

## Welche Klimawirkungen entstehen auf österreichischen Grünlandbetrieben?

### *What are the climate impacts of Austrian grassland farms?*

Christian Fritz<sup>1\*</sup>, Florian Grassauer<sup>1</sup>, Thomas Guggenberger<sup>1</sup> und Georg Terler<sup>1</sup>



#### Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die Klimawirkungen einer grünlandbasierten Nahrungsmittelproduktion in Österreich auf Basis einer Literaturübersicht dargestellt. Im Zentrum stehen die Vorgänge rund um die Fütterung von Wiederkäuern am Grünlandbetrieb. Grundlegende Erklärungen über das Zusammenspiel von landwirtschaftlicher Praxis und Klimabilanzierung sollen ein besseres Verständnis für die Diskussion rund um den Klimabeitrag von Rind, Schaf und Ziege ermöglichen. Für eine Einordnung werden die Grundlagen zu Klimawandel, menschlich verursachten Treibhausgas-Emissionen und Klimabilanzen erörtert. Die betrieblichen Klimawirkungen werden entlang der Prozesskette vom Futtermittel (Grundfutter und Kraftfutter) beginnend mit Boden und Aufwuchs bis hin zum Düngekreislauf beschrieben. Abschließend wird ein Überblick zu Klimaschutz-Möglichkeiten und Klimabilanzen für den landwirtschaftlichen Betrieb gegeben.

Schlagwörter: Klimawandel, Treibhausgas-Bilanzierung, Wiederkäuer, LCA

#### Summary

This article examines the climate effects of grassland-based food production in Austria based on a literature review. The focus is on the processes related to ruminant feeding on grassland farms. Basic explanations regarding the interplay of agricultural practice and greenhouse gas accounting are given. This should enable a better understanding of the discussion around the climate role of cattle, sheep and goats. Basic principles of climate change, greenhouse gas emissions and carbon footprints are discussed. The climate impacts on the farm are described along the process chain from the feed (forage and concentrate) starting with soil and plant growth up to the fertilizer cycle. Finally, an overview of climate protection measures and climate footprints for farms is given.

Keywords: climate change, greenhouse gas accounting, ruminant, LCA

## 1. Einleitung und Grundlagen

Die Hälfte der landwirtschaftlichen Fläche Österreichs, ein Fünftel Europas und ein Drittel der Erdoberfläche ist von Grünland oder Grasland bedeckt. Wiederkäuer werden als Nutztiere gehalten, um Gras in menschlich verwertbare Nahrung umzuwandeln. Die wiederkäuerbasierte Nahrungsproduktion ist allerdings aufgrund der Klimawirkungen des im Pansen entstehenden Methans in Kritik geraten. Aktuell stellen u.a. mit den

<sup>1</sup> HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Institut für Tier, Technik und Umwelt, Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Institut für Nutztierforschung, Raumberg 38, A-8952 Irnding-Donnersbachtal

\* Ansprechpartner: Mag. Christian Fritz, email: [christian.fritz@raumberg-gumpenstein.at](mailto:christian.fritz@raumberg-gumpenstein.at)

„Fridays for Future“-Bewegungen immer mehr und vor allem junge Menschen die Frage nach der Nachhaltigkeit unseres Wirtschaftens und sprechen dabei auch die Viehhaltung an. Zugleich fordert die Landwirtschaft eine faire Einordnung ihres Klimabeitrags sowie das Anerkennen von klimapositiven Leistungen und der wichtigen Aufgabe der Nahrungsproduktion.

Dieser Beitrag geht mit Fokus auf Österreich der Frage nach, welchen Klimafußabdruck eine grünlandbasierte Lebensmittelproduktion – mitsamt ihrer Viehwirtschaft – tatsächlich hinterlässt. Sind Grünlandbetriebe ohnehin bereits Teil der Lösung? Können sie einen zusätzlichen Klimaschutzbeitrag leisten?

Klimawirkungen, Klimabilanzierung und Klimaschutz sind in der Landwirtschaft und im (österreichischen) Grünland ein junges, komplexes und kontroverses Thema. Der vorliegende Tagungsbeitrag hat das Ziel, den aktuellen Stand des Wissens nachvollziehbar aufzubereiten. Im Fokus steht dabei die betriebliche Perspektive, also die Sicht des Landwirts. Diese sollte jedoch nicht am Hof oder am Feld enden, sondern „Wirkungsendpunkte“, wie die weltweite Ertrags- und Ernährungssituation, miteinschließen.

## 1.1 Klimawandel und Treibhausgase

Ein Teil der Klimaveränderungen geht auf natürliche Prozesse zurück und war immer schon Bestandteil des Erdklimas. Einen wichtigen Einfluss auf die Temperatur an der Erdoberfläche nimmt der Treibhauseffekt: Die Atmosphäre ist für die eingehende kurzwellige Sonnenstrahlung weitgehend durchlässig, wohingegen die von der Erde ausgehende langwellige Wärmeabstrahlung zum Teil behindert wird. Konkret weisen verschiedene Gase (bzw. Moleküle) in der Atmosphäre ein unterschiedliches Strahlungsabsorptions- und Reflexionsverhalten und damit unterschiedliche Treibhauswirkungen auf.

Menschliche Aktivitäten haben in den letzten Jahrhunderten insbesondere die Anteile der Treibhausgase  $\text{CO}_2$  (Kohlendioxid),  $\text{CH}_4$  (Methan) und  $\text{N}_2\text{O}$  (Lachgas) in der Atmosphäre enorm verändert. Allen voran wurden mit der Industrialisierung rund 650 Mrd. t Kohlenstoff (C) von der Erdkruste (Lithosphäre) in die Atmosphäre verlagert – durch Abbau und Verbrennung von fossilen Brennstoffen wie Kohle, Erdöl und Erdgas.<sup>1</sup> Damit ist die C-Menge in der Atmosphäre von rund 600 Mrd. t (< 300 ppm) auf über 900 Mrd. t (> 400 ppm) gestiegen.<sup>2</sup> Bei Abbau, Transport, Verarbeitung und Verbrennung von fossilen Energieträgern werden zusätzlich zu  $\text{CO}_2$  auch erhebliche Mengen an  $\text{CH}_4$  frei, bspw. beim Kohleabbau, durch Lecks in Erdgasleitungen oder beim Fracking von Schiefergas. Zu dieser eindeutig menschengemachten Freisetzung fossiler Emissionen auf Kohlenstoffbasis kommen technisch verursachte Treibhausgas-Emission hinzu, bspw.  $\text{N}_2\text{O}$  und F-Gase<sup>3</sup> aus industriellen Prozessen.

## 1.2 Klimawirkungen aus der Grünlandwirtschaft

Neben den oben beschriebenen, klar anthropogenen Emissionen gibt es eine große Zahl an Prozessen, die grundsätzlich biogen (natürlich) sind, bis zu einem bestimmten Grad aber durch menschliches Zutun verändert oder beeinflusst werden. Hierzu zählt bspw. die Bildung von  $\text{CH}_4$  bei der Fermentation von Futtermitteln im Pansen von Wiederkäuern, die seit Beginn des Ackerbaus von Menschen als Nutztiere gehalten werden. Die Abholzung von Wäldern und der Umbruch von Böden setzen  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre frei. Eine weitere menschenbeeinflusste Klimawirkung kann von erhöhten  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen aufgrund einer organischen oder mineralischen Düngung ausgehen. Die Verfügbarkeit

<sup>1</sup> Bspw. setzt die Verbrennung von 1 Liter Diesel rund 3 kg  $\text{CO}_2$  frei.

<sup>2</sup> In der Vergangenheit haben Ozeane und Landbiomasse einen enormen Teil der Emissionen aufgefangen (rund die Hälfte der 650 Mrd. t des seit Beginn der Industrialisierung freigesetzten Kohlenstoffs).

<sup>3</sup> F-Gase ist ein Sammelbegriff für florierte Treibhausgase, bspw. HFKW als Kältemittel in Klimaanlage.

zusätzlicher N-Düngermengen aus der Düngemittelindustrie erhöht die Chance für N<sub>2</sub>O-Emissionen aus Nitrifikation und Denitrifikation im Boden. Zusätzlich werden bei der Mineraldünger-Produktion fossile Energieträger verbrannt und Treibhausgase erzeugt (vorgelagerte Emissionen).

Parallel zu den klimaerwärmenden Effekten gehen vom Sektor Landwirtschaft auch „klima-positive“ Wirkungen aus. Zum einen enthalten Grünlandböden erhebliche Mengen an C, zum anderen kann die Bewirtschaftung zu einer C-Einlagerung in den Boden beitragen. Eine funktionale (nachhaltige) Landwirtschaft kann also neben der Nahrungsproduktion auch zum Klimaschutz beitragen. Neben den positiven Effekten gibt es zwei weitere Gründe dafür, von Klimawirkungen anstatt bloß von Treibhausgas-Emissionen zu sprechen: erstens Klimawirkungen durch beeinflusste Landnutzungsänderungen und zweitens Auswirkungen in Richtung Lebensmittel-Konsum. Ein häufig genanntes Beispiel ist, dass Teile der Lebensmittelproduktion ins Ausland abwandern könnten („Leakage-Effekt“) und dies mit höheren Treibhausgas-Emissionen einhergehen kann.<sup>4</sup>

Klimawirkungen aus dem Grünland betreffen also:

- Fossile Emissionen (vorgelagerte Wertschöpfungskette, zugekaufte Betriebsmittel)
- Veränderte/beschleunigte C- und N-Kreisläufe
- Landnutzung und Landnutzungsänderungen (mittelbare Wirkungen)
- Induzierte Effekte in nachgelagerten Sektoren (Verarbeitung bis Konsument)

### 1.3 Klimabilanzen vs. Klimawirkungen

Grundlegend ist zu unterscheiden zwischen (1) dem Ausstoß bzw. der Bindung einer treibhausrelevanten Substanz, (2) einer modellhaften Abbildung in einer Klimabilanz und (3) der damit assoziierten Wirkung auf das Klima. Klimabilanzen zeigen die rechnerische Summe aus Treibhausgas-Emission und klimarelevanten Bindungen (Kohlenstoffverlagerung zwischen Atmosphäre und Bio/Pedosphäre). Das bilanzielle Sachergebnis wird auf die (aktuelle) Situation der globalen Erwärmung bezogen. Hieraus ergibt sich die berechnete (potenzielle) Klimawirkung. Folgendes Bild verdeutlicht das Argument: Gäbe es weltweit nur einen einzigen Rinderbetrieb oder auch nur ein einziges Kohlekraftwerk, so würden diese zwar eine Emission erzeugen, aber noch keine Klimaänderung herbeiführen. Gleichermaßen steht die Interpretation der Treibhausgas-Emissionen aus dem österreichischen Grünland im Kontext der globalen Entwicklung von Weltbevölkerung, Tierzahlen und Atmosphäre.

Vor dem Hintergrund der Verschmutzung der Atmosphäre aufgrund des vergangenen und gegenwärtigen menschlichen Handelns („fossiles Zeitalter“) gibt es vier wesentliche Klimawirkungsbereiche der österreichischen Landwirtschaft: (1) zugekaufte fossile Energieträger, Baustoffe, Maschinen und Düngemittel, (2) zugekaufte Futtermittel und induzierte Landnutzungsänderungen, (3) Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden und Düngermanagement sowie (4) Emissionen aus der Tierhaltung. Betrachtet man die nationale Hoftor-Bilanz, so kommt jedem dieser vier Bereiche ein (ähnlich) großer Anteil zu. Demgegenüber zeigt die nationale Klimaberichterstattung die territorialen Emissionen (innerhalb Österreichs), hier stehen die Bereiche (3) und (4) im Fokus (*Abbildung 1*).<sup>5</sup>

Für einen Vergleich und eine gemeinsame Darstellung unterschiedlicher Treibhausgase (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) werden diese mit Hilfe von Umrechnungsfaktoren in sog. CO<sub>2</sub>-Äquivalente

---

<sup>4</sup> Für Wirtschaftsbereiche innerhalb des europäischen Emissionshandelssystems (ETS) besteht bereits seit Jahren eine „Ausnahmeliste“ jener Sektoren und Teilspektoren, für die ein erhebliches Risiko der Verlagerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen angenommen wird, und deren Produktion daher im Inland gehalten werden soll.

<sup>5</sup> Die Bereiche (3) und (4) weisen in den letzten Jahren einen leicht abnehmenden Trend auf. Der Trend bei den Bereichen (1) und (2) ist unklar.

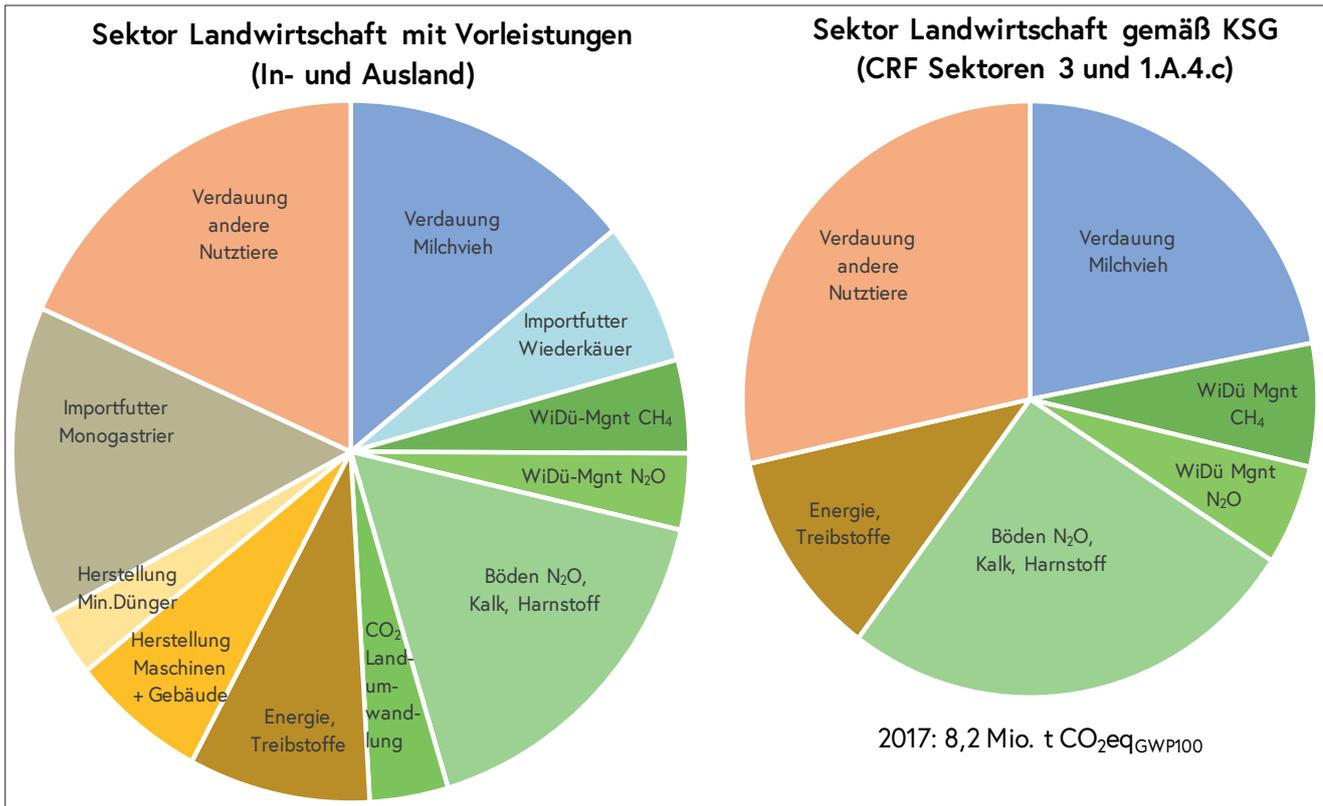


Abbildung 1: Anteile landwirtschaftlicher Teilbereiche, CO<sub>2</sub>eq GWP<sub>100</sub>. Die rechte Seite zeigt die öst. Treibhausgas-Emissionen gemäß Klimaschutzgesetz. Die linke Seite erweitert diese um eine Abschätzung der Vorleistungen auf Basis einer Hochrechnung nationaler LCA-Studien (FRITZ und GRASSAUER 2020).

umgerechnet („Charakterisierung“). Die Bezeichnung CO<sub>2</sub>eq<sub>GWP100</sub> besagt, dass eine Umrechnung auf Basis der Metrik „Treibhauspotenzial“ (Global Warming Potential) für einen 100-jährigen Zeitraum erfolgt (GWP100).<sup>6</sup> Die Auswahl einer Umrechnungs-Metrik hat für die Viehwirtschaft eine große Bedeutung (LYNCH 2019).

## 2. Betriebliche Klimawirkungen

Aus der Produktion am landwirtschaftlichen Betrieb fallen direkte (primäre) Klimawirkungen (Feld, Tier, Stall usw.) sowie vorgelagerte Klimawirkungen aus dem Betriebsmittelzukauf an. Hinzu kommen indirekte (sekundäre) Wirkungen in umliegenden Ökosystemen (insbesondere aufgrund von N-Austrag). In betrieblichen Klimabilanzen werden die Informationen aus den einzelnen Teilbereichen zusammengefasst und klimarelevante Emissionen und klimarelevante Bindungen einander gegenübergestellt.

### 2.1 Photosynthese, Atmung, Humus-C

Beim Aufwuchs von Pflanzen wird im Zuge der Photosynthese CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufgenommen. Kohlenstoff (C) wird einerseits in Bodenorganismen und Wurzeln und andererseits im oberirdischen Aufwuchs und somit im Grundfutter eingelagert (1.000 bis 4.000 kg C pro Hektar) (SPANISCHBERGER und MITTERBÖCK 2015). Ein Großteil des organischen C im Futtermittel ist verdaulich (rund 70 %). Dieser verdauliche C wird von

<sup>6</sup> Neben GWP100 sind auch andere Metriken anhand der Berechnungen des Weltklimarats (IPCC) verfügbar (z.B. GWP20 und GTP100, Global Temperature Potential). Die Auswahl einer Metrik ist jeweils sachbezogen zu treffen; seit dem Protokoll von Kyoto (1997) und mit dem Pariser Abkommen (2015) hat sich allerdings die Metrik GWP100 in der internationalen Bilanzierung und im Forschungsmainstream zu Lebenszyklusanalysen (LCA) weit verbreitet (BALCOMBE 2019, LORENZ et al. 2019, POORE und NEMECEK 2019, MYHRE et al. 2014).

den Wiederkäuern als Energiequelle genutzt und anschließend zum größten Teil wieder als CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre freigesetzt.<sup>7</sup> Der nicht verdauliche Teil des C (rund 30 %) fällt als Wirtschaftsdünger an (SOUSSANA et al. 2007).

Zwischen Boden und Atmosphäre kann es durch Einlagerung und Ausgasung zu treibhausrelevanten Verschiebungen von C kommen. Eine kontinuierliche Grünlandbewirtschaftung wird mit C-Stabilität bzw. auch mit C-Einlagerung assoziiert (C-Sequestrierung). Eine Umwandlung zu Ackerland stellt meist eine Treibhausgasquelle dar. Beim Umbruch wird organische Substanz mineralisiert und gebundenes CO<sub>2</sub> freigesetzt (auch NO<sub>3</sub> und N<sub>2</sub>O). Hierbei gehen bereits im ersten Jahr erhebliche Mengen in die Atmosphäre verloren. Damit korrespondieren die österreichischen Inventarwerte für organischen C: Acker (59,5 t/ha) < intensives Grünland (81 t/ha) < extensives Grünland (Almen) (119 t/ha) (SPANISCHBERGER und MITTERBÖCK 2015).

Eine mögliche C-Sequestrierung erfolgt über viele Jahrzehnte. Sie unterliegt einer Sättigung, d.h. im Laufe von Jahrzehnten der angepassten Grünlandbewirtschaftung wird ein Gleichgewicht im Boden erreicht und nur mehr wenig zusätzliches C aus der Atmosphäre eingelagert. Die jeweilige Bodensituation bestimmt also die Möglichkeit einer Netto-Einlagerung. International besteht eine umfangreiche Kontroverse darüber, welcher positive Klimabeitrag der C-Sequestrierung in landwirtschaftlichen Böden und Grünlandböden zukommen kann. Ein Aspekt betrifft den genannten Sättigungspunkt, ein anderer die Gewährleistung der Dauerhaftigkeit einer Einlagerung (POWLSON et al. 2011, WIESMEIER et al. 2017, SCHIEFER et al. 2018, SMITH und LAMPKIN 2019).

Unumstritten ist, dass die Rate der möglichen C-Einlagerung mit zunehmendem C-Gehalt abnimmt. Österreichisches Grünland weist durchwegs hohe C-Gehalte auf (SPANISCHBERGER und MITTERBÖCK 2015). Insofern ist für langfristig als Dauergrünland bewirtschaftete Flächen von keinen wirkmächtigen Steigerungen auszugehen. Für andere Grünlandflächen könnte hingegen Potenzial bestehen. Eine Abschätzung für Bayern zeigt, dass die vielfach angepeilte C-Einlagerung (sog. 4 %-Initiative) nur zu einem Drittel erreicht werden könnte; nichtsdestotrotz wäre sie ein Klimaschutzbeitrag (WIESMEIER et al. 2017).

## 2.2 N<sub>2</sub>O aus Grünlandböden

Im Boden entstehen aus vielfältigen N-Transformationsprozessen N<sub>2</sub>O-Ausgasungen (mikrobielle Vorgänge der Nitrifikation und Denitrifikation). Diese wiegen als Treibhausgas-Emission rund 200- bis 300-fach schwerer als CO<sub>2</sub> (MYHRE et al. 2014) (Table 8.7). Die Höhe der Emissionen variiert erheblich und ist abhängig von der Menge an Substrat (C und N) für die unterschiedlichen Reaktionen, von Wasser- und damit Sauerstoffgehalt und pH-Wert im Boden (WRAGE 2010). Insbesondere eine Kombination aus hohem Stickstoffeinsatz, feuchten und verdichteten Böden gilt als problematisch (SCHMEER et al. 2009). Ein Grünlandumbruch kann (neben Nitrataustrag und CO<sub>2</sub>-Freisetzung) über erhöhte Mineralisation auch zu N-Verlusten und somit zu einer Freisetzung von N<sub>2</sub>O führen (SPANISCHBERGER und MITTERBÖCK 2015).

Vermindert werden können Treibhausgas-Emissionen im Grünland durch eine bedarfsgerechte Düngung sowie eine Vermeidung von Bodenverdichtung. Es besteht eine hohe Möglichkeit zur Einflussnahme durch den Landwirt, da die ausgebrachte Düngermenge stark auf die N<sub>2</sub>O Produktion einwirkt (SCHMEER et al. 2009, WRAGE 2010). Für die Verlustrate entscheidend ist, ob eine (zeitnahe) Aufnahme des verfügbaren Stickstoffs über ein Pflanzenwachstum erfolgt, oder ob der Stickstoff für die Denitrifikation aufgenommen

---

<sup>7</sup> Aufgrund dieser nur kurzfristigen Speicherung werden die CO<sub>2</sub>-Wirkungen von Grünlandaufwuchs und tierischer Zellatmung häufig nicht dargestellt (d.h. bilanziell mit Null angenommen) (bspw. Arbeitsgruppe BEK 2016).

wird. „Eine in Bezug auf Ort, Zeitpunkt und Menge bedarfsgerechte Düngung hilft daher, die N<sub>2</sub>O-Emissionen zu verringern“ (WRAGE 2010).

In Treibhausgas-Bilanzen werden die N<sub>2</sub>O-Emissionen aus dem Pflanzenbau vielfach nach IPCC Tier 1 berechnet. Berücksichtigt werden hierbei die N-Einbringung aus Wirtschafts- und Mineräldünger und Ernterückständen (direkte Emissionen), die gasförmigen N-Verluste (NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O und N<sub>2</sub>) sowie N-Verluste aus der Nitratauswaschung (indirekte N<sub>2</sub>O-Emissionen). Hierbei wird ein Emissionsfaktor von rund 1 % des eingebrachten bzw. emittierten N angesetzt.

### 2.3 CH<sub>4</sub> aus Verdauung

Ein kleiner Teil des verdaulichen C im Grundfutter (rund 5 %) wird in den Vormägen der Wiederkäuer zu CH<sub>4</sub> umgesetzt (SOUSSANA et al. 2007). Der größte Teil des CH<sub>4</sub> aus der Landwirtschaft stammt aus dieser enterischen Fermentation. Dabei handelt es sich um eine biogene und nicht um eine fossile Emission. Das C-Atom in der CH<sub>4</sub>-Verbindung stammt aus dem atmosphärischen Kreislauf, gebunden durch Photosynthese beim Futtermittelwachstum. Nichtsdestotrotz verbleibt das CH<sub>4</sub> für eine mittlere Dauer von 12,4 Jahren in der Atmosphäre<sup>8</sup> und wirkt während dieser Zeit ca. um den Faktor 100 stärker klimaschädlich als CO<sub>2</sub>.<sup>9</sup> Die Klimawirkung ist abhängig von der globalen Treibhaussituation und der atmosphärischen CH<sub>4</sub>-Konzentration, also von vergangenen Emissionen aus allen Sektoren.

Im Klimaschutz kommt CH<sub>4</sub> nach CO<sub>2</sub> das zweitgrößte Augenmerk zu, da global ein sehr starker Anstieg verzeichnet wird. Bei einer Zurechnung der jährlichen Methanemissionen über verschiedene Treibhausgase und Wirtschaftssektoren hinweg entsprechen die enterischen Methanemissionen ca. 5 % aller österreichischen Treibhausgas-Emissionen (ANDERL et al. 2019) (bei CO<sub>2</sub>eq<sub>GWP100</sub>). Methan akkumuliert sich allerdings nicht dauerhaft in der Atmosphäre, da es eben durchschnittlich nach 10 bis 15 Jahren umgewandelt wird. Das bedeutet vereinfacht gesagt, dass die CH<sub>4</sub>-Konzentration in der Atmosphäre aufgrund der Tierhaltung nur dann steigt, wenn die Tierzahlen und/oder das Leistungsniveau gesteigert werden. In Österreich sind die Tierzahlen seit 1990 gesunken, global hat jedoch die Tierhaltung in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen.

Es gibt unterschiedliche Vorgehensweisen zur Berechnung der Methanmenge aus enterischer Fermentation. Häufig wird der Bestand einer Tierkategorie mit einem Emissionsfaktor (kg CH<sub>4</sub> pro Tier und Jahr) multipliziert (IPCC Tier 1). Milchkühe werden meist genauer berechnet (IPCC Tier 2), indem auch das Leistungsniveau und die Futteraufnahme berücksichtigt werden.

### 2.4 Eingesetzte Futtermittel

Verschiedene Futtermittel weisen unterschiedliche Klimawirkungen auf. Tendenziell gilt Grundfutter < Getreide < Proteinkraftfutter. Ein hoher Grundfutteranteil bedeutet aufgrund des starken Flächenbezugs zudem eine räumliche Begrenzung der Tierhaltung. Der Tierbesatz entscheidet dann über die Menge an CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O-Emissionen pro Fläche. Eine überwiegende Weidehaltung kann darüber hinaus auch den fossilen Energie-

<sup>8</sup> Eine Umwandlung erfolgt großteils über eine chemische Reaktion mit dem Hydroxyl-Radikal OH in der Troposphäre, daher ist die Verweilzeit u.a. abhängig von der Verfügbarkeit dieses Reaktionspartners und von der Menge an CH<sub>4</sub> in der Atmosphäre (<https://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Methan>).

<sup>9</sup> Die relative Wirkung von CH<sub>4</sub> gegenüber CO<sub>2</sub> liegt je nach Umrechnungsmetrik zwischen 2 und 200 (BAL-COMBE 2019, IPCC 2013). Anhand des Treibhauspotenzials über einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet ergeben sich die vielfach zitierten Faktoren: Aktuell (Stand IPCC 2013) GWP<sub>100</sub> 1 Einheit CH<sub>4</sub> entspricht 28 CO<sub>2</sub>eq<sub>GWP100</sub> bzw. GTP<sub>100</sub> 1 Einheit CH<sub>4</sub> entspricht 4,3 CO<sub>2</sub>eq<sub>GTP100</sub> (ohne Climate Carbon Feedbacks) (MYHRE et al. 2014).

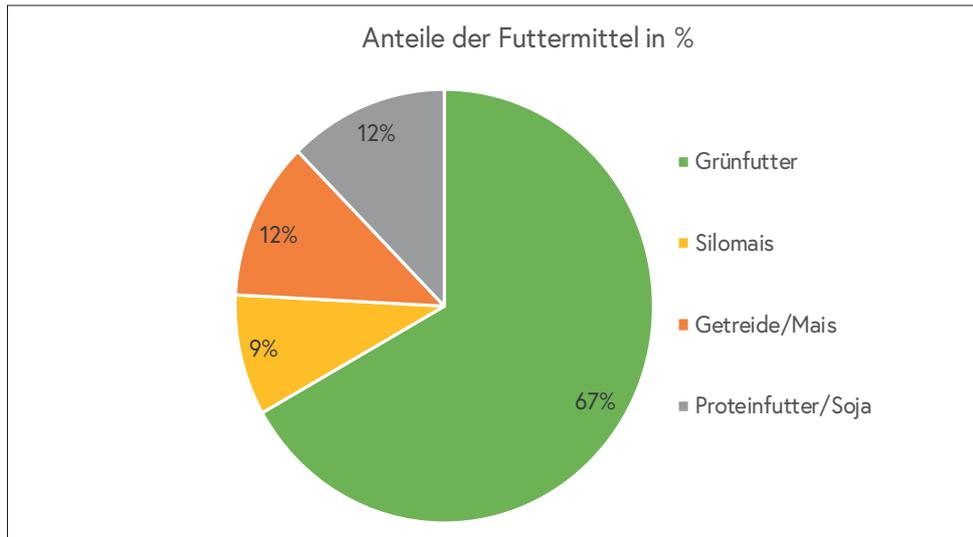


Abbildung 2: Eiweißquellen für Wiederkäuer in Österreich, Anteile der Futtermittel an Eiweiß-Trockenmasse (eigene Darstellung, Daten FEITZLMAYR 2018)

bedarf verringern.<sup>10</sup> Die Klimawirkung betriebseigener Ackerfuttermittel unterscheidet sich insbesondere nach Düngungsmanagement und N-Effizienz, Fruchtfolgegestaltung (Leguminosen) und Mineraldüngeranwendung.

Durch einen Zukauf von Futtermitteln werden Produktionsschritte in die vorgelagerte Wertschöpfungskette verschoben. Damit entstehen an vorgelagerten Stellen Emissionen durch fossile Energieträger, aus Landnutzung und Landumwandlung (z.B. zu Acker), durch eingesetzte Düngemittel usw. Hinzu kommen Emissionen aus Transport, Verarbeitung und Logistik. Am viehhaltenden Betrieb werden unterschiedlichste Futtermittel (z.B. Grundfutter vs. Kraftfutter, Energie- vs. Proteinfutter) von verschiedenen Produzenten, Regionen und Händlern zugekauft, deren Klimawirkungen unterschiedlich ausfallen.

Das Prinzip der Klimawirkungen aus dem Futtermittelzukauf soll kurz mit Blick auf den Einsatz von Proteinkraftfutter in der österreichischen Wiederkäuerfütterung betrachtet werden. Allgemein stellt Grünland ein eiweißreiches Futtermittel zur Verfügung, das in keiner Landnutzungs Konkurrenz zur menschlichen Ernährung steht (EITZINGER et al. 2014). Zugleich stammt ca. ein Drittel der Eiweißmenge in der österreichischen Fütterung für Rinder, Schafe und Ziegen nicht aus dem Grünland und teilweise nicht aus Österreich (FEITZLMAYER 2018, RESL et al. 2019) (*Abbildung 2*). Speziell durch die Landnutzungsänderungen, die Verarbeitung und den Transport von Sojabohnen nach Europa werden beträchtliche Treibhausgas-Emissionen verursacht (FLESSA et al. 2012). Insgesamt wurde der globale Futtermittel-Handel von 1960 auf 2010 ca. um den Faktor 10 gesteigert. Weizen, Reis und Hülsenfrüchte waren bereits damals gängige Handelsgüter, wohingegen Futtermittel auf Basis von Soja, Raps, Sonnenblumen und Palmöl innerhalb weniger Jahrzehnte enorme Handelszuwächse erfahren haben. Nach Österreich werden nach wie vor enorme Mengen an Soja, Raps und Sonnenblume bzw. deren Extraktionsschrote importiert (AWI 2020).

Die Nahrungsproduktion der einzelnen Betriebe und auch der Klimaschutz stehen vor demselben Dilemma. Die Grünlandflächen stellen zwar die Produktions- und Existenzgrundlage dar, Handels-Futtermittel und ein Kraftfutareinsatz steigern aber eventuell die Produktivität und den Gewinn. Die Klimawirkung der Betriebsentscheidung eines Wiederkäuer-haltenden Landwirts kann nur schwer beziffert werden – einerseits auf-

<sup>10</sup> Durch eine konzentrierte Kotablage kann es punktuell zu hohen N<sub>2</sub>O-Emissionen kommen, insbesondere in Kombination mit lokaler Bodenverdichtung. Zugleich enthalten die Exkremente auch emissionsmindernde Inhaltsstoffe (WRAGE 2010).

grund der vielfältigen Handelsströme für Futtermittel und andererseits aufgrund der unklaren Bewertung der Flächen-, Futter- und Nahrungskonkurrenz zur monogastrischen Nutzung. Um klare Empfehlungen ableiten zu können, ist die Erstellung von Futtermittel-Ökoinventaren für Österreich eine aktuelle Aufgabe der anwendungsorientierten Forschung. Ein deutscher Standardwert für zugekaufte Kraftfutterkomponenten beträgt  $0,58 \text{ kg CO}_2\text{eq}_{\text{GWP100}}/\text{kg TM}$ . Grassilage liegt bei  $0,16 \text{ kg CO}_2\text{eq}_{\text{GWP100}}/\text{kg TM}$  (EFFENBERGER et al. 2016). Emissionen aus Futtermitteln wie Weizen, Rapskorn, Palmextraktionsschrot und Sojaschrot liegen deutlich höher. Je nach Herkunft und Bewertungsmethode resultieren unterschiedliche Treibhausgas-Emissionen (Bsp. Soja Europa ca.  $1 \text{ kg}$  und Soja Brasilien ca.  $10 \text{ kg CO}_2\text{eq}_{\text{GWP100}}/\text{kg TM}$ , ecoinvent database) (HÖRTENHUBER et al. 2014, EFFENBERGER et al. 2016). Klimaschutzansätze könnten eine Herkunftskennzeichnung oder auch das Hinterlegen ökologischer Kriterien in Rations-Rechnern sein (ALIG et al. 2015).

## 2.5 Düngungsmanagement

Über die Klimawirkung der Düngung entscheiden N-Bilanz, N-Management (Düngeplanung und -organisation) und N-Effizienz. Primär entstehen bei der Lagerung von Wirtschaftsdünger  $\text{CH}_4$ - und bei der Ausbringung  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen. Bei wärmeren Temperaturen und bei offenen Güllelagern entstehen höhere  $\text{CH}_4$ -Emissionen. Für geringe  $\text{N}_2\text{O}$ -Verluste sollte die Ausbringung zeitlich und örtlich optimiert bei entsprechend hohem N-Bedarf der Pflanzen erfolgen. Die Ausbringungswirkung ist für Wirtschaftsdünger und Mineraldünger ähnlich, Mineraldünger implizieren jedoch hohe Emissionen im Zuge der Herstellung.

Als Klimaschutzmaßnahmen gelten eine systematische Planung des Wirtschaftsdünger-Einsatzes sowie verlustarme Lagerung und Ausbringung (bodennah). Eine geringe N-Einbringung (aus Futter- und Düngemitteln) verringert das Emissionsniveau. Diskutiert werden als technische Maßnahmen zur  $\text{CH}_4$ -Reduktion eine feste Abdeckung von Güllelagern, Gülleseparation (Verringerung C-Gehalt) und die Vergärung von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen.<sup>11</sup>

## 2.6 Energie, Gebäude und Maschinen

Ungefähr 15 % der produktionsseitigen Emissionen entfallen auf Energie, Gebäude und Maschinen. Hierbei entfallen ungefähr 10 % auf Treibstoffe/Heizstoffe (Diesel, Öl, Gas) und Strom und 5 % auf Gebäude, Maschinen und deren Instandhaltung (OSTERBURG et al. 2013, ANDERL et al. 2019, FRITZ und GRASSAUER 2020).

Als Klimaschutzmaßnahme gilt insbesondere eine lange Nutzungsdauer und gute Instandhaltung von Gebäuden und Maschinen. Klimapositiv können auch die Nutzung von Maschinengemeinschaften, effiziente Feldarbeitsgänge und Feld-Hof-Entfernungen, geringe LKW-Transporte und die Art der genutzten Energie am Betrieb (z.B. Hackschnitzel) wirken.

Insgesamt werden die Vorleistungs-Emissionen mit rund 40 % der Gesamtemissionen des Sektors Landwirtschaft abgeschätzt (OSTERBURG et al. 2013). Das heißt, dass die landwirtschaftlichen Emissionen um 2/3 höher liegen, wenn auch die zugekauften Futter- und Düngemittel, Energie, Gebäude und Maschinen mit eingerechnet werden.

---

<sup>11</sup> Aufgrund des geringen Gaspotenzials ergibt sich allerdings eine geringe Energieeffizienz. Verfügbar sind hauptsächlich Großanlagen und kaum geeignete Anlagen für die durchschnittliche Betriebsgröße in Österreich. Eine Vergärung von Wirtschaftsdünger in zentralen Biogasanlagen erzeugt aber Transportaufwand und birgt die Gefahr für lokale Verdichtungen der Anfallsmengen (höheres Treibhauspotential von  $\text{N}_2\text{O}$  gegenüber  $\text{CH}_4$ ).

### 3. Minderungsmaßnahmen am Betrieb

Im österreichischen Sachstandsbericht empfohlen werden „standortangepasste“, „ressourcenschonende“ und „ressourceneffiziente“ Bewirtschaftungskonzepte (EITZINGER et al. 2014). Konkrete Maßnahmen bieten die Nutzung der Grünlandflächen, ein gutes Betriebs- und Tiermanagement und ein angepasstes Fütterungs- und Leistungsniveau.

#### 3.1 Minderungsmaßnahmen im Grünland

Ein vordergründiges Ziel aus Klimasicht liegt in der Bestandserhaltung von Dauergrünland über viele Jahrzehnte. Eine dauerhafte Vermeidung des Umbruchs kann CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen einsparen. Eine umbruchlose Erneuerung verhindert einen Abbau des organischen Kohlenstoffs im Boden. Techniken wie Fräsen oder Schlitzen können aber ebenfalls hohe Emissionen implizieren. Eine Übersaat ist daher zu bevorzugen (FLESSA et al. 2012, ALIG et al. 2015, SPANISCHBERGER und MITTERBÖCK 2015).

Insgesamt führen SOUSSANA et al. (2010) folgende Grünland-Bewirtschaftungspraktiken für Kohlenstoff-Erhalt bzw. -Erhöhung an:

- Grünlandumbruch minimieren
- Vermeidung von Bodenbearbeitung
- Mäßige Intensivierung nährstoffarmer Grünlandbestände
- Angepasste Beweidungsintensität (kein zu hoher Tierbesatz)
- Verlängerung der Nutzungsdauer von Wechselwiesen
- Umwandlung in gemischte Gras-Leguminosen-Bestände oder in permanentes Grasland

#### 3.2 Management, Fütterung und N-Effizienz

Eine Verbesserung von Tiergesundheit, Nutzungsdauer und biologischer Parameter kann zu günstigen Klimaeffekten beitragen. Am Milchviehbetrieb gehen ein hohes Fruchtbarkeitsniveau und eine geringe Remontierungsrate ohnehin mit betriebswirtschaftlichen Zielen einher (FLESSA et al. 2012, ALIG et al. 2015, ZEHETMEIER et al. 2017). Je nach Leistungsniveau kann auch mit einer Erhöhung des Weideanteils ein positiver Klimaeffekt erzielt werden. Auch Zweinutzungsrassen für Milch und Fleisch können Vorteile bringen, wenn Emissionen aus einer anderswo erfolgenden Erzeugung von Rindfleisch vermieden werden können (KIEFER et al. 2014, LORENZ et al. 2019). Insgesamt kommt ein wesentlicher Teil der Unterschiede zwischen Betrieben über effiziente Fütterung (tatsächliche Fütterung gegenüber Normbedarf), effiziente N-Düngung (Ausbringung gegenüber Entzug) und Remontierungsrate zustande (ZEHETMEIER et al. 2017). Einer Fütterungsoptimierung in der Milchkuhhaltung sind insofern Grenzen gesetzt, als hier nur selten N-Überschüsse bestehen. Eine Optimierung der Grundfutterqualität (geringer Fasergehalt) und eine Verringerung von Futtermittelnverlusten werden betriebswirtschaftlich meist ohnehin angestrebt.

Eine Produktionsintensivierung bzw. eine Erhöhung der Rationsqualität über Kraftfutter ist kritisch zu beurteilen. Einerseits weisen viele Lebenszyklusanalysen darauf hin, dass die CH<sub>4</sub>-Emissionen pro kg Milch bei höherer Futtereffizienz zurückgehen. Andererseits ist wahrscheinlich, dass damit die absolute CH<sub>4</sub>-Produktionsmenge steigt bzw. auch Emissionen aus Böden, Landnutzung und Düngemittelproduktion ansteigen (insbesondere CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O).<sup>12</sup> Unter bestimmten Umständen kann die spezifische Klimawirkung

---

<sup>12</sup> Verschiebungen sind wirkmächtig, denn weltweit und auch europaweit betrachtet liegen die CH<sub>4</sub>-Emissionen aus der enterischen Fermentation, die N<sub>2</sub>O-Emissionen aus der Futtermittelproduktion und die Emissionen aus der Landumwandlung für Futtermittelanbau in etwa gleich auf. (Global jeweils ungefähr 2 Gt CO<sub>2</sub>eq<sub>GWP100,2006</sub> pro Jahr; HERRERO et al. 2015) (Europa: BELLARBY et al. 2012).

(kg CO<sub>2</sub>eq pro kg ECM) sinken, wenn weniger Milchkühe (Erhaltungsbedarf) für eine bestimmte Milchmenge erforderlich sind. LORENZ et al. (2019) liefern eine eingeschränkte Bestätigung für diesen Befund anhand einer Literaturstudie (n=30 internationale LCA) für verschiedene Haltungssysteme.<sup>13</sup> Je nach Studie ist der Effekt derart ausgeprägt, dass er höhere Emissionen aus Kraftfuttereinsatz und Remontierung überlagern kann (ebd.). Andererseits stellen ZEHETMEIER und ZERHUSEN (2017) nur einen geringen Zusammenhang von Milchleistungsniveau und Treibhausgas-Emissionen fest (n=91 bayerische Betriebe 2013). Allgemein produzieren Low-input Weidesysteme innerhalb bestimmter Leistungsbereiche effizient und weisen auch Klimavorteile pro kg produzierter Milch auf (LORENZ et al. 2019). Anders ausgedrückt sind intensive Systeme vielfach auf hohe Milchleistungen angewiesen, um die höheren Treibhausgas-Emissionen auszugleichen.

### 3.3 Klimabilanz des eigenen Betriebes

Es gibt eine Vielzahl an Instrumenten dafür, die Klimabilanz von landwirtschaftlichen Betrieben zu analysieren. Eines davon ist das österreichische Betriebsmanagement-Werkzeug FarmLife, das eine vollständige betriebliche Ökobilanzierung ermöglicht (HERNDL et al. 2015). Ein anderes Instrument für eine Erfassung der Klimawirkungen ist der deutsche Berechnungsstandard Einzelbetriebliche Klimabilanzierung in der Landwirtschaft (BEK) (EFFENBERGER et al. 2016). Mit diesen Instrumenten erhalten Landwirte die Möglichkeit, gemeinsam mit Beratern ihre Betriebsparameter in ein Webtool oder in eine Excel-Datei einzugeben. Als Ergebnis sind die Treibhausgas-Emissionen bzw. -Gutschriften aus den einzelnen Betriebsbereichen ersichtlich – also für Stall, Wirtschaftsdüngerlager, Weide, enterische Fermentation, Kraftfuttereinsatz, Tierzu- und verkäufe, Maschinenherstellung, Humuswert des organischen Düngers usw. Beide Instrumente stehen online kostenlos zur Verfügung und ermöglichen es, eine Klima- bzw. Ökobilanz für den eigenen Betrieb zu erstellen.<sup>14</sup>

Vielfach werden Angaben zur Höhe von Treibhausgas-Emissionen dargestellt; eine Interpretation muss zahlreiche methodische Punkte berücksichtigen. Selbst wenn Harmonisierung vorliegt, verbleibt im Ergebnis eine hohe Heterogenität zwischen Regionen und zwischen einzelnen Betrieben. Die Spannweite unterschiedlicher Angaben zu durchschnittlichen Treibhausgas-Emissionen aus der Milchwirtschaft liegt in der Größenordnung von ca. 0,5 kg bis 8 kg CO<sub>2</sub>eq<sub>GWP100</sub> pro kg Milch. Konkrete Beispiele sind ca. 1,3 bis 2,2 kg bis Hoftor (n=81 bayrische Betriebe) bzw. ca. 1,7 bis 4,8 kg international bis zum Kaufregal (in CO<sub>2</sub>eq<sub>GWP100</sub> pro kg Milch) (KIEFER et al. 2014, POORE und NEMECEK 2018). Auch anhand von österreichischen Auswertungen zeigen sich Unterschiede in der Klimaintensität der Produktion in der Größenordnung einer 10er-Potenz (FarmLife 2020, n=186 Milchviehbetriebe) (HERNDL et al. 2015), womit grundsätzlich Optimierungsmöglichkeiten bestehen könnten.

## 4. Fazit

Klimawirkungen entstehen im Spannungsfeld von konkreten lokalen Handlungen und der globalen atmosphärischen Entwicklung. Prinzipiell bieten Klimabilanzen sowohl für einzelne Betriebe als auch für Staaten das Potenzial, sowohl Treibhausgas-Emissionen als auch klimarelevante Bindungen aufzuzeigen, um sinnvolle Handlungsmöglichkeiten zu finden.

<sup>13</sup> Einschränkung ist anzumerken: Die Studien erfolgten (1) ohne Berücksichtigung von Humus-C-Veränderungen, (2) mit GWP<sub>100</sub>, (3) mit div. Metriken (IPCC 1996, 2006 und 2013) und (4) kleine Milchbetriebe wurden aus der Betrachtung ausgeklammert.

<sup>14</sup> URL: <https://farmlife.at/>; URL: <https://daten.ktbl.de/bek/#start>

## 4.1 Methodische Herausforderungen

Bilanzielle Berechnungen entstehen auf Basis von Emissionsmessungen aus Versuchen (bottom-up Ansatz) und müssen mit den gemessenen Konzentrationen in der Atmosphäre übereinstimmen (top-down Ansatz). Klimaschutz-Fortschritte der internationalen Staatengemeinschaft sind auf vereinbarte Bilanzierungsregeln und auf Modellierung angewiesen. National und international gibt es zahlreiche Bemühungen zur Weiterentwicklung der Aussagekraft von Klimabilanzen betreffend die Milch- und Fleischwirtschaft. Wissenschaft und Branchenverbände versuchen, Standards zu erarbeiten, die den Besonderheiten des Sektors gerecht werden. Aspekte der Diskussion betreffen u.a. (a) die verwendeten Emissionsfaktoren, (b) die Sensitivität von Ergebnissen für verschiedene Treibhauspotenzial-Metriken, (c) die Diskontierung zukünftiger Schäden und (d) verschiedene Wirkungsendpunkte wie bspw. Ertrags-Auswirkungen des Klimawandels.

Im vorliegenden Beitrag wurde nur die Urproduktion von Nahrungsmitteln analysiert. Darüber hinaus entscheidet aber die Summe aller Prozesse bis zur Lebensmittel-Konsumation über dessen Klimawirkung: transnationale/überregionale Handelsströme, zahlreiche Verarbeitungs-, Lager- und Transportprozesse, Ernährungsgewohnheiten und soziokulturelle Fragen wie die Wertschätzung für Nahrungsmittel (Beispiel Lebensmittelabfälle). In der Wertschöpfungskette bis zur Supermarktfiliale fällt rund ein Drittel der Treibhausgas-Emissionen an (Verarbeitung, Verpackung, Transport bis zur Bereitstellung im Supermarkt); Transport, Lagerung und Zubereitung durch die Endkonsumenten sind hier noch nicht eingerechnet („vom Acker bis zum Teller“). Im Übrigen sind neben den Klimawirkungen auch andere Umweltwirkungen zu berücksichtigen.

## 4.2 Schlussfolgerungen und Ausblick

Aussagen zur Klimawirkung der Grünlandwirtschaft hängen wesentlich von mehreren Faktoren ab: (1) Berücksichtigung von Humus-C-Veränderungen, (2) Bewertung der eingesetzten Kraftfuttermittel (Landnutzungsänderungen,  $N_2O$ , Humus-C), (3) verwendete Treibhauspotenzial-Metriken, (4) betrachtete Bewirtschaftungssysteme und Intensitätsstufen und (5) Systemgrenze Produktion Hofator vs. Kaufregal. Vielfach liegen nur Aussagen über die (direkten) Emissionen vor. Weitere Unterschiede resultieren aus der Bewertung der Landnutzung, den verwendeten Emissionsfaktoren (insbesondere  $N_2O$ ), der Allokationsmethode (Milch/Fleisch) und dem Ansatz für weitere Betriebsmittel (u.a. Dünger, Maschinen, Gebäude).

Eine produktionstechnische Optimierung impliziert einen hohen betrieblichen Beratungsaufwand; es bestehen viele Einsparungspotenziale auf der organisatorischen Ebene und wenige technische Ansätze. Der Großteil der Treibhausbilanz eines Wiederkäuers betrifft das Futtermittel, dessen Entstehung und Verdauung. Eine standortangepasste und effiziente Fütterung stellt daher einen Angelpunkt für Klimawirkungen und Klimaschutz dar. Der internationale Anstieg der Emissionen verstärkt die österreichische Klimalast und auch die öffentliche Diskussion. Unklar ist derzeit noch, mit welchen Reduktionsanforderungen der heimische Landwirtschaftssektor konfrontiert werden wird.

Die österreichische Klimabilanzierung zeigte ab 1990 eine leichte Reduktion der Emissionen aufgrund verminderter Tierzahlen. Die Prognosen für den Sektor (u.a. steigender Milchabsatz) lassen aber auf zukünftig höhere Emissionen schließen. Eine hohe Produktionseffizienz und geringe N-Verluste reduzieren zwar den Fußabdruck pro Produkteinheit. Für den Klimaschutz sind gleichzeitig aber markt- und konsumseitige Schritte und Grenzen erforderlich. Ein hilfreicher Zugang könnte im Konzept einer standortangepassten Grünlandwirtschaft liegen. Mittelfristig könnte damit eine Stabilisierung der Outputzahlen möglich sein. Bislang war eine Mengensteigerung allerdings ein zentraler Bestandteil der ökonomischen Strategie vieler Betriebe in der kleinstrukturierten österreichischen Landwirtschaft. Eine nachhaltige Umsetzung von Klimaschutzaktivitäten erfordert daher Begleitmaßnahmen in Richtung Wertschöpfung am Betrieb.

## 5. Literatur

ALIG, M., U. PRECHSL, K. SCHWITTER, T. WALDVOGEL, V. WOLFF, A. WUNDERLICH, A. ZORN und G. GAILLARD, 2015: Ökologische und ökonomische Bewertung von Klimaschutzmassnahmen zur Umsetzung auf landwirtschaftlichen Betrieben in der Schweiz. *Agroscope Science* 29, 160.

ANDERL, M., A. FRIEDRICH, M. GANGL, S. HAIDER, E. KAMPEL, T. KÖTHER, M. KRIECH, C. LAMPERT, B. MATTHEWS, K. PAZDERNIK, G. PFAFF, M. PINTERITS, S. POUPA, M. PURZNER, W. SCHIEDER, C. SCHMID, G. SCHMIDT, B. SCHODL, E. SCHWAIGER, B. SCHWARZL, G. STRANNER, M. TITZ, P. WEISS und A. ZECHMEISTER, 2019: Austria's National Inventory Report 2019. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. REP-0677. Umweltbundesamt, Wien, 809 S.

AWI, 2020: Statistik Pflanzliche Produktion Öl- und Eiweispflanzen, Tab. 14-16: Bundesanstalt für Agrarwirtschaft. URL: <https://www.agraroeconomik.at/index.php?id=498>.

BALCOMBE, P., J.F. SPEIRS, N.P. BRANDON und A.D. HAWKES, 2018: Methane emissions: choosing the right climate metric and time horizon. *Environmental Science: Processes & Impacts* 20, 1323-1339.

BELLARBY, J., R. TIRADO, A. LEIP, F. WEISS, J.P. LESSCHEN und P. SMITH, 2013: Livestock greenhouse gas emissions and mitigation potential in Europe. *Global Change Biology* 19, 3-18.

EFFENBERGER, M., K. GÖDEKE, S. GREBE, H.D. HAENEL, A. HANSEN, U. HÄUBERMANN, S. KÄTSCH, A. LASAR, A. NYFELER-BRUNNER, B. OSTERBURG, P. PAFFRATH, E. PODDEY, H. SCHMID, M. SCHRAML, S. WULF und B. ZERHUSEN, 2016: Berechnungsstandard für einzelbetriebliche Klimabilanzen (BEK) in der Landwirtschaft. KTBL.

EITZINGER, J., H. HABERL, B. AMON, B. BLAMAUER, F. ESSL, V. GAUBE, H. HABERSACK, R. JANDL und A. KLIK, 2014: Band 3 Kapitel 2: Land- und Forstwirtschaft, Wasser, Ökosysteme und Biodiversität Volume 3 Chapter 2: Agriculture and Forestry, Water, Ecosystems and Biodiversity. In: KROMP-KOLB, H., T. LINDENTHAL und L. BOHUNOVSKY (Hrsg.): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, 23, 363-365.

FEITZLMAYR, H., 2018: Eiweissstrategie – Status Quo und Zukunftschance. Vortrag Wintertagung, Fachtag Ackerbau 30.01.2018, Tulln. Landwirtschaftskammer Oberösterreich.

FLESSA, H., D. MÜLLER, K. PLASSMANN, B. OSTERBURG, A.-K. TECHEN, H. NITSCH, H. NIEBERG, J. SANDERS, O. MEYER ZU HARTLAGE und E. BECKMANN, 2012: Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor. Thünen Institut.

FRITZ, C. und F. GRASSAUER, 2020: Abschätzung einer kalkulatorischen Hoftor-Bilanz für die österreichische Landwirtschaft. Wintertagung, Fachtag Grünland 30.01.2020, Schladming. HBLFA Raumberg-Gumpenstein.

HERNDL, M., D.U. BAUMGARTNER, T. GUGGENBERGER, M. BYSTRICKY, G. GAILLARD, J. LANSCH, C. FASCHING, A. STEINWIDDER und T. NEMECEK, 2015: Einzelbetriebliche Ökobilanzierung landwirtschaftlicher Betriebe in Österreich. Abschlussbericht FarmLife. HBLFA Raumberg-Gumpenstein.

HERRERO, M., S. WIRSENIUS, B. HENDERSON, C. RIGOLOT, P. THORNTON, P. HAVLÍK, I. DE BOER und P.J. GERBER, 2015: Livestock and the environment: what have we learned in the past decade? *Annu. Rev. Environ. Resour.* 40, 177-202.

- HÖRTENHUBER, S., G. PIRINGER, W. ZOLLITSCH, T. LINDENTHAL und W. WINIWARTER, 2014: Land use and land use change in agricultural life cycle assessments and carbon footprints – the case for regionally specific land use change versus other methods. *J. Clean. Prod.* 73, 31-39.
- KIEFER, L., F. MENZEL und E. BAHRS, 2014: The effect of feed demand on greenhouse gas emissions and farm profitability for organic and conventional dairy farms. *J. Dairy Sci.* 97, 7564-7574.
- LORENZ, H., T. REINSCH, S. HESS und F. TAUBE, 2019: Is low-input dairy farming more climate friendly? A meta-analysis of the carbon footprints of different production systems. *J. Clean. Prod.* 211, 161-170.
- LYNCH, J., 2019: Availability of disaggregated greenhouse gas emissions from beef cattle production: A systematic review. *Environmental impact assessment review* 76, 69-78.
- MYHRE, G., D. SHINDELL, F.-M. BRÉON, W. COLLINS, J. FUGLESTVEDT, J. HUANG, D. KOCH, J.-F. LAMARQUE, D. LEE, B. MENDOZA, T. NAKAJIMA, A. ROBOCK, G. STEPHENS, T. TAKEMURA und H. ZHANG, 2014: Anthropogenic and natural radiative forcing. In: STOCKER, T.F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX und P.M. MIDGLEY (Hrsg.): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- OSTERBURG, B., S. RÜTER, A. FREIBAUER, T. DE WITTE, P. ELSASSER, S. KÄTSCH, B. LEISCHNER, H.M. PAULSEN, J. ROCK und N. RÖDER, 2013: *Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft.* Thünen Institut.
- POORE, J. und T. NEMECEK, 2018: Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360, 987-992.
- POWLSON, D.S., A.P. WHITMORE und K.W. GOULDING, 2011: Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *Eur. J. Soil Sci.* 62, 42-55.
- RESL, T., K.H. PISTRICH, A. STEINWIDDER, K. KRIMBERGER und R. BADER, 2019: Versorgungsbilanz für Eiweißfuttermittel in der österreichischen Landwirtschaft. Vortrag 05.04.2019, 14. Runder Tisch "Eiweißstrategie", AGES.
- SCHIEFER, J., G.J. LAIR, C. LÜTHGENS, E.M. WILD, P. STEIER und W.E. BLUM, 2018: The increase of soil organic carbon as proposed by the "4/1000 initiative" is strongly limited by the status of soil development – A case study along a substrate age gradient in Central Europe. *Sci Total Environ.* 628, 840-847.
- SCHMEER, M., R. LOGES, D. NANNEN, M. SENBAYRAM und F. TAUBE, 2009: Lachgasemissionen auf intensiv genutztem Grünland in Abhängigkeit von Bodenverdichtung und Stickstoffdüngung. *Futterbau und Klimawandel: Grünlandwirtschaft als Quelle und Senke von Klimagasen*, 79-87.
- SMITH, L.G. und N.H. LAMPKIN, 2019: Greener farming: managing carbon and nitrogen cycles to reduce greenhouse gas emissions from agriculture. *Managing Global Warming*, Elsevier, 553-577.
- SOUSSANA, J.-F., V. ALLARD, K. PILEGAARD, P. AMBUS, C. AMMAN, C. CAMPBELL, E. CESCHIA, J. CLIFTON-BROWN, S. CZÓBEL und R. DOMINGUES, 2007: Full accounting of the greenhouse gas (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) budget of nine European grassland sites. *Agric. Ecosyst. Environ.* 121, 121-134.

SOUSSANA, J.-F., T. TALLEC und V. BLANFORT, 2010: Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal* 4, 334-350.

SPANISCHBERGER, A. und N. MITTERBÖCK, 2015: Arbeitsgruppe Boden und Klima. Einflussfaktoren, Daten, Maßnahmen und Anpassungsmöglichkeiten. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 81 S.

WIESMEIER, M., J. BURMEISTER, M. TREISCH und R. BRANDHUBER, 2017: Klimaschutz durch Humusaufbau – Umsetzungsmöglichkeiten der 4 Promille-Initiative in Bayern. 15. Kulturlandschaftstag, Landwirtschaft im Klimawandel, Freising, 21-30.

WRAGE, N., 2010: Grünland als Quelle und Senke für N<sub>2</sub>O. Futterbau und Klimawandel: Grünlandwirtschaft als Quelle und Senke von Klimagasen, 47-52.

ZEHETMEIER, M. und B. ZERHUSEN, 2017: Sparen klimafreundliche Betriebe Geld? 15. Kulturlandschaftstag, Landwirtschaft im Klimawandel, Freising, 65-70.