesen Projektionen aus den drei Handlungsfeldern jährliche THG-Emissionen im Jahr

2040 im Vergleich zu 2020 um etwa 65 % (3,4 statt 9,7 Mio. Tonnen CO₂eq) reduziert, ohne eine substantielle Einschränkung der Bereitstellung von Nahrungsmitteln (Abbildung 5).

Jährliche Emission in Mio. t CO₂eq

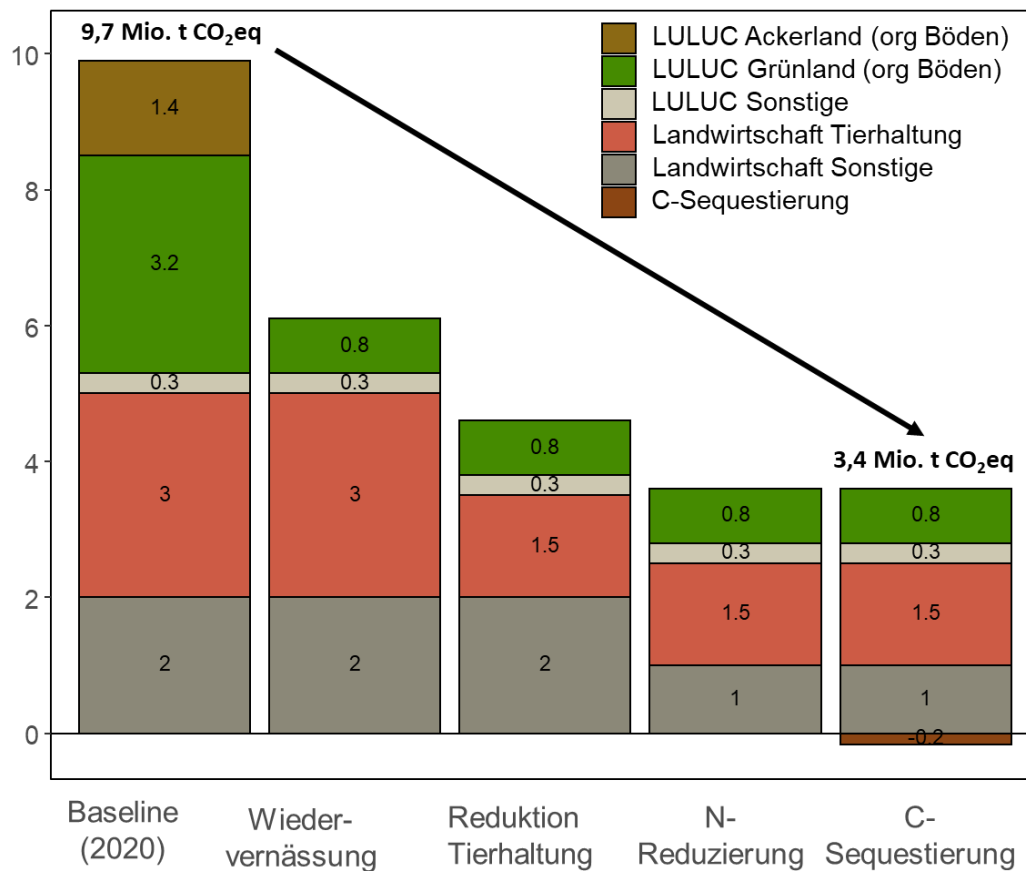


Abbildung 5: Hauptemittenten aus Landwirtschaft und LULUC – hierarchisch hergeleitete Projektionen auf dem Weg in Richtung Klimaneutralität

5 Diskussion der Projektionen

Die skizzierten Projektionen hin zu NCC in den Sektoren Landwirtschaft und LULUC(F) bis zum Jahr 2040 zeigen beispielhaft für das Bundesland Schleswig-Holstein, dass Klimaneutralität nicht erreicht wird, die THG-Emissionen jedoch um über 70 % reduziert werden können, ohne die Ernährungssicherheit negativ zu beeinflussen und ohne weitere Schutzziele (Wasserschutz; Biodiversität) einzuschränken – ganz im Gegenteil sichert die dritte Stufe mit den klima- und nährstoffeffizienten Anbausystemen über ein Modell der Hybridlandwirtschaft neben positiven Klimawirkungen Synergien für Gewässerschutz und Biodiversität – dies umso mehr dann, wenn die absehbaren Verbote weiterer Bodenherbizidwirkstoffe die Bedeutung des mehrjährigen Klee-grasanbaus zur indirekten Unkraut- bzw. Ungrasbekämpfung zusätzlich in den Fokus rücken. Die hier gewählten Projektionen insbesondere der dritten Stufe sind im Detail zum Beispiel für andere

Bundesländer ohne eine solche Bedeutung der Milcherzeugungsinfrastruktur wie in SH modifizierbar z. B. dahingehend, dass im Sinne der Bodenkohlenstoffsequestrierung höhere Anteile von Agroforstsystemen implementiert werden (vgl. Agora Agriculture, 2024). Eine weitere Frage ist die Wirkung der skizzierten Projektionen auf die THG-Emissionen nach 2040, denn gerade der mehrjährige Kleeergrasanbau würde bis 2040 ein neues Equilibrium der Boden-C-Senkenfunktion erreicht haben, ebenso wie auch die Neuanlage von Dauergrünland. Aus der Literatur ist abzuleiten, dass nach 20 Jahren der Wiedervernässung von entwässerten organischen Böden allmählich eine Nettosenke durch Moorwachstum (Torf-C) eintreten kann und über die Zeit zunimmt (vgl. Greifswald Mire Centre and Wetlands International Europe 2024). Dies umso mehr in SH, wo durch ausreichende Niederschläge die Verfügbarkeit von Wasser für das Moorwachstum nicht grundsätzlich in Frage steht (im Gegensatz zu anderen niederschlagsarmen Bundesländern wie Brandenburg).

Gibt es andere Strategien zur Klimaneutralität der Sektoren Landwirtschaft und LULUC?

Jenseits des Zirkularitätsansatzes zur Sicherung der Welternährung bis 2050 bei gleichzeitigem Schutz des Klimas und der Biodiversität (van Zanten et al., 2023) hat in den letzten Jahren eine Projektion für ein ‚Klimaneutrales Dänemark 2050‘ Beachtung gefunden: Searchinger et al. (2021) verfolgen in diesem Projektionspapier einen zum Teil erheblich anderen Ansatz: Während die Wiedervernässung der entwässerten organischen Böden und die Reduktion des Konsums von Nahrungsmitteln tierischer Herkunft in Dänemark ebenso zentrale Projektions-Elemente darstellen wie im vorliegenden Papier, weichen die unterstellten Produktionsprojektionen zum Teil drastisch ab. Searchinger et al. (2021) argumentieren, dass die Weltmärkte bis 2050 in steigendem Umfang Lebensmittel tierischer Herkunft nachfragen, dass die spezifischen THG-Emissionen je Produkteinheit durch Hochtechnologien in entwickelten Ländern des Nordens minimiert werden können und dass somit die tierische Erzeugung hier zu steigern sei, um ‚leakage-Effekte‘ im Sinne des Klimaschutzes (zusätzliche Regenwaldrodung) zu vermeiden. Das bedeutet in der Konsequenz, dass nach Searchinger et al. Opportunitätskosten im Sinne der vermiedenen Regenwaldrodung (Searchinger et al., 2018) dem ‚Klimakonto Dänemark 2050‘ gutgeschrieben werden können und technische Innovationen weiter voranzutreiben sind, um eine ‚theoretische Projektion von plus 45 % Produktionssteigerung‘ in allen Produktionsbereichen bei gleichzeitiger Wiedervernässung/Wiederaufforstung von insgesamt bis zu 450.000 ha zu ermöglichen. Diese Projektion für Dänemark wird häufig als ‚Gegenmodell‘ zitiert, lässt aber außer Acht, dass die Autoren derartige Projektionen als ‚theoretisch‘ im Sinne von ‚unter den gegebenen Umständen nicht realistisch‘ ausweisen, weil der ‚yield gap‘ in Dänemark bereits so niedrig sei, dass deutliche Ertragssteigerungen nicht sehr wahrscheinlich erscheinen.

Innovativ sind hingegen die Überlegungen zur zukünftigen Ausweitung des Bioraffinerieansatzes auf Basis von Gras und Kleeergras (Manevski et al., 2018) oder auch die Überlegungen zur Förderung

klimafreundlicher Produktionspraktiken in den Importländern wie Brasilien, um dort natürliches Grünland zu erhalten und Aufforstungen zu befördern. Was im Searchinger-Ansatz jedoch völlig ausgeklammert wird, sind die *trade offs* z. B. der Stickstoff- und Phosphoremissionen auf die Gewässerqualitäten ebenso wie Effekte für die biologische Vielfalt bei unterstellten theoretischen Produktivitätssteigerungen von bis zu 45 %. Diese Annahmen sind ohne zusätzlichen Einsatz von Stickstoffdünger bei bereits heute hohen Stickstoffüberschüssen/ha nicht plausibel. Angesichts der aktuellen Probleme hinsichtlich der Eutrophierung der dänischen Küstengewässer durch die Einträge aus der Landwirtschaft und der jüngst vereinbarten CO₂-Bepreisung unter Einbeziehung der Stickstoffemissionen (Anonym, 2024) halten die Projektionen von Searchinger et al. einer validen Überprüfung unter Einbeziehung eines komplexen Bündels von Ökosystemleistungen nicht stand. Was bei Searchinger et al. auch irritiert, sind die nicht hinterfragten großen standörtlichen Variationen der ‚carbon opportunity costs‘ und resultierender Gutschriften für ‚nicht gerodeten Regenwald‘ angesichts der Tatsache, dass über Regenwaldrodung oder -nichtrodung die Staaten vor Ort entscheiden und Governance-Probleme dort derzeit als Treiber für Landnutzungswandel stärker wirken dürften als theoretische technische Innovationen in Dänemark. Dies umso mehr, als die Stickstoff- und Phosphorüberschüsse eines Landes mit viel Regenwald wie Brasilien um ein Mehrfaches niedriger ausgeprägt sind als die in Dänemark. Insofern sind die Rahmenbedingungen für mittelfristige technische Innovationen ohne zusätzliche Umweltkosten bei derzeit hoch ausgeprägtem *yield gap* in Ländern wie Brasilien ungleich vielversprechender als in Dänemark (vgl. O'Connell und Silva-Santisteban 2023). Dass technische Innovationen voranzutreiben sind, ist unstrittig und ist im vorliegenden Papier die steigenden Milchleistungen betreffend berücksichtigt, die pflanzliche Erzeugung betreffend (t/ha) jedoch deshalb nicht, weil davon auszugehen ist, dass sich der Trend der letzten 25 Jahre (Ertragsstagnation aller wesentlichen *cash crops* außer Zuckerrüben in Zentral-Europa) trotz Zuchtfortschritten bei absehbar zunehmendem Klimawandelstress fortsetzen dürfte. Im Sinne der Sicherung der Welternährung durch Ertragssteigerungen gehen die relevanten wissenschaftlichen Studien davon aus, dass diese in den Regionen der Welt mit ausgeprägtem *yield gap* zu realisieren sind (z. B. Guarin et al, 2022) und nicht in Zentraleuropa.

Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung der Projektionen und Schlussfolgerungen

Für eine Umsetzung in die Realität sind entsprechende politische Rahmenbedingungen auf europäischer, Bundes- und Landesebene notwendig, so wie sie in verschiedenen Schriften hinterlegt sind (vgl. WBAE, 2020; ZKL 2021 und 2024; Agora Agriculture, 2024). Die Hierarchie der Projektionen aufnehmend bedeutet das

- Wiedervernässung organischer Böden: Eine abgestimmte Bund-Länder-Strategie zur Wiedervernässung der entwässerten organischen Böden mit entsprechenden alternativen Wertschöpfungsoptionen für die Landnutzer, die sowohl potentiell schnell verfügbare Alternativen gewährleistet, weil entsprechende Technologien bereitstehen (Freiflächen-PV in Verbindung mit Wiedervernässung) als auch mittel- und langfristige Optionen entwickelt, deren Wertschöpfungsketten noch nicht überzeugend aufgebaut sind (Paludikulturen; Bioökonomie).
- Reduktion Biogas-/Methanerzeugung auf Kulturpflanzenbasis: Verringerung der Ausschreibungen sukzessive auf Null, weil die Kombination aus PV plus Speichermedien absehbar das bisherige Argument der Grundlastsicherung aus Biogas/Methan auf Basis von Mais und anderen Kulturpflanzen als ineffizient entkräftet (vgl. Akademieunion, 2024).
- Transformation des Ernährungssystems: Anreize setzen zur Erhöhung des Konsums von Lebensmitteln pflanzlicher Herkunft (vgl. Grethe et al., 2021; WBAE, 2020), insbesondere Verzicht auf die Subvention des Fleischkonsums durch den derzeit reduzierten Mehrwertsteuersatz und stattdessen eine Mehrwertsteuerbefreiung für nicht prozessierte Nahrungsmittel pflanzlicher Herkunft (Obst, Gemüse) mit dem Ziel, die Empfehlungen der DGE (2024) bis 2040 weitgehend umzusetzen. Eine solche Projektion würde auch Exportsteigerungen für das dann reduzierte Produktionsniveau von tierischen Lebensmitteln ermöglichen.
- Klima- und nährstoffoptimierte Anbausysteme/Hybridlandwirtschaft: Schaffung ordnungsrechtlicher Leitplanken (Umsetzung ambitionierter Düngegesetzgebung als zentrale Leitplanke der Reduktion der Tierhaltung in Regionen mit hohem Tierbesatz); Transformation der EU-Agrarpolitik generell hin zu Förderinstrumenten, die NCC evidenzbasiert honorieren (z. B. Gemeinwohlprämie, Neumann et al., 2017);
- Ausgestaltung spezieller Förderinstrumente, die Landwirte in einem Übergangszeitraum ökonomisch in die Lage versetzen, Hybridsysteme basierend auf 2-jährigem Kleegrasanbau zu implementieren (Taubе, 2021; Taubе et al., 2023). Lehre und Beratung zur Förderung klima- und nährstoffoptimierter Anbausysteme, begleitende Etablierung einer Labelstruktur zur Vermarktung der Produkte aus einer Hybridlandwirtschaft z. B. entsprechend WBAE (2020) ‚Ökolandbau und mehr‘.

Insgesamt ist zu schlussfolgern, dass neben den beiden großen Treibern für die hier behandelten THG-Emissionen (entwässerte Moore, hoher Konsum von Nahrungsmitteln tierischer Herkunft) auch auf den hoch produktiven Standorten Norddeutschlands eine Strategie der ökologischen Intensivierung der Landnutzung gelingen kann, wenn Elemente der Selbstregulationsmechanismen, auf die der ökologische Landbau setzt (z. B. Klee gras, weite Fruchtfolge) mit technischen Innovationen verknüpft werden (z. B. Zuchtfortschritt), die vermiedenen Umweltkosten ausgewiesen werden und so neue Optima der Ökoeffizienz in der Bereitstellung von Agrarrohstoffen hergeleitet werden können. Am

Beispiel der Milcherzeugung wurde gezeigt, dass nicht nur der ‚carbon footprint‘ eines Milcherzeugungssystems die Resilienz eines Produktionssystems ausmacht, sondern dass im Mindesten die N- und P-Footprints (vgl. Alderkamp et al., 2025) sowie die Koppelleffekte auf die Biodiversität, das Tierwohl und die Beanspruchung von weltweit knappen Ackerflächen für die Futterbereitstellung zu würdigen sind. Die zusätzliche Bodenkohlenstoffsequestrierung allein durch Landnutzungswandel (z. B. Klee gras statt Silomais) zeigt die bekannt begrenzten quantitativen Effekte im Vergleich zur Wiedervernässung der organischen Böden und der Transformation des Ernährungssystems. Die Gesamtschau zeigt jedoch unter Einbeziehung der Vorfruchtwirkungen und produktionsintegrierten Biodiversitätsleistungen, der Einsparung von chemischem Pflanzenschutz und der zukünftig möglichen Nutzung dieser Aufwüchse im Sinne der Bio-Ökonomie, dass die Diversität von Lösungsoptionen für zukünftige Landnutzungen im Blick zu behalten ist, um *natural climate contributions* für resiliente Produktionssysteme zu gewährleisten. Jenseits der naturwissenschaftlich erfassten Parameter würdigt die NCC- Forschergruppe auch die agrar- und umweltethische Dimension (Ott, 2024) und leistet damit einen komplexen Debattenbeitrag zu zukünftigen Optionen der Landnutzung in Norddeutschland.

Zusammenfassung

Das Klimaschutzgesetz (KSG) Deutschlands verpflichtet zu Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität im Jahr 2045. Das Bundesland Schleswig-Holstein (SH) hat die Zielerreichung bereits für das Jahr 2040 avisiert. Vor diesem Hintergrund wird in einer Machbarkeitsstudie ‚Natural Climate Contributions‘ (NCC), gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), analysiert, wie ein Weg zur Klimaneutralität für die Bereiche Moornutzung, Forst und Landwirtschaft unter Berücksichtigung umweltethischer Normen und naturnaher Lösungsansätze möglich sein kann. Im vorliegenden Aufsatz werden die Potentiale für die Bereiche Landwirtschaft und agrarische Landnutzung (LULUC) unter Berücksichtigung erwartbaren technischen Fortschritts beispielhaft für das Bundesland SH analysiert. Ausgehend von der in der Literatur dokumentierten Rangfolge der Effizienz der Maßnahmen (geringe CO₂-Vermeidungskosten) wird in einem hierarchischen Ansatz im 1. Schritt die nahezu vollständige Wiedervernässung der entwässerten organischen Böden unterstellt; in einem darauf aufbauenden 2. Schritt wird die Reduktion der Erzeugung tierischer Produkte (Animal Source Food, ASF) in unterschiedlichem Ausmaß (35–50 %) auf den dann verbleibenden Mineralbodenflächen unterstellt und in einem 3. Schritt der Effekt einer konsequenten Weiterentwicklung ‚klima- und nährstoffoptimierter Anbausysteme‘ (mit kombinierten Elementen des konventionellen/ökologischen Landbaus wie zweijähriger Klee grasanbau) analysiert. Zusätzlich wird unterstellt, dass die Flächennutzung zur Erzeugung von

Biogas aus landwirtschaftlichen Hauptkulturen (Mais) bis 2040 weitestgehend durch eine Flächennutzung zur Humanernährung substituiert wird. Die Ergebnisse zeigen, dass die Summe dieser drei NCC-Maßnahmen trotz des Verlustes an Agrarflächen durch die Wiedervernässung nicht weniger, sondern bedingt durch den Abbau der Tierhaltung und die Aufgabe der ineffizienten Flächennutzung zur Biogaserzeugung mehr Nahrungsmittel, insbesondere pflanzlicher Herkunft bereitstellen kann und dabei die Treibhausgas (THG)-Emissionen des Sektors Landwirtschaft im Vergleich zu 2020 um über 65 % reduziert werden können. Nach 2040 setzt sich dieser positive Trend durch die perspektivisch einsetzende Senkenfunktion der wiedervernässten organischen Böden fort. Nach einer Diskussion der Potentiale werden abschließend Empfehlungen zur Umsetzung von NCC dargelegt.

Summary

The German Federal Climate Action Act (Bundes-Klimaschutzgesetz) requires measures to be taken to achieve climate neutrality by 2045. The federal state of Schleswig-Holstein (SH) has already announced that it aims to reach this target by 2040. Against this background, a feasibility study 'Natural Climate Contributions' (NCC), funded by the German Federal Environmental Foundation (DBU), analyses how a path to climate neutrality can be possible for the areas of peatland use, forestry and agriculture, taking into account environmental ethical standards and solutions close to nature. In this article, the potentials for the agricultural sector and agricultural land use (LULUC) are analysed for the federal state of SH, taking into account expected technical progress. Based on the ranking of the efficiency of the measures documented in the literature (low CO₂ avoidance costs), a hierarchical approach is used. In the first step, the almost complete rewetting of drained peatland soils is assumed. Based on this, within a second step a decrease in production of animal source food (ASF) to varying degrees (35–50%) is anticipated on the remaining mineral soil areas. In the third step, the effect of a further development of 'climate- and nutrient-optimized cultivation systems' (with combined elements of conventional/organic farming such as grass-clover leys) is analysed. In addition, it is assumed that land use for the production of biogas from main agricultural crops (silage maize) will be largely replaced by land use for human nutrition by 2040. The results show that, despite the loss of agricultural land due to rewetting of peatlands, the sum of these three NCC measures will not provide less food, but rather more food, especially of plant origin, due to the reduction in livestock farming and the abandonment of inefficient land use for biogas production. Further, greenhouse gas (GHG) emissions in the agricultural sector may be reduced by over 65 % compared to 2020. This positive trend will continue after 2040 due to the prospective sink function of rewetted peatland soils. After a discussion of the potentials, recommendations for the implementation of NCC are presented in conclusion.

Literatur

- Agora Agriculture 2024. Agriculture, forestry and food in a climate neutral EU. The land use sectors as part of a sustainable food system and bioeconomy. [AGR 336 Land-use-study WEB 0.pdf](#)
- Akademieunion 2024. Wissenschaftsakademien zeigen: Auch ohne Grundlastkraftwerke ist die Stromversorgung gesichert. Gemeinsame Pressemitteilung (<https://www.akademienunion.de/presse/pressemitteilung/wissenschaftsakademien-zeigen-auch-ohne-grundlastkraftwerke-ist-die-stromversorgung-gesichert>)
- Alderkamp, L.M., Klootwijk, C.W., Schut, A.G.T., Van Der Linden, A., Van Middelaar, C.E., Taube, F., 2025. Integrating crop and dairy production systems: Exploring different strategies to achieve environmental targets. *Science of The Total Environment* 958, 177990. [10.1016/j.scitotenv.2024.177990](#)
- Anonym, 2024. Denmark's Climate Minister wants to expand green agriculture bill (<https://cphpost.dk/2024-05-20/news/climate/climate-minister-calls-for-nitrogen-to-be-included-in-green-tax-on-agriculture/>)
- Antony, D., Collins, C.D., Clark, J.M., Sizmur, T., 2022. Soil organic matter storage in temperate lowland arable, grassland and woodland topsoil and subsoil. *Soil Use Manage* 38, 1532–1546. [10.1111/sum.12801](#)
- Bai, Y., Cotrufo, M.F. 2022. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Sci* 377, 603–608. [10.1126/science.abo2380](#)
- Beye, H., Taube, F., Lange, K., Hasler, M., Kluß, C., Loges, R., Diekötter, T., 2022. Species-Enriched Grass-Clover Mixtures Can Promote Bumblebee Abundance Compared with Intensively Managed Conventional Pastures. *Agron* 12, 1080. [10.3390/agronomy12051080](#)
- Biernat, L., Taube, F., Vogeler, I., Reinsch, T., Kluß, C., Loges, R., 2020. Is organic agriculture in line with the EU-nitrate directive? On-farm nitrate leaching from organic and conventional arable crop rotations. *Agri Ecosyst Environ* 298, 106964. [10.1016/j.agee.2020.106964](#)
- BLE, 2022. Versorgungsbilanz 2021: Selbstversorgungsgrade von Rapsöl und Sonnenblumenöl leicht gestiegen. Presseinformation vom 03.08.2022 ([220803_Versorgungsbilanz_Oel.pdf](#))
- BMU, 2007. Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt - vom Bundeskabinett am 7. Nov 2007 beschlossen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). [Nationale%20Strategie%20zur%20biologischen%20Vielfalt%20Nov.%202007.pdf](#)
- Böhm, J., 2023. Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen – für Strom, Wärme und Verkehr. *BÜL* 101, 1. [10.12767/BUEL.V101I1.462](#)
- Börjesson, G., Bolinder, M.A., Kirchmann, H., Kätterer, T., 2018. Organic carbon stocks in topsoil and subsoil in long-term ley and cereal monoculture rotations. *Biol Fertil Soils* 54, 549–558. [10.1007/s00374-018-1281-x](#)
- DAFA 2015. Fachforum Grünland. Grünland innovativ nutzen und Ressourcen schützen. Forschungsstrategie der Deutschen Agrarforschungsallianz. DAFA [10.4126/FRL01-006404450](#)
- DGE, 2024: Gut essen und trinken – die DGE-Empfehlungen, <https://www.dge.de/gesunde-ernaehrung/gut-essen-und-trinken/dge-empfehlungen/>
- DGE, 2024. Neubewertung der DGE-Position zu veganer Ernährung. Positionspapier der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e. V. *Ernährungs-Umschau* 71, 60–85. [10.4455/eu.2024.22](#)
- Don, A., Flessa, H., Marx, K., Poeplau, C., Tiemeyer, B., Osterburg, B., 2018. Die 4-Promille-Initiative Böden für Ernährungssicherung und Klima. *Thünen* 112, [10.3220/WP1543840339000](#)

- European Commission 2020. Farm to Fork Strategy: For a fair, healthy and environmentally-friendly food system. [f2f action-plan 2020 strategy-info en.pdf](#)
- EEA, 2022. Soil Carbon. European Environment Agency. www.eea.europa.eu/publications/soil-carbon
- Flachowsky, G., Hachenberg, S., 2009. CO₂-Footprints for Food of Animal Origin – Present Stage and Open Questions. J. Verbr. Lebensm. 4, 190–198. [10.1007/s00003-009-0481-6](#)
- FNR, 2022. Basisdaten Bioenergie Deutschland 2022. FNR. <https://mediathek.fnr.de/basisdaten-bioenergie.html>
- Gensior A., Drexler, S., Fuß, R., Stümer, W., Rüter, S. 2023. Treibhausgas-Emissionen durch Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF). Thünen-Institut 24.03.2023 <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/standard-titel>
- Greifswald Mire Centre and Wetlands International Europe 2024. Questions & Answers: Bringing Clarity on Peatland Rewetting and Restoration QA-peatland-rewetting_fin.pdf
- Grethe, H., Martinez, J., Osterburg, B., Taube, F., Thom, F., 2021. Klimaschutz im Agrar- und Ernährungssystem Deutschlands: Die drei zentralen Handlungsfelder auf dem Weg zur Klimaneutralität. Stiftung Klimaneutralität. (2021-06-01-Klimaneutralitaet_Landwirtschaft.pdf)
- Grundmann, P. *et al* (2022) Grass-based circular business models for rural agri-food value chains (GO-GRASS). White Paper for Grassland Opportunities – Discussion Document. [2023_01_23_GO-GRASS-White-Paper-Draft.pdf](#)
- Guillaume, T., Makowski, D., Libohova, Z., Elfouki, S., Fontana, M., Leifeld, J., Bragazza, L., Sinaj, S., 2022. Carbon storage in agricultural topsoils and subsoils is promoted by including temporary grasslands into the crop rotation. Geoderma 422, 115937. [10.1016/j.geoderma.2022.115937](#)
- Guarin, J.R. *et al.*, 2022. Evidence for increasing global wheat yield potential. Environ. Res. Lett. 17, 124045. [10.1088/1748-9326/aca77c](#)
- Haß, M., Deblitz, C., Freund, F., Kreins, P., Laquai, V., Offermann, F., Pelikan, J., Sturm, V., Wegmann, J., Witte, T. de, Wüstemann, F., Zinnbauer, M., 2022. Thünen-Baseline 2022 - 2032: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. [10.3220/REP1667811151000](#)
- Henning, C., Taube, F., 2020. Nährstoffbericht des Landes Schleswig-Holstein. Im Auftrag des MELUND SH. [naehrstoffbericht 2020.pdf](#)
- Hertzler, S.R., Lieblein-Boff, J.C., Weiler, M., Allgeier, C., 2020. Plant Proteins: Assessing Their Nutritional Quality and Effects on Health and Physical Function. Nutrients 12, 3704. [10.3390/nu12123704](#)
- Ifeu, 2019. Kurzstudie zu Einsatz von Biokraftstoffen im Verkehrssektor bis 2030 Kurzstudie zu den Potenzialen an Kraftstoffen auf Basis von Anbaubiomasse sowie biogenen Abfällen und Reststoffen. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) [ifeu Kurzstudie Potenzialschaetzungen fuer Biokraftstoffe im Verkehrssektor.pdf](#)
- IKEM und GMC 2021. Faktenpapier Moore: Wirksamer Klimaschutz in Mecklenburg-Vorpommern. Empfehlungen vom IKEM und GMC. <https://www.ikem.de/faktenpapier-moore-mecklenburg-vorpommern/>
- Isermeyer F. 2022. Photovoltaik auf Agrarflächen – für eine schnelle Energiewende. Dossier. Thünen Institut 28.11.2022 <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/langfristige-politikkonzepte/pv-auf-agrarflaechen>
- Jensen, J.L., Malisch, C.S., Thers, H., Eriksen, J., 2025. Adding forbs and legumes to a grass-clover mixture suppressed weeds and maintained herbage yield and crude protein content across slurry application rates. European Journal of Agronomy 164, 127458. [10.1016/j.eja.2024.127458](#)

- Johnston, A.E., Poulton, P.R., Coleman, K., Macdonald, A.J., White, R.P., 2017. Changes in soil organic matter over 70 years in continuous arable and ley–arable rotations on a sandy loam soil in England. *European J Soil Science* 68, 305–316. [10.1111/ejss.12415](https://doi.org/10.1111/ejss.12415)
- Kozicka, M., Havlík, P., Valin, H., Wollenberg, E., Deppermann, A., Leclère, D., Lauri, P., Moses, R., Boere, E., Frank, S., Davis, C., Park, E., Gurwick, N., 2023. Feeding climate and biodiversity goals with novel plant-based meat and milk alternatives. *Nat Commun* 14, 5316. [10.1038/s41467-023-40899-2](https://doi.org/10.1038/s41467-023-40899-2)
- KSG, 2021. Bundes-Klimaschutzgesetz <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>
- Latacz-Lohmann, D.U., Tiedemann, D.T., Buhk, J.-H., Rannow, W., 2023. Ökonomische Betroffenheit eines angepassten Niederungsmanagements für die Landwirtschaft in Schleswig-Holstein. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft, ländliche Räume, Europa und Verbraucherschutz des Landes Schleswig-Holstein. 76 Seiten. Kieler Institut für Europäische Landwirtschaftsstudien GmbH (KIELS). November 2023. ([2023_gutachten_niederungen.pdf](#))
- Loges, Ralf 1998: Ertrag, Futterqualität, N2-Fixierungsleistung und Vorfruchtwert von Rotklee- und Rotklee-grasbeständen. Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. Universität Kiel. ISSN: 1435-2613
- Loges, R., Bunne, I., Reinsch, T., Malisch, C., Kluß, C., Herrmann, A., Taube, F., 2018. Forage production in rotational systems generates similar yields compared to maize monocultures but improves soil carbon stocks. *Eur J Agron* 97, 11–19. [10.1016/j.eja.2018.04.010](https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.010)
- Lorenz, H., Reinsch, T., Hess, S., Taube, F., 2019. Is low-input dairy farming more climate friendly? A meta-analysis of the carbon footprints of different production systems. *Journal of Cleaner Production* 211, 161–170. [10.1016/j.jclepro.2018.11.113](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.113)
- Loza, C., Verma, S., Wolfram, S., Susenbeth, A., Blank, R., Taube, F., Loges, R., Hasler, M., Kluß, C., Malisch, C.S., 2021. Assessing the Potential of Diverse Forage Mixtures to Reduce Enteric Methane Emissions In Vitro. *Animals*, 11, 1126. [10.3390/ani11041126](https://doi.org/10.3390/ani11041126)
- Manevski, K., Lærke, P.E., Olesen, J.E., Jørgensen, U., 2018. Nitrogen balances of innovative cropping systems for feedstock production to future biorefineries. *SciTot Environ* 633, 372–390. [10.1016/j.scitotenv.2018.03.155](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.155)
- MELUND, 2022. Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft in Schleswig-Holstein und im Vergleich zum Bundesdurchschnitt. Kurzfassungen ([THG_Bericht_2022_kurz.pdf](#))
- MELUND, 2023. Monitoringbericht Energiewende und Klimaschutz in Schleswig-Holstein, Tabellen und Abbildungen ([monitoringbericht_2023_excel.xlsx](#))
- MELUND, 2024. Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft in Schleswig-Holstein und im Vergleich zum Bundesdurchschnitt. Kurzfassung ([THG_Bericht_2024_kurz.pdf](#))
- Mues S., Loges R., Taube F., 2021. Weidemilch vom Acker. DLG-Mitteilungen 11/2021
- Menichetti, L., Ekblad, A., Kätterer, T., 2015. Contribution of roots and amendments to soil carbon accumulation within the soil profile in a long-term field experiment in Sweden. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200, 79–87. [10.1016/j.agee.2014.11.003](https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.11.003)
- Neumann, H., Dierking U., Taube F., 2017. Erprobung und Evaluierung eines neuen Verfahrens für die Bewertung und finanzielle Honorierung der Biodiversitäts-, Klima- und Wasserschutzleistungen landwirtschaftlicher Betriebe („[Gemeinwohlprämie](#)“). *BüL* 95, [10.12767/buel.v95i3.174](https://doi.org/10.12767/buel.v95i3.174)
- Nyameasem, J.K., Taube, F., Kluß, C., Neumann, S., Reinsch, T., 2024. The effects of fertilizer pretreatment on nitrogen cycling in an intensively managed temperate grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 375, 109185. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109185>
- O'Connell, C., & Silva-Santisteban, R. 2023. Environmental colonialism and neocolonialism in Latin America. In *Routledge Handbook of Latin America and the Environment* (pp. 73-86). Routledge.

- Ott, K., 2024. Natural Climate Contributions (NCC) in den Kontexten von Klima-, Umwelt- und Landethik. *Cursor_ Zeitschrift für explorative Theologie*. [10.21428/fb61f6aa.6d7f31e1](https://doi.org/10.21428/fb61f6aa.6d7f31e1)
- Poeplau, C., Aronsson, H., Myrbeck, Å., Kätterer, T., 2015. Effect of perennial ryegrass cover crop on soil organic carbon stocks in southern Sweden. *Geoderma Regional* 4, 126–133. [10.1016/j.geodrs.2015.01.004](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.01.004)
- Poyda, A., Reinsch, T., Struck, I.J., Skinner, R.H., Kluß, C., Taube, F., 2021. Low assimilate partitioning to root biomass is associated with carbon losses at an intensively managed temperate grassland. *Plant Soil* 460, 31–50. [10.1007/s11104-020-04771-2](https://doi.org/10.1007/s11104-020-04771-2)
- Poyda, A., Reinsch, T., Kluß, C., Loges, R., Taube, F., 2016. Greenhouse gas emissions from fen soils used for forage production in northern Germany. *Biogeosciences* 13, 5221–5244. [10.5194/bg-13-5221-2016](https://doi.org/10.5194/bg-13-5221-2016)
- Reinsch, T., Loges, R., Kluß, C., Taube, F., 2018. Effect of grassland ploughing and reseeded on CO₂ emissions and soil carbon stocks. *Agri, Ecosyst Environ* 265, 374–383. [10.1016/j.agee.2018.06.020](https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.020)
- Reinsch, T., Loza, C., Malisch, C.S., Vogeler, I., Kluß, C., Loges, R., Taube, F., 2021. Toward Specialized or Integrated Systems in Northwest Europe: On-Farm Eco-Efficiency of Dairy Farming in Germany. *Front. Sustain. Food Syst.* 5, 614348. [10.3389/fsufs.2021.614348](https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.614348)
- Reinsch, T., Struck, I.J.A., Loges, R., Kluß, C., Taube, F., 2021. Soil carbon dynamics of no-till silage maize in ley systems. *Soil Till Res* 209. [10.1016/j.still.2021.104957](https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104957)
- Rios, JDL., Poyda, A., Reinsch, T., Kluß, C., Taube, F., Loges, R., 2022. Integrating Crop-Livestock System Practices in Forage and Grain-Based Rotations in Northern Germany: Potentials for Soil Carbon Sequestration. *Agronomy* 12, 338. [10.3390/agronomy12020338](https://doi.org/10.3390/agronomy12020338)
- Rockström *et al.*, 2023. Safe and just Earth system boundaries. *Nature*. [10.1038/s41586-023-06083-8](https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8)
- Rodrigues, L., Hardy, B., Huyghebeart, B., Fohrafellner, J., Fornara, D., Barančíková, G., Bárcena, T.G., De Boever, M., Di Bene, C., Feizienė, D., Kätterer, T., Laszlo, P., O’Sullivan, L., Seitz, D., Leifeld, J., 2021. Achievable agricultural soil carbon sequestration across Europe from country-specific estimates. *Global Change Biology* 27, 6363–6380. [10.1111/gcb.15897](https://doi.org/10.1111/gcb.15897)
- Searchinger, T., Zions, J., Wiersenius, S., Peng, L., Beringer, T., Dumas, P., 2021. A Pathway to Carbon Neutral Agriculture in Denmark. *WRIPUB*. [10.46830/wrirpt.20.00006](https://doi.org/10.46830/wrirpt.20.00006)
- Searchinger, T.D., Wiersenius, S., Beringer, T., Dumas, P., 2018. Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature* 564, 249–253. [10.1038/s41586-018-0757-z](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0757-z)
- Schäfer AC, Boeing H, Conrad J, Watzl B für die DGE Arbeitsgruppe Lebensmittelbezogene Ernährungsempfehlungen: Wissenschaftliche Grundlagen der lebensmittelbezogenen Ernährungsempfehlungen für Deutschland. *Methodik und Ableitungskonzepte. Ernährungs-Umschau* 2024; 71(3): M158–66. e5–7. [10.4455/eu.2024.009](https://doi.org/10.4455/eu.2024.009)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.05.001>
- Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S.E., 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49–56. [10.1038/nature10386](https://doi.org/10.1038/nature10386)
- Sieve, F., Wilken, F., Isselstein, J., Kayser, M., 2023. Dreijährige Stoffstrombilanzierung auf Milchviehbetrieben in Nordwest-Niedersachsen unter Anwendung der Novellierungsvorschläge aus dem Evaluierungsbericht der Stoffstrombilanzverordnung (StoffBilV). *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft Aktuelle Beiträge*. [10.12767/BUEL.V101I2.477](https://doi.org/10.12767/BUEL.V101I2.477)

- Singh, A., Afzal, T., Woodbury, B., Wortmann, C., Iqbal, J., 2023. Alfalfa in rotation with annual crops reduced nitrate leaching potential. *J of Env Quality* 52, 930–938. [10.1002/jeq2.20473](https://doi.org/10.1002/jeq2.20473)
- Smit, H.P.J., Reinsch, T., Kluß, C., Loges, R., Taube, F., 2021. Very low nitrogen leaching in grazed ley-arable-systems in northwest europe. *Agron* 11, 2155. [10.3390/agronomy11112155](https://doi.org/10.3390/agronomy11112155)
- Steingäß, H. (2010): Milch vom Grünland – Leistungspotentiale und Fütterungsstrategien. 66. VDLUFA Kongress Kurzfassungen der Vorträge: S. 56–65 ([Kongressband2010.pdf](#))
- Struck, I.J.A., Taube, F., Hoffmann, M., Kluß, C., Herrmann, A., Loges, R., Reinsch, T., 2020. Full greenhouse gas balance of silage maize cultivation following grassland: are no-tillage practices favourable under highly productive soil conditions? *Soil Till Res* 200. [10.1016/j.still.2020.104615](https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104615)
- Svoboda, N., Taube, F., Wienforth, B., Kluß, C., Kage, H., Herrmann, A., 2013. Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize. *Soil Till Res* 130, 69–80. [10.1016/j.still.2013.02.006](https://doi.org/10.1016/j.still.2013.02.006)
- Taube, F., 2021. Ökologische Intensivierung und Hybridlandwirtschaft: Strategien für eine weithin akzeptierte Landwirtschaft in Deutschland. In: Joachim Lange (Hrsg.): Ein Gesellschaftsvertrag für die Landwirtschaft? Loccumer Landwirtschaftstagung 2021, [ISBN 978-3-8172-0421-2 \(pdf\)](#)
- Taube, F., Nyameasem, J.K., Fenger, F., Alderkamp, L., Kluß, C., Loges, R., 2023. Eco-efficiency of leys—the trigger for sustainable integrated crop-dairy farming systems. *Grass Forage Sci* [10.1111/gfs.12639](https://doi.org/10.1111/gfs.12639)
- Taube, F., Vogeler, I., Kluß, C., Herrmann, A., Hasler, M., Rath, J., Loges, R., Malisch, C.S., 2020. Yield Progress in Forage Maize in NW Europe—Breeding Progress or Climate Change Effects? *Front. Plant Sci.* 11, 1214. [10.3389/fpls.2020.01214](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01214)
- Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E.A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Laggner, A., Leiber-Sauheitl, K., Peichl-Brak, M., Drösler, M., 2020. A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators* 109, 105838. [10.1016/j.ecolind.2019.105838](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838)
- Trott, H., Wachendorf, M., Ingwersen, B., Taube, F., 2004. Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. I. Impact of defoliation system and nitrogen input on performance and N balance of grassland. *Grass and Forage science* 59, 41–55. [10.1111/j.1365-2494.2004.00401.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2004.00401.x)
- UBA, 2023. Umweltbundesamt, Nationale Treibhausgas-Inventare 1990 bis 2021 (Stand 03/2023), für 2022 vorläufige Daten (Stand 15.03.2023)
- UBA 2024. Emissionen ausgewählter Treibhausgase in Deutschland nach Kategorien https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/8_tab_thg-emi-kat_2024-04-02.pdf (Stand 15.03.2024)
- UFOP 2017. Rapsfruchtfolgen mit der neuen Düngeverordnung. Mohr R. und Ehmcke-Kasch T. Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen. Hanse Agro Unternehmensberatung GmbH. Hannover https://www.ufop.de/index.php/download_file/view/11469/1366/
- Van Zanten, H.H.E., Herrero, M., Van Hal, O., Röös, E., Muller, A., Garnett, T., Gerber, P.J., Schader, C., De Boer, I.J.M., 2018. Defining a land boundary for sustainable livestock consumption. *Glob Change Biol* 24, 4185–4194. [10.1111/gcb.14321](https://doi.org/10.1111/gcb.14321)
- Van Zanten, H.H.E., Simon, W., Van Selm, B., Wacker, J., Maindl, T.I., Frehner, A., Hijbeek, R., Van Ittersum, M.K., Herrero, M., 2023. Circularity in Europe strengthens the sustainability of the global food system. *Nat Food* 4, 320–330. [10.1038/s43016-023-00734-9](https://doi.org/10.1038/s43016-023-00734-9)
- Vermeulen, S.J., Campbell, B.M., Ingram, J.S.I., 2012. Climate Change and Food Systems. *Annu. Rev Environ Resour* 37, 195. [10.1146/annurev-environ-020411-130608](https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020411-130608)

- Vogeler, I., Böldt, M., Taube, F., 2022. Mineralisation of catch crop residues and N transfer to the subsequent crop. *Sci Tot Environ* 810, 152142. [10.1016/j.scitotenv.2021.152142](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152142)
- WBAE, 2020. Politik für eine nachhaltigere Ernährung: Eine integrierte Ernährungspolitik entwickeln und faire Ernährungsbedingungen gestalten. Spiller, A., B. Renner, L. Voget-Kleschin, U. Arens-Azevedo *et al.* (eds.). BÜL Sonderheft 230. [10.12767/buel.vi230.308](https://doi.org/10.12767/buel.vi230.308)
- Wilkinson, J.M., Lee, M.R.F., 2018. Review: Use of human-edible animal feeds by ruminant livestock. *Animal* 12, 1735–1743. [10.1017/S175173111700218X](https://doi.org/10.1017/S175173111700218X)
- Willett *et al.*, 2019. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet* 393, 447–492. [10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Zehetmeier, M., Baudracco, J., Hoffmann, H., Heißenhuber, A., 2012. Does increasing milk yield per cow reduce greenhouse gas emissions? A system approach. *Animal* 6, 154–166. [10.1017/S1751731111001467](https://doi.org/10.1017/S1751731111001467)
- ZKL 2021. Zukunft Landwirtschaft. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Empfehlungen der Zukunftskommission Landwirtschaft [abschlussbericht-zukunftskommission-landwirtschaft.pdf](https://www.zukunft-landwirtschaft.de/abschlussbericht-zukunftskommission-landwirtschaft.pdf)
- ZKL 2024. Zukunft Landwirtschaft. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe in schwierigen Zeiten – Strategische Leitlinien und Empfehlungen der Zukunftskommission Landwirtschaft [zukunft-landwirtschaft-bericht-2024.pdf](https://www.zukunft-landwirtschaft.de/zukunft-landwirtschaft-bericht-2024.pdf)

Autoren/Autorinnen

Prof. Dr. Friedhelm Taube
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
ftaube@gfo.uni-kiel.de

Dr. John Nyameasem
Universität Bonn
INRES Pflanzenbau
jnyameas@uni-bonn.de

M. Sc. Sandra Koop
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
skoop@gfo.uni-kiel.de

Dipl.-Inf. Christof Kluß
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
ckluss@gfo.uni-kiel.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Projektes „Natural Climate Contributions (NCC) - Eine Potenzialabschätzung für Norddeutschland“ ([35795/01](#)) durchgeführt. Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die Finanzierung des Vorhabens. Ein besonderer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen des Gesamtkonsortiums für die konstruktiven Modul-übergreifenden Diskussionen: Prof. Dr. Konrad Ott, Prof. Dr. Dr. Hans Joosten, Dr. Frederike Neuber, Dr. John Couwenberg, Prof. Dr. Stefan Zerbe, Prof. Dr. Volker Beckmann, Achim Schäfer. Antonia Holland-Cunz, Nina Martin, Melissa Seidel und Gabriela Morais de Souza.