

Serie Tieremissionen

Reduktionspotenziale von Treibhausgasemissionen aus der Schweizer Nutztierhaltung

Daniel Bretscher¹, Christof Ammann¹, Chloë Wüst¹, Aurelia Nyfeler¹ und Daniel Felder²

¹Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

²Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern, Schweiz

Auskünfte: Daniel Bretscher, E-Mail: daniel.bretscher@agroscope.admin.ch



Die Tierhaltung ist für ungefähr 85% der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen verantwortlich: Emissionsversuchsstall von Agroscope in Tänikon. (Foto: Gabriela Brändle, Agroscope)

Einleitung

Rund die Hälfte der in der Schweiz produzierten Nahrungsmittel stammt aus der Tierproduktion. Dafür wird auf etwa 60% der Ackerfläche Tierfutter angebaut. Dazu kommt die gesamte inländische Grünlandfläche mit mehr als 750 000 ha und 250 000 ha Anbaufläche im Ausland für importiertes Futter. Entsprechend dem hohen Flächen- und Ressourcenverbrauch trägt die Tierhaltung im Vergleich zu anderen Produktionszweigen der Landwirtschaft in überdurchschnittlichem Masse zu negativen Umwelteinflüssen bei. Gemäss dem Treibhausgasinventar der Schweiz entfielen 2016 gut 12% der Emissionen von Treibhausgasen (THG) auf den Sektor Landwirtschaft.

Die grosse Bedeutung der Tierhaltung in Bezug auf die THG-Emissionen lässt sich unter anderem auf die hohen Verluste bei der Futtermittelkonvertierung zurückführen. In der Regel wird nur ein geringer Teil (5–50%) der von den Tieren aufgenommenen Energie und Nährstoffe der Futterpflanzen in vom Menschen verwertbare Nahrung umgewandelt. Dabei gibt es signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Tierkategorien. Wiederkäuer gelten als besonders ineffizient. Zudem produzieren sie durch den mikrobiellen Abbau von Zellulose und anderen Kohlenhydraten im Pansen (enterische Fermentation) grosse Mengen an Methan (CH₄). Andererseits muss berücksichtigt werden, dass ohne Wiederkäuer die grossen Graslandflächen der Schweiz nicht zur Nahrungsmittelproduktion genutzt werden könnten.

Im Gegensatz zu anderen Inventar-Sektoren wie Energie oder Industrie, war die Landwirtschaft bisher kaum Ziel von ambitionierten Programmen zur Reduktion von THG. In der Botschaft zur Totalrevision des CO₂-Gesetzes wird nun allerdings auch für die Landwirtschaft ein Sektorziel zur Emissionsreduktion definiert. Ausgehend von der Klimastrategie Landwirtschaft soll das Reduktionsziel bis 2030 bei 22% gegenüber 1990 liegen (BLW 2011). Gemäss dem Gesetzesentwurf soll die Erreichung des Sektorziels Landwirtschaft gestützt auf das nationale THG-Inventar der Schweiz überprüft werden.

In der vorliegenden Arbeit werden die Reduktionspotenziale von 13 häufig genannten Massnahmen sowie von zwei Szenarien mit veränderten landwirtschaftlichen Strukturen quantifiziert. Der Schwerpunkt liegt auf produktionsseitigen technischen Massnahmen, zum Vergleich werden aber auch struktur- und konsumbasierte Massnahmen wie Ernährungsumstellung und ökonomische Lenkungsabgaben diskutiert. Aufgrund der Komplexität der Materie und der zahlreichen Annahmen und Grundvoraussetzungen bei der Modellierung

kann nicht ein Anspruch auf eine exakte Berechnung der umsetzbaren Emissionsreduktionen erhoben werden. Die Analyse dient vielmehr dem Vergleich der verschiedenen Potenziale und dem Setzen von Prioritäten bei der zukünftigen Umsetzung.

Material und Methoden

Sämtliche Berechnungen und Analysen der Reduktionspotenziale in der vorliegenden Studie basieren auf den Modellen und Methoden des nationalen THG-Inventars (FOEN 2018). Die nationalen THG-Inventare werden nach den Richtlinien der Klimarahmenkonvention und des Kyoto-Protokolls erstellt. Emissionen, die der landwirtschaftlichen Tätigkeit zugeschrieben werden können, sind über mehrere Sektoren verteilt (Tab. 1). Der hier betrachtete Emissionsumfang ist durch die entsprechenden Systemgrenzen vorgegeben, das heisst, es werden nur die auf den Landwirtschaftsbetrieben in der Schweiz anfallenden Emissionen berücksichtigt. Ausgenommen von dieser produktionsseitigen, territorialen Analyse sind sämtliche Emissionen aufgrund der Vorleistungen, die bei der Herstellung von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln, Geräten, Maschinen und Immobilien anfallen. Auch Emissionsverlagerungen in Zusammenhang mit Import und Export von Nahrungsmitteln werden nicht miteingerechnet (Bretscher *et al.* 2015).

Um die Bedeutung der Tierhaltung und der einzelnen Tierkategorien für die THG-Emissionen und die entsprechenden Reduktionsmassnahmen abbilden zu können, müssen sämtliche Emissionen den verschiedenen tierischen und pflanzlichen Produktionszweigen zugeordnet werden. Wo eine Zuteilung der Emissionen nicht direkt möglich war, erfolgte diese indirekt aufgrund der Grasland-, Futterbau- und Pflanzenbauflächen sowie aufgrund der Stickstoff(N)-Bedarfsnormen der Kulturen. Die Verteilung der Emissionen der Tierhaltung auf die einzelnen Nutztierkategorien erfolgte aufgrund der Anzahl Grossvieheinheiten.

Für die Abschätzung der Reduktionspotenziale der Massnahmen wurden entweder einzelne Emissionsfaktoren oder Berechnungsparameter aufgrund von Literaturangaben angepasst, oder die Strukturdaten (Flächenanteile, Tierbestände) wurden entsprechend den Ergebnissen von Szenario-Berechnungen modifiziert (Tab. 2). Wo nicht bereits umgesetzt, wurden die verschiedenen Einzelmodelle innerhalb des THG-Inventars miteinander verknüpft, um Folge- und Feedbackeffekte abbilden zu können. Insbesondere wurde bei einer Reduktion der N-Verluste die eingesetzte Menge von synthetischem N-Dünger entsprechend reduziert.

Zusammenfassung

Die Landwirtschafts- und Klimapolitik in der Schweiz hat sich zum Ziel gesetzt, die landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen bis ins Jahr 2050 gegenüber 1990 um mindestens ein Drittel zu senken. Dieses Ziel kann mit produktionsseitigen technischen Massnahmen und/oder durch Umstellung der landwirtschaftlichen Strukturen (Flächenanteile, Tierbestände) erreicht werden. Die Tierhaltung ist für ungefähr 85 % der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Basierend auf den Modellen und Methoden des nationalen Treibhausgasinventars wurden dementsprechend die Potenziale von Reduktionsmassnahmen im Tierhaltungsbereich untersucht. Produktionsseitige technische Massnahmen zeichnen sich durch eher geringe Reduktionsleistungen und/oder durch Zielkonflikte mit anderen Umweltwirkungen sowie durch technische Probleme bei der Umsetzung aus. Das Sektorziel Landwirtschaft dürfte daher kaum alleine mit derartigen Massnahmen erreichbar sein. Eine Umgestaltung der landwirtschaftlichen Strukturen, begleitet von einer Umstellung des Nahrungsmittelkonsums zu vermehrt pflanzlicher Ernährung, birgt hingegen grosse Potenziale und bietet sich als zielführender Lösungsweg an.

Die hier berechneten Reduktionspotenziale stellen maximal technische Potenziale dar, ohne Berücksichtigung von ökonomischen oder anderweitigen Einschränkungen bei der Umsetzung. In der Regel wurde angenommen, dass eine Massnahme in der gesamten Schweizer Landwirtschaft umgesetzt wird. Es wird jeweils die Emissionsreduktion in kt CO₂eq*a⁻¹ (Kilotonnen CO₂-Äquivalent pro Jahr) gegenüber einem *Business-as-usual*-Szenario (Möhring *et al.* 2015) ohne Änderung der Produktionstechnik ausgewiesen.

Resultate

Als Ausgangspunkt für die Reduktionspotenziale wird zunächst die berechnete Aufteilung der THG-Emissionen im Jahr 2016 (insgesamt 7230 kt CO₂eq*a⁻¹) auf die verschiedenen Emissionsquellen und Tierkategorien gezeigt (Abb. 1). Knapp 15 % der Emissionen konnten der

Pflanzenproduktion und gut 85 % der Tierproduktion (inklusive Futterbau) zugeschrieben werden. Bei den Emissionen aus der Tierhaltung sind die CH₄-Emissionen aus der Verdauung der grösste Posten (46 %), gefolgt von den Emissionen aus dem Futterbau (24 %, hauptsächlich Lachgas [N₂O]) und der Hofdüngerlagerung (15 % als CH₄ und N₂O). Wichtigste Tierkategorie ist das Rindvieh mit 88 % der Emissionen aus der Tierhaltung, wobei die Milchkühe alleine bereits 56 % ausmachen. Unter den Monogastriern fallen vor allem die Schweine (5 %) ins Gewicht.

Unter den Annahmen des *Swiss Agricultural Outlook* (Möhring *et al.* 2015) sinken die Emissionen bis 2030 leicht um 122 auf 7109 kt CO₂eq*a⁻¹. Gegenüber dem Zielpfad der Klimastrategie Landwirtschaft verbleibt dadurch im Jahre 2030 eine Ziellücke von 757 kt CO₂eq*a⁻¹. Die THG-Reduktionspotenziale der analysierten Massnahmen sind in Abbildung 2 wiedergegeben, in direktem Vergleich zu dieser Ziellücke. Mit einzelnen produktionsseitigen technischen Massnahmen kann eine Reduktion von jeweils 31–480 kt CO₂eq*a⁻¹ erreicht werden. Im Vergleich dazu ergeben sich für struktur- und konsumbasierte Massnahmen deutlich höhere Potenziale von 1500–2000 kt CO₂eq*a⁻¹. Die drei simulierten ökonomischen Eingriffe zur Lenkung der landwirtschaftlichen Strukturen und/oder des Konsums (THG-Abgabe, Konsumabgabe, N-Lenkungsabgabe) führen jedoch nur zu Reduktionsleistungen im Bereich von 60–760 kt CO₂eq*a⁻¹ und können somit die theoretisch möglichen Potenziale nur teilweise ausschöpfen.

Diskussion

Fütterung

Die Fütterung beeinflusst die THG-Emissionen über vier verschiedene Wege: (i) die allgemeine Futterkonvertierungseffizienz, (ii) die spezifische Hemmung der methanogenen Mikroorganismen, (iii) die Hofdüngereigenschaften und (iv) die Emissionen der Futterbereitstellung. Die Futterkonvertierungseffizienz als zentrale Grösse beeinflusst dabei sowohl die direkten Emissionen aus dem Verdauungsprozess als auch die Emissionen der Hofdüngerlagerung und der Weiden. Die ideale Massnahme optimiert über alle Prozesse und senkt die CH₄-Emissionen signifikant und langfristig. Im Rahmen einer Untersuchung von AgroCleanTech wurden verschiedene, für die Schweiz typische Milchviehrationen sowohl hinsichtlich der Verdaubarkeit als auch hinsichtlich aller emissionsrelevanter Kriterien betrachtet. Dabei hat sich gezeigt, dass sich verschiedene praxisübliche Futterrationen nur wenig unterscheiden.

Tab. 1 | Treibhausgas(THG)-Quellen- und Senken-Kategorien im nationalen THG-Inventar, die der landwirtschaftlichen Tätigkeit zugeschrieben werden können und die entsprechenden Emissionen für 2016 (kt CO₂eq = Kilotonnen CO₂-Äquivalent; LULUCF = Land Use, Land-Use Change and Forestry).

Sektor	Spezifikation	kt CO ₂ eq
1 Energie	THG aus der Verbrennung fossiler Brenn- und Treibstoffe in landwirtschaftlichen Fahrzeugen und Maschinen sowie in Gewächshäusern und Trocknungsanlagen	630
3 Landwirtschaft	· CH ₄ -Emissionen aus der Verdauung	3320
	· CH ₄ - und N ₂ O-Emissionen aus der Hofdüngerlagerung	1100
	· N ₂ O-Emissionen infolge der Anwendung von Stickstoffdüngern (N) sowie aufgrund der Nutzung landwirtschaftlicher Böden	1490
	· CO ₂ -Emissionen infolge der Ausbringung von Kalk- und Harnstoffdüngern	47
4 LULUCF	CO ₂ -Quellen und -Senken landwirtschaftlich genutzter Böden	630
5 Abfall	CH ₄ -Verluste von Biogasanlagen, CH ₄ -Emissionen der Feldrandkompostierung, CH ₄ - und N ₂ O-Emissionen aus der Verbrennung landwirtschaftlicher Abfälle	9

Insbesondere bei den Schweinen und beim Geflügel wurde in der Vergangenheit das Nährstoffangebot immer optimaler auf den Bedarf abgestimmt. Dadurch lässt sich das relativ kleine verbleibende Reduktionspotenzial einer **N-optimierten Fütterung (NOF)** erklären. Beim Rindvieh ist das Potenzial leicht höher, es ergeben sich allerdings grössere Probleme bei der Umsetzung. Frisches Gras weist in der Regel einen sehr variablen und schwierig vorhersehbaren N-Gehalt auf, der häufig über dem Bedarf der Tiere liegt. Mit einer angepassten Bewirtschaftung kann die Futterqualität zwar beeinflusst werden, dazu sind aber regelmässige Analysen und Fachwissen notwendig. Weiterhin könnten durch Mischbestände mit Leguminosen der N-Düngerbedarf und damit die N₂O-Emissionen beim Futterbau gesenkt werden. Der höhere N-Gehalt im Futter kann jedoch zu erhöhten Emissionen aus den Hofdüngern führen. Schliesslich kann ein N-Überschuss in der Ration auch durch Zufütterung von energiereichen Komponenten (z. B. Maissilage) verhindert werden. Dies steht jedoch im Widerspruch zu *Feed no Food* (keine Nahrungsmittel als Tierfutter) und zur relativ ineffizienten Futterkonvertierung der Wiederkäuer.

Mehr oder weniger unabhängig von der Futterkonvertierungseffizienz und Proteinversorgung können Emissionen auch mit methanhemmenden **Futterzusätzen (FZ) wie Tanninen oder Leinsamen** gesenkt werden. Die Potenziale sind relativ hoch im Vergleich zu anderen technischen Massnahmen. Allerdings ist auf eine sehr genaue Dosierung zu achten, damit gezielt die methanogenen

Tab. 2 | Massnahmen zur Senkung der Treibhausgas(THG)-Emissionen aus der Schweizer Landwirtschaft und ihre Reduktionspotenziale.

Massnahme	Kurzbeschreibung	Potenzial (kt CO ₂ e _q *a ⁻¹)	Literatur
Produktionsseitige technische Massnahmen			
NOF Monogastrier	N-optimierte Fütterung (NOF) bei Monogastriern; N-Ausscheidung bei Schweinen und Geflügel im Bereich der Minimalwerte durch Optimierung der Futtermittellage (Phasenfütterung, NPR-Futter) und somit Reduktion der NH ₃ -, N ₂ O- und NO ₃ -Verluste	31	Kupper <i>et al.</i> 2018
NOF Rindvieh	N-optimierte Fütterung (NOF) beim Rindvieh; Verhindern von N-Überschüssen im Harn durch ein ausgewogenes Energie-Protein-Verhältnis in der Futtermittellage und somit Reduktion der NH ₃ -, N ₂ O- und NO ₃ -Verluste	70	Bracher <i>et al.</i> 2011
FZ Tannine	Futterzusätze (FZ) beim Rindvieh: Tannine; gezielte Hemmung der mikrobiellen CH ₄ -Produktion im Pansen der Milchkühe um 16 %	305	Henzen <i>et al.</i> 2012
FZ Leinsamen	Futterzusätze (FZ) beim Rindvieh: Leinsamen; gezielte Hemmung der mikrobiellen CH ₄ -Produktion im Pansen der Milchkühe um 16 %	305	Martin <i>et al.</i> 2008
Laktationszahl	Verteilung der Emissionen der unproduktiven Aufzuchtphase bei Milchkühen auf eine längere Produktionsphase und effizientere Remontierung durch Erhöhung der durchschnittlichen Laktationszahl von 3,5 auf 4,5	200	Grandl <i>et al.</i> 2018
Züchtung	Reduktion der CH ₄ -Emissionen um 18,5 % durch Züchtung auf hohe Futterkonvertierungseffizienz und tiefe CH ₄ -Emissionen	365	De Haas <i>et al.</i> 2011
Abdeckung Güllelager	Reduktion der CH ₄ -Emissionen aus offenen Güllelagern um 40 % und der NH ₃ -Emissionen um 25 % bei gleichzeitiger Erhöhung der N-Effizienz	44	Kupper <i>et al.</i> 2018
Gülleansäuerung	Reduktion der CH ₄ -Emissionen aus der Güllelagerung um 50 %; Reduktion der NH ₃ -Emissionen aus der Güllelagerung und -Ausbringung um jeweils 50 % bei gleichzeitiger Erhöhung der N-Effizienz	480	Kupper <i>et al.</i> 2017
Biogasanlagen	Anaerobe Vergärung sämtlicher zur Verfügung stehender Rindvieh- und Schweinegülle und des gesamten zur Verfügung stehenden Rindviehmists	242	Burg <i>et al.</i> 2018
N-Effizienz HD	Erhöhung der N-Effizienz in der Hofdüngerbewirtschaftung (HD); Verhindern der systematischen Ausnutzung der Selbstdeklaration und der flexiblen Toleranzbereiche in der Suisse-Bilanz (ÖLN) sowie Erhöhung des Basis-N-Ausnutzungsgrades der Hofdünger von 60 % auf 65 %	261	Bosshard <i>et al.</i> 2012
Struktur- und konsumbasierte Massnahmen			
ÖkOpt	Umstellung der landwirtschaftlichen Strukturen (Flächenanteile, Tierbestände) gemäss Szenario ÖkOpt zur Erreichung der Umweltziele Stickstoff	2077	Sutter <i>et al.</i> 2013
Ausgewogene Ernährung gemäss LMP	Umstellung der landwirtschaftlichen Strukturen (Flächenanteile, Tierbestände) entsprechend einer ausgewogenen Ernährung gemäss der Lebensmittelpyramide (LMP) der Schweizerischen Gesellschaft für Ernährung (SGE)	1544	Zimmermann <i>et al.</i> 2017
Ökonomische Lenkungsmaßnahmen			
THG-Abgabe	Veränderung der landwirtschaftlichen Strukturen (Flächenanteile, Tierbestände) bei Einführung einer Abgabe von CHF 50.– pro t CO ₂ e _q in der Landwirtschaft bei hohem und mittlerem Preisszenario	298–763	Peter <i>et al.</i> 2009
Konsumabgabe	Veränderung der landwirtschaftlichen Strukturen (Flächenanteile, Tierbestände) bei Einführung einer Konsumabgabe auf Fleisch und Milch	243	Schmidt <i>et al.</i> 2017
N-Lenkungsabgabe	Veränderung der landwirtschaftlichen Strukturen (Flächenanteile, Tierbestände) bei Einführung einer Lenkungsabgabe auf Stickstoffinputs (Mineraldünger und Futtermittel)	58	Schmidt <i>et al.</i> 2017

NPr-Futter = stickstoff- und phosphorreduziertes Futter; t CO₂e_q = Tonnen CO₂-Äquivalent

Mikroorganismen gehemmt werden, ohne dass die Faser- und/oder Proteinverdaubarkeit und somit die Produktivität zurückgeht. Weiterhin muss beachtet werden, dass sich sämtliche Stoffe, die nicht zu Methan umgewandelt oder nicht anderweitig verdaut werden, schliesslich in den Hofdüngern wiederfinden und somit Ausgangssubstrat für weitere potenzielle Emissionen sind.

Letztendlich ist ein *Precision Feeding* notwendig (Andeweg und Reisinger 2014). Dies bedeutet nicht nur eine bedarfsgerechte und effiziente Fütterung bei den einzelnen Tierkategorien und eine Optimierung mit Futterzusätzen. In einer übergreifenden Gesamtstrategie gilt

es vielmehr die verschiedenen Futtermittel denjenigen Tieren mit der jeweils besten Futterkonvertierungseffizienz zu verfüttern. Die Zuteilung von Kraftfutter an die Wiederkäuer sollte vor diesem Hintergrund kritisch geprüft werden, da Monogastrier diese Futtermittel wesentlich effizienter nutzen können. Für die Beurteilung relevant ist aber auch die Konkurrenz zur menschlichen Ernährung. Eine umfassende Umstellung der Nutztierherdenstruktur und der Fütterungspraxis in der Schweiz könnte in diesem Sinne einen wesentlichen Beitrag zur THG-Reduktion leisten, wurde hier aber nicht weiter untersucht.

Herdenmanagement und Züchtung beim Rindvieh

Durch eine zusätzliche Laktation bei den Milchkühen und eine gezielte Züchtung auf Effizienz und tiefe Methanemissionen könnten im Vergleich zu anderen produktionsseitigen Massnahmen mittlere bis grosse THG-Einsparungen erreicht werden. Grundsätzlich nehmen die positiven Effekte auf die Umwelt mit jeder zusätzlichen Laktation zu, da die Emissionen während der unproduktiven Aufzuchtphase auf eine immer höhere Produktion verteilt werden können. Allerdings sind trotz der seit längerer Zeit bekannten Vorteile von langlebigen Kühen bei der **Laktationszahl** nur wenige bis gar keine Fortschritte gemacht worden. Dies wird unter anderem mit den attraktiven Rindfleischpreisen und erhöhten Fruchtbarkeits- und Krankheitsrisiken bei älteren Tieren erklärt. Allgemein ungünstige Rahmenbedingungen verhindern so zurzeit eine Weiterentwicklung. Die Senkung der CH₄-Emissionen durch **Züchtung** kann theoretisch zusätzlich zu allen anderen Massnahmen erfolgen. Allerdings sind die Zuchtstrategien in der Regel auf verschiedene Ziele ausgerichtet, und die Fortschritte in einem Einzelbereich dürften entsprechend langsam sein. Trotz grosser technologischer Fortschritte müssen zudem noch weitere Probleme überwunden werden, bis das Selektionskriterium «tiefe Methanemissionen» kosteneffizient und zuverlässig messbar ist. Weitere THG-Reduktionspotenziale liessen sich durch Fortschritte in der Fruchtbarkeit und Gesundheit oder durch Umstellung der Herdenstruktur (Gebrauchskreuzungen, Zweinutzungsrasen) erschliessen. Aufgrund der aufwändigen Modellierung der Herdenstruktur wurden diese Potenziale bisher für die Schweiz noch nicht quantifiziert.

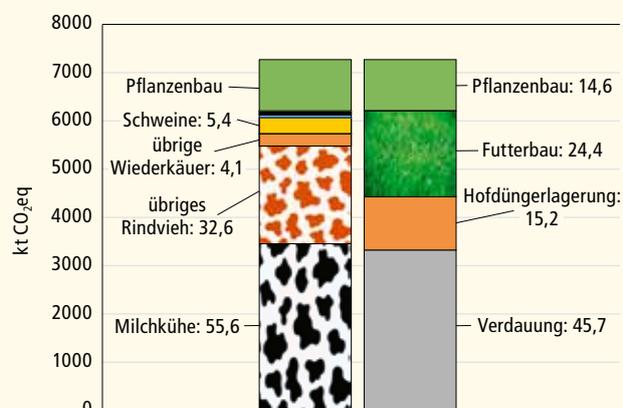


Abb. 1 | THG-Emissionen der Schweizer Landwirtschaft im Jahre 2016, aufgeteilt nach Tierkategorien (Prozentangaben ohne Pflanzenbau) und Emissionskategorien (kt CO₂eq = Kilotonnen CO₂-Äquivalent).

Hofdüngerlagerung

Durch Massnahmen bezüglich der Ammoniak-Problematik wurden auf dem Gebiet der Hofdüngerlagerung bereits Fortschritte erzielt. So ist durch die weit verbreitete **Abdeckung der Güllelager** das verbleibende Potenzial dieser Massnahme stark eingeschränkt. Allerdings gibt es ein erstaunlich hohes Potenzial durch **Gülleansäuerung** und ein etwa halb so grosses Potenzial durch Vermeidung von CH₄-Emissionen bei **Biogasanlagen**. Diese beiden Massnahmen erfordern jedoch eine anspruchsvolle Logistik und Prozessführung und/oder sind mit hohen Kosten verbunden.

N-Effizienz in der Hofdüngerbewirtschaftung (HD)

Diverse Studien haben aufgezeigt, dass die Minderung des N-Überschusses in der Landwirtschaft eine der effektivsten Optionen zur Reduktion von N₂O ist. Durch eine Reduktion der Gesamt-N-Verluste können die Mengen an frei verfügbarem Ammoniak (NH₃) und Nitrat (NO₃⁻) gesenkt werden. Über die reduzierte Substratverfügbarkeit sinken somit auch die N₂O-Emissionen. Studien mit Effizienzvergleichen zwischen einer Vielzahl von Betrieben wie zum Beispiel die Zentrale Auswertung der Agrarumweltindikatoren (BLW 2016) zeigen eine grosse Variabilität in der betrieblichen N-Effizienz, insbesondere auch bei Betrieben mit ähnlichen Strukturen. Dies ist ein Hinweis auf ein Verbesserungspotenzial, das vermutlich alleine durch die konsequente Umsetzung der guten landwirtschaftlichen Praxis und durch eine Durchsetzung des Vollzugs erreicht werden könnte. Zurzeit bestehen für die Landwirte jedoch kaum Verbesserungsanreize, wie die konstanten N-Verluste der letzten Jahre belegen. Der Vergleich mit anderen Massnahmen zeigt allerdings, dass die Wirkung der hier modellierten Massnahme «**N-Effizienz HD**» auf die Gesamt-THG-Emissionen relativ klein ist. Grund dafür ist vor allem, dass in den Berechnungen die Tierbestände konstant gehalten wurden und somit grosse Emissionskategorien wie die CH₄-Emissionen aus der Verdauung und der Hofdüngerlagerung von der Massnahme nicht betroffen sind.

Fazit der produktionsseitigen technischen Massnahmen

Die in dieser Arbeit ermittelten Reduktionspotenziale decken sich weitgehend mit denjenigen anderer Studien. Allerdings sind die entsprechenden Analysen meist theoretischer Natur. So weisen die obigen Ausführungen auf zahlreiche Probleme bei der praktischen Umsetzung von produktionsseitigen technischen Massnahmen hin. Dazu gehören Emissionsverlagerungen, Zielkonflikte mit anderen Umweltwirkungen, Produktionsrückgang,

ungünstige Rahmenbedingungen, mangelnde Anreize, hohe Kosten und/oder schwierige Prozessführung und Logistik. Zudem sind diverse Aspekte wie z. B. die Wirkung über lange Zeit oder unter variablen Praxisbedingungen noch unzureichend erforscht. Die Komplexität der Materie führt häufig dazu, dass einzelne Betriebsleitende alleine kaum in der Lage sind, Fortschritte hinsichtlich einer emissionsarmen Betriebsführung zu machen. Dazu kommt, dass es bei den kleinräumigen Strukturen in der Schweiz für viele kleinere Betriebe schwierig ist, sich das notwendige Know-how anzueignen und/oder Investitionen zu tätigen. Die Probleme zeigen sich auch bei ersten Pilotprojekten in der Praxis, wo sich das Erreichen von antizipierten Emissionsreduktionen selbst mit fachlicher Begleitung und finanzieller Unterstützung sehr schwierig gestaltet. Das tatsächlich umsetzbare Potenzial vieler produktionsseitiger technischer Massnahmen ist somit in Frage gestellt.

Struktur- und konsumbasierte Massnahmen

Der Einfluss des Konsumverhaltens auf die landwirtschaftliche Produktion und die damit verbundenen THG-Emissionen wird in der wissenschaftlichen Literatur zunehmend thematisiert. Wie auch die vorliegende Studie zeigt, birgt eine Umstellung der landwirtschaftlichen Strukturen in Verbindung mit einer Ernährungs-

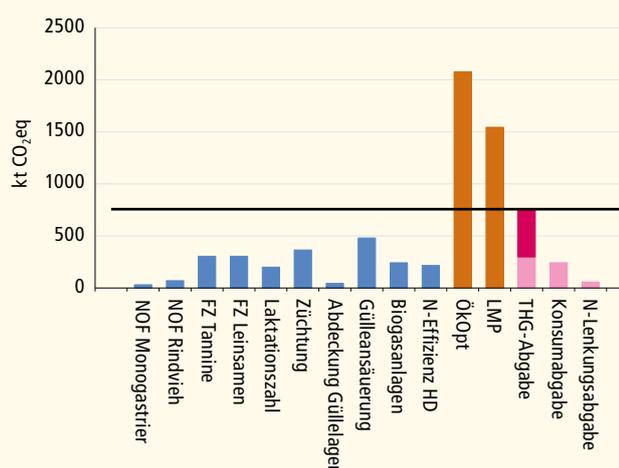


Abb. 2 | Potenziale verschiedener Treibhausgas(THG)-Reduktionsmassnahmen und -Strategien in der Schweizer Landwirtschaft (vgl. Tab. 2), im Vergleich zum landwirtschaftlichen Sektorziel 2030 (fette horizontale Linie). Blau: produktionsseitige technische Massnahmen; braun: struktur- und konsumbasierte Potenziale; rosa: ökonomische Lenkungsmaßnahmen (THG-Abgabe: Potenziale bei hohem (hellrosa) und mittlerem (dunkelrosa) Preisszenario). FZ: Futterzusätze; HD: Hofdünger; LMP: Ausgewogene Ernährung gemäss Lebensmittelpyramide; NOF: N-optimierte Fütterung; ökOpt: landwirtschaftliche Strukturen gemäss Szenario «ökOpt».

umstellung hin zu vermehrt pflanzlichen Nahrungsmitteln beachtliche Potenziale, welche die Wirkung der produktionsseitigen technischen Massnahmen um ein Vielfaches übersteigen. Selbst bei einem relativ moderaten Szenario, das heisst bei einer **ausgewogenen Ernährung gemäss Lebensmittelpyramide (LMP)**, wäre die Emissionsreduktion drei Mal höher als das Potenzial der besten produktionsseitigen technischen Massnahme. Der Haupteffekt ist auf den stark reduzierten Fleischkonsum und entsprechend kleinere Nutztierbestände zurückzuführen. Zusätzlich zur Reduktion der THG stellen sich so positive Auswirkungen auf diverse andere Umweltaspekte (z. B. Zimmermann *et al.* 2017) und nicht zuletzt auch auf die Gesundheit ein.

Bei struktur- und konsumbasierten Massnahmen gibt es also kaum negative Nebeneffekte auf die Umwelt. Die Hauptschwierigkeit liegt vielmehr bei der Initiierung einer Verhaltensänderung insbesondere bei den Konsumentinnen und Konsumenten. Die drei hier untersuchten ökonomischen Mechanismen (**THG-Abgabe, Konsumabgabe, N-Lenkungsabgabe**) zeigen eher eine beschränkte Wirkung auf das Konsumverhalten und die landwirtschaftlichen Strukturen. Ursachen dafür werden vor allem bei der mangelnden Preiselastizität gesehen (geringer Rückgang der Nachfrage bei einer Preiserhöhung; Peter *et al.* 2009; Schmidt *et al.* 2017). Eine Umstellung zu mehr Nachhaltigkeit kann aber auch ohne oder zusätzlich zu einer monetären Lenkung gefördert werden. Sensibilisierungskampagnen, Label-Systeme und Produktkennzeichnung und/oder eine beispielhafte Vorreiterrolle der öffentlichen Beschaffung sind Massnahmen, die den Konsum und die Produktion in die notwendige Richtung lenken können. Dies umso mehr, als auch das Argument der Gesundheit miteinbezogen werden kann.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Listen von THG-Reduktionsmassnahmen wie die hier vorliegende wurden in den letzten Jahren von zahlreichen Institutionen in verschiedenen Ländern erarbeitet (z. B. Henzen *et al.* 2012; Osterburg *et al.* 2013; Peter *et al.* 2009). Trotz der Vielzahl der Empfehlungen an die Praxis und der Förderung einzelner Massnahmen durch die Landwirtschaftspolitik verblieben die landwirtschaftlichen Emissionen in den OECD-Ländern und auch in der Schweiz seit dem Jahr 2000 jedoch mehr oder weniger auf konstantem Niveau. Entsprechend sollten die Ursachen für die mangelnden Fortschritte im Allgemeinen und die Hemmnisse bei der Massnahmenumsetzung im Speziellen weiter untersucht werden.

Zusammen mit zahlreichen anderen Studien zeigen die vorliegenden Resultate, dass die Potenziale verschiedener produktionsseitiger technischer Massnahmen limitiert sind. Einschränkend kommt hinzu, dass sich einzelne Massnahmen gegenseitig ausschliessen und dass die Wirkung eines Massnahmenpakets in der Regel kleiner ist als die Summe der Einzelpotenziale. Um wesentliche Emissionsreduktionen im Sektor Landwirtschaft zu realisieren und die angepeilten Ziele zu erreichen, braucht es somit auch Veränderungen bei den derzeitigen Strukturen in der Tierhaltung sowie dem Verhältnis zwischen Tier- und Pflanzenproduktion. Es sollten dementsprechend Rahmenbedingungen geschaffen werden, die einerseits die Umsetzung einer Vielzahl von produktionsseitigen technischen Massnahmen vorantreiben, aber auch – wo notwendig – strukturelle Veränderungen ermöglichen und einleiten. Durch Verzicht auf ein Über-

mass an technischen Handlungsvorschriften und durch ambitionöse und verbindliche Zielvorgaben kann eine maximale standort- und betriebsspezifische Flexibilität bei der Massnahmenumsetzung gewährt werden. Darüber hinaus würden weitere Innovationen zur Überwindung von Zielkonflikten und zur Reduktion der THG-Emissionen angestossen. Gleichzeitig sollte die Entwicklung in Richtung einer ressourcenschonenden Ernährung vorangetrieben werden, um nachfrageseitig die notwendigen Veränderungen der landwirtschaftlichen Strukturen zu unterstützen. Letztendlich gilt es, die landwirtschaftliche Produktion, die verarbeitende Industrie, die Verteilung sowie den Lebensmittelkonsum in einem integrativen Ansatz aufeinander abzustimmen und nachhaltig zu gestalten. Angesichts des fortschreitenden Klimawandels und der kaum sinkenden THG-Emissionen besteht ein dringender Handlungsbedarf. ■

Literatur

- Andeweg K. & Reisinger A., 2014. Reducing greenhouse gas emissions from livestock: Best practice and emerging options. Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases (GRA), Sustainable Agriculture Initiative (SAI).
- BLW, 2011. Klimastrategie Landwirtschaft: Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- BLW, 2016. Agrarbericht 2016. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- Bosshard C., Spiess E. & Richner W., 2012. Überprüfung der Methode Suisse-Bilanz: Schlussbericht. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich.
- Bracher A., Schlegel P., Mürger A., Stoll W. & Menzi H., 2011. Möglichkeiten zur Reduktion von Ammoniakemissionen durch Fütterungsmassnahmen beim Rindvieh (Milchkuh). SHL, Agroscope, Posieux.
- Bretscher D., Lansche J. & Felder D., 2015. Klimaschutz und Ernährung. In: Agrarbericht 2015. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- Burg V., Bowman G., Haubensak M., Baier U. & Thees O., 2018. Valorization of an untapped resource: Energy and greenhouse gas emissions benefits of converting manure to biogas through anaerobic digestion. *Resources, Conservation and Recycling* **136**, 53–62.
- de Haas Y., Windig J.J., Calus M.P.L., Dijkstra J., de Haan M., Bannink A. & Veerkamp R.F., 2011. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. *Journal of Dairy Science* **94** (12), 6122–6134.
- FOEN, 2018. Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2016: National Inventory Report, CRF-tables. Submission of April 2018 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment, Bern. Zugang: <http://www.climate-reporting.ch> [31.8.18].
- Grandl F., Furger M., Kreuzer M. & Zehetmeier M., 2018. Impact of longevity on greenhouse gas emissions and profitability of individual dairy cows analysed with different system boundaries. *Animal*, 1–11. Zugang: <https://doi.org/10.1017/S175173111800112X> [5.9.18].
- Henzen C., Angele H.-C., Maerki A., Meyer A., Meyer R. & Steiner R., 2012. Ressourcen- und Klimateffizienz in der Landwirtschaft: Potenzialanalyse. Agro-CleanTech c/o Schweizerischer Bauernverband. Brugg.
- Kupper T., 2017. Beurteilung der Ansäuerung von Gülle als Massnahme zur Reduktion von Ammoniakemissionen in der Schweiz – Aktueller Stand. Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften (HAFL) im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft BLW, Bern.
- Kupper T., Bonjour C., Menzi H., Bretscher D. & Zaucker F., 2018. Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990–2015 und Prognosen bis 2030. Hochschule für Agrar-, Forst-, und Lebensmittelwissenschaften HAFL im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Zollikofen. In *Vorbereitung*
- Martin C., Rouel J., Jouany J.P., Doreau M. & Chilliard Y., 2008. Methane output and diet digestibility in response to feeding dairy cows crude linseed, extruded linseed, or linseed oil. *Journal of Animal Science* **86** (10), 2642–2650.
- Möhring A., Mack G., Ferjani A., Kohler A. & Mann S., 2015. Swiss Agricultural Outlook. Agroscope Science Nr. 23, Agroscope, Ettenhausen.
- Osterburg B., Rüter S., Freibauer A., de Witte T., Elsasser P., Kätsch S., Leischer B., Paulsen H.M., Rock J., Röder N., Sanders J., Schweinle J., Steuk J., Stichnothe H., Stümer W., Welling J. & Wolf A., 2013. Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft. Johannes Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Report 11, Braunschweig.
- Peter S., Hartmann M., Weber M., Lehmann B. & Hediger W., 2009. THG 2020 – Möglichkeiten und Grenzen zur Vermeidung landwirtschaftlicher Treibhausgase in der Schweiz. Gruppe Agrar-, Lebensmittel und Umweltökonomie des Interdepartementalen Instituts für Umweltentscheidungen ETH. Info Agrar Wirtschaft Schriftenreihe 2009/1, Zürich.
- Schmidt A., Mann S. & Mack G., 2017. Instrumente Evaluation Stickstoff (IES): Schlussbericht. Agroscope, Ettenhausen.
- Sutter M., Menzi H. & Reidy B., 2013. Ökologische Optimierung des landwirtschaftlichen Produktportfolios (ÖkOpt). Dokumentation zu den im Auftrag von INFRAS erstellten Modellrechnungen der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen.
- Zimmermann A., Nemecek T. & Waldvogel T., 2017. Umwelt- und ressourcenschonende Ernährung: Detaillierte Analyse für die Schweiz. Agroscope Science Nr. 55, Agroscope, Ettenhausen.

Riassunto**Emissioni di gas serra riconducibili alla detenzione di animali da reddito: potenziale di riduzione**

La Svizzera ha deciso di ridurre le emissioni di gas serra riconducibili all'agricoltura di almeno un terzo rispetto al 1990 entro il 2050. Quest'obiettivo di politica agricola e climatica può essere raggiunto adottando provvedimenti tecnici sul fronte della produzione e/o adeguando le strutture agricole (quota di superfici, effettivi di bestiame). Poiché l'85 per cento circa di tutte le emissioni di gas serra riconducibili all'agricoltura è generato dalla detenzione di animali, si è analizzato il potenziale dei provvedimenti di riduzione in questo settore. L'analisi, basata sui metodi e i modelli dell'inventario nazionale dei gas serra, ha evidenziato che i provvedimenti tecnici sul fronte della produzione offrono prestazioni di riduzione piuttosto modeste, che possono comportare conflitti di obiettivi con altri impatti ambientali e che la loro applicazione comporta difficoltà tecniche. È quindi molto improbabile che l'obiettivo settoriale per l'agricoltura possa essere raggiunto per mezzo di tali provvedimenti. L'adeguamento delle strutture agricole, affiancato da un cambiamento del consumo alimentare a favore dei prodotti di origine vegetale, racchiude invece un potenziale notevole e rappresenta una soluzione adatta a realizzare l'obiettivo.

Summary**Potential for reducing greenhouse gas emissions from Swiss animal husbandry**

The Swiss agricultural and climate policy-making sector has set itself the target of reducing agricultural greenhouse gas emissions by at least one-third by 2050 compared to 1990's figures. This target can be achieved via technical measures on the production side and/or by reorganising agricultural structures (area percentages, animal populations). Animal husbandry is responsible for approx. 85 % of agricultural greenhouse gas emissions. Accordingly, the potentials of reduction measures in the animal husbandry sector were investigated, based on the models and methods of the National Greenhouse Gas Inventory. Technical measures on the production side are characterised by fairly low reduction performances and/or by tradeoffs with other environmental impacts, as well as by technical problems with implementation. The agricultural-sector target is therefore unlikely to be achievable with measures of this sort alone. By contrast, a reorganisation of agricultural structures accompanied by a shift to an increasingly plant-based diet harbours great potential, and presents itself as a promising approach.

Key words: livestock, greenhouse gas emissions, emission reduction potentials.