

Treibhausgasemissionen aus der schweizerischen Nutztierhaltung; wie stark belasten unsere Kühe das Klima?

Daniel Bretscher und Christof Ammann

Agroscope, Klima / Lufthygiene, 8046 Zürich

Kontakt: Daniel Bretscher, daniel.bretscher@agroscope.admin.ch

Einleitung

Die Land- und Ernährungswirtschaft ist eine bedeutende Verursacherin von Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen), sowohl weltweit als auch in der Schweiz. Gemäss dem schweizerischen THG-Inventar betrug der Anteil des Landwirtschaftssektors an den Gesamtemissionen der Schweiz 2015 12,7% (1990: 12,6%; FOEN, 2017). Durch eine breitere Definition des Landwirtschaftssektors wird dessen Anteil an den anthropogenen THG-Emissionen global jedoch auf bis zu 30% beziffert (Bellarby et al., 2008). THG-Emissionen entstehen entlang der Produktionskette bei der Herstellung von Produktionsmitteln, durch die Verbrennung von fossilen Treib- und Brennstoffen in landwirtschaftlichen Maschinen und Gebäuden, sowie insbesondere durch biochemische Prozesse bei der Tier- und Pflanzenproduktion. Durch Effizienzsteigerungen und durch eine Anpassung der Intensität kann und soll die Landwirtschaft einen Beitrag zum Klimaschutz leisten (BLW, 2011). Für die Festlegung und Kontrolle von entsprechenden Massnahmen und Zielen sind Emissionsinventare notwendig.

Die Tierhaltung ist für einen Grossteil der landwirtschaftlichen Emissionen verantwortlich. Gerber et al. (2013) schätzen dass weltweit 14.5% der anthropogenen THG-Emissionen auf die Tierhaltung zurückzuführen sind. Über die Methanemissionen (CH₄) aus der Pansenfermentation und der Hofdüngerlagerung tragen insbesondere die Wiederkäuer überproportional zu den Emissionen bei. Gemäss Gerber et al. (2013) sind Rindfleisch- und Milchproduktion mit 41 respektive 20% an den globalen Tierhaltungsemissionen beteiligt. Eine weitere wichtige landwirtschaftliche THG-Quelle sind die Lachgasemissionen (N₂O) aus der Hofdüngerlagerung und dem Stickstoffdüngerumsatz. Über den Futterbau lassen sich auch diese Emissionen teilweise der Tierhaltung zuordnen.

In der vorliegenden Arbeit werden die THG-Emissionen der schweizerischen Landwirtschaft vorgestellt. Anhand der Zuordnung der Emissionen auf die Tier- und Pflanzenproduktion wird die Bedeutung der Tierhaltung untersucht. Schliesslich wird der Frage nachgegangen, welche Bedeutung die Tierhaltung bei der Reduktion der THG-Emissionen hat und welche Rolle diesbezüglich der Land- und Ernährungswirtschaftspolitik zukommt.

Material und Methoden

Die THG-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Produktion werden von Agroscope jährlich geschätzt und als Zeitreihe – zurückreichend bis 1990 – im Sektor drei des nationalen THG-Inventars ausgewiesen (FOEN, 2017, Kapitel 5). Die Berechnungen erfolgen nach internationalen Vorgaben mit Hilfe der Rahmenmethoden des Weltklimarats (IPCC, 2006), welche jedoch in vielen Bereichen den spezifischen Gegebenheiten der Schweizer Landwirtschaft angepasst worden sind (Tier 2 oder 3 Ansätze).

Emissionen des Landwirtschaftssektors des nationalen Inventars

Die CH₄-Emissionen aus der Verdauung der Nutztiere werden aufgrund der Bruttoenergieaufnahme und der Methanrate (Y_m), welche dem prozentualen Energieverlust durch CH₄ entspricht, berechnet. Die Bruttoenergieaufnahme wird anhand der leistungsspezifischen Fütterungsempfehlungen abgeschätzt (Agroscope, 2016; SBV, 2016; Flisch et al., 2009). Die Methanrate entspricht mit Ausnahme der Milchkühe den Standardwerten des IPCC (IPCC, 2006). Entsprechend ihrer grossen Bedeutung wird für die Milchkühe ein detailliertes Fütterungsmodell verwendet (Agroscope, 2014a). Aufgrund der Leistungsparameter der Tiere (Körpergewicht, Milchproduktion, Trächtigkeit) wird gemäss den Fütterungsempfehlungen (Jans et al., 2015) der Nettoenergiebedarf und der Bedarf an absorbierbarem Protein im Darm (APD) ermittelt. Zur Deckung dieser Bedarfswerte wird für Milchkühe in der Schweiz eine durchschnittliche Grundfütterration für Winter und Sommer gemäss Menzi et al. (2016) definiert. Der zusätzliche Bedarf an Kraftfutter wird vom Fütterungsmodell sodann intrinsisch ermittelt, unter der Voraussetzung eines ausgeglichenen Verhältnisses von Energie und Protein. Aufgrund der Werte in der schweizerischen Futtermitteldatenbank kann schliesslich anhand der Zusammensetzung der Gesamtfütterration die Bruttoenergieaufnahme der Tiere ermittelt werden. Basierend auf Respirationskammermessungen an der ETHZ wurde eine Methanrate von 6.9% der Bruttoenergie veranschlagt (Zeitzi et al., 2012; Estermann et al., 2001; Külling et al., 2002; Staerfl et al., 2012).

CH₄-Emissionen aus der Hofdüngerlagerung werden aufgrund der Ausscheidung an vergärbarem Substrat (VS) der Tiere und aufgrund der Charakteristiken der Hofdünger und der Hofdüngerlagersysteme berechnet. Der MCF-Wert (Methane Conversion Factor) gibt dabei an, zu wieviel Prozent das maximal mögliche Methanbildungspotential unter spezifischen Lagerbedingungen ausgeschöpft wird. Für Festmist, Tiefstreu, Geflügelmist und Weide werden standard-MCF-Werte des IPCC verwendet (IPCC, 2006). Aufgrund der Wichtigkeit der Güllelagerungssysteme wird der entsprechende MCF-Wert mit einem temperaturabhängigen Modellansatz von Mangino et al. (2001) abgeschätzt.

N₂O-Emissionen aus den Hofdüngerlagersystemen und aus den landwirtschaftlichen Böden werden aufgrund eines Stickstoffflussmodells berechnet, das sich primär am schweizerischen Ammoniakmodell und somit an den Ergebnissen der entsprechenden Betriebsumfragen orientiert (Kupper et al., 2013). Dementsprechend wird die Schweiz-spezifische Produktionstechnik und deren Entwicklung in der Emissionsmodellierung berücksichtigt. Direkte N₂O-Emissionen entlang der verschiedenen Stufen des Stickstoffflusses (Hofdüngerlagerung, Weideemissionen, Düngerausbringung, Erntereste, Stickstoffmineralisierung) werden mit Hilfe von Standardemissionsfaktoren des IPCC berechnet. Für indirekte N₂O-Emissionen nach Verlagerung von Stickstoff in Form von Ammoniak und Stickoxiden wird der Emissionsfaktor von Bühlmann et al. (2015) verwendet.

CO₂-Emissionen aus der Kalk- und Harnstoffdüngung werden aufgrund der IPCC-Standardmethode abgeschätzt (IPCC, 2006; FOEN, 2017; Agroscope, 2014b).

Für weitere Details der Berechnungsmethoden im Sektor 3 „Landwirtschaft“ wird an dieser Stelle auf den schweizerischen THG-Inventarbericht verwiesen (FOEN, 2017).

Zusätzlich berücksichtigte Emissionen

Um ein Gesamtbild der landwirtschaftlichen THG-Emissionen zu erstellen, werden weitere Emissionen, die nicht im Landwirtschaftssektor des nationalen Inventars ausgewiesen werden, berücksichtigt. Dazu gehören die energetischen Emissionen (landwirtschaftliche Fahrzeuge und Maschinen, Gewächshäuser, Stallheizungen etc.), CO₂-Quellen und –Senken der landwirtschaftlichen Böden (Landnutzung und Landnutzungsänderung, land use and land use change, LULUC) sowie Vorläuferemissionen die bei der Herstellung von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln anfallen (Dünger, Futtermittel, Pflanzenschutzmittel). Die entsprechenden THG-Flüsse werden entweder direkt dem schweizerischen THG-Inventar entnommen (Energie, LULUC) oder gemäss Bretscher et al. (2014) abgeschätzt (Energie, Vorläuferemissionen).

Aufteilung der Emissionen

Emissionen aus der Verdauung der Nutztiere und aus der Hofdüngerlagerung werden vollumfänglich der Tierhaltung zugeschrieben und lassen sich direkt den einzelnen Tierkategorien zuordnen. Die Aufteilung der N₂O-Emissionen aus den landwirtschaftlichen Böden und aller übrigen Emissionen ist meist wesentlich weniger eindeutig und wurde aufgrund einer vereinfachenden Zuordnung gemäss Tabelle 1 vorgenommen.

Tabelle 1: Aufteilung der Treibhausgasemissionen auf Tierhaltung und Pflanzenbau.

THG	Emissionsquelle	Tierhaltung	Pflanzenbau
CH ₄	Verdauung	direkte Zuordnung zu den einzelnen Tierkategorien	
CH ₄	Hofdüngerlagerung	direkte Zuordnung zu den einzelnen Tierkategorien	
N ₂ O	Hofdüngerlagerung	direkte Zuordnung zu den einzelnen Tierkategorien	
N ₂ O	Hofdüngerausbringung	100% dem Futterbau zugeordnet	
N ₂ O	Handelsdüngerausbringung		100% dem Pflanzenbaubau zugeordnet
N ₂ O	Stickstoffeintrag der Erntereste	Erntereste aus dem Futterbau	Erntereste aus dem Pflanzenbau
N ₂ O	Stickstoff-Mineralisierung in landw. Böden		100% dem Pflanzenbau zugeordnet
CO ₂	Kalk- und Harnstoffdünger		100% dem Pflanzenbau zugeordnet
CO ₂ Äq.	LULUC	Emissionen des Graslands	Emissionen des Ackerlands
CO ₂ Äq.	Energie (landw. Fahrzeuge und Maschinen)	Zuordnung entsprechend Flächenanteil Futterbau	Zuordnung entsprechend Flächenanteil Pflanzenbau
CO ₂ Äq.	Futtermittelimporte	100% der Tierhaltung zugeordnet	
CO ₂ Äq.	Übrige Emissionen (Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel, Beheizung)		100% dem Pflanzenbau zugeordnet

Ergebnisse und Diskussion

Treibhausgasemissionen nach Emissionskategorien

2015 wurden von der schweizerischen Landwirtschaft insgesamt 8,2 Mio. t CO₂-Äquivalent verursacht (Abbildung 1). Dieses Total setzt sich zusammen aus den CH₄-Emissionen aus der Verdauung der Nutztiere (3,3 Mio. t CO₂-Äquivalent), den CH₄- und N₂O-Emissionen aus der Hofdüngerlagerung (1,2 Mio. t CO₂-Äquivalent) und den N₂O-Emissionen aus den landwirtschaftlichen Böden (1,5 Mio. t CO₂-Äquivalent). Nur punktuell von Bedeutung sind die CO₂-Emissionen aus der Kalk- und Harnstoffdüngung. Die Beiträge der CO₂-Quellen und -Senken in den landwirtschaftlichen Böden (LULUC) und der CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Treib- und Brennstoffen (Energie) belaufen sich auf 0,7 Mio. t CO₂-Äquivalent und 0,6 Mio. t CO₂-Äquivalent. Weiter entstehen bei der grösstenteils im Ausland stattfindenden Herstellung von Produktionsmitteln 0,8 Mio. t CO₂-Äquivalent (Vorleistungen).

Seit 1990 sind die Emissionen trotz leicht ansteigender Produktion um 8.5% zurückgegangen, hauptsächlich durch eine effizientere Tierproduktion (Milchleistungssteigerung) und eine verbesserte Düngeeffizienz (Spiess, 2011; Zundel, 2016). Die grössten Veränderungen fanden anfangs der 90'er Jahre während der Einführung des ökologischen Leistungsnachweises statt.

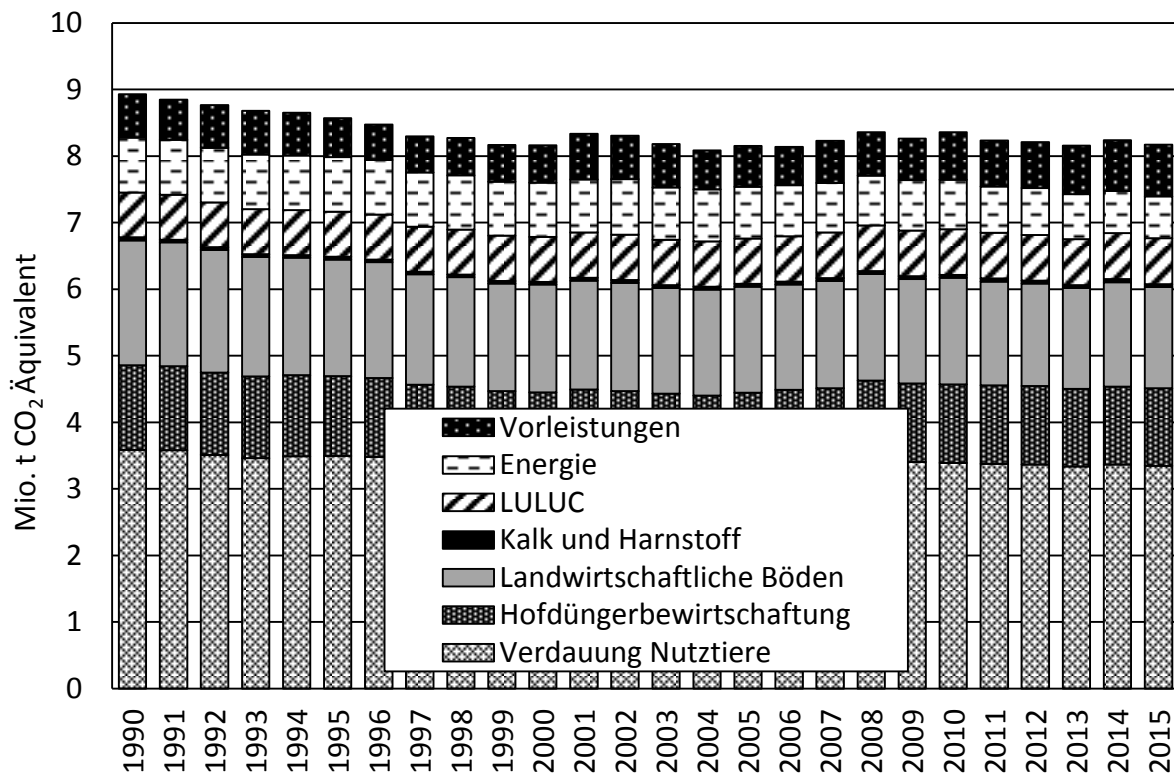


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen der Schweizer Landwirtschaft 1990-2015.

Methanemissionen aus Verdauung und Hofdüngerlagerung

Die CH₄-Emissionen in der Schweiz stammen zu 83% aus der Landwirtschaft (Hiller et al., 2014). Die Schätzungen aufgrund der bottom-up-Inventare stimmen relativ gut mit unabhängigen Messungen in der Atmosphäre überein (Henne et al., 2016). Die grössten Unsicherheiten bestehen bei den Emissionen aus der Güllelagerung, für die es zurzeit in der Schweiz noch keine Messungen unter Praxisbedingungen gibt.

Die landwirtschaftlichen CH₄-Emissionen stammen zu 100% aus der Tierhaltung und machen gut 50% der landwirtschaftlichen Gesamtemissionen aus (Abbildung 2). Knapp über 90% davon werden durch das Rindvieh verursacht und gut 60% allein von den Milchkühen. Beim Rindvieh stammen 84% der CH₄-Emissionen aus der Pansenfermentation. Nach dem Rindvieh sind die Schweine mit 5.3% die wichtigste Tierkategorie hinsichtlich der CH₄-Emissionen, welche in diesem Fall zu über 80% aus der Hofdüngerlagerung stammen.

Lachgasemissionen aus der Hofdüngerlagerung und aus Böden

N₂O-Emissionen aus der Hofdüngerlagerung und aus den landwirtschaftlichen Böden machen 23% der hier betrachteten Gesamtemissionen aus. Im Gegensatz zu den CH₄-Emissionen können die N₂O-Emissionen bisher nicht durch unabhängige Messungen in der Atmosphäre validiert werden. Die

Zuverlässigkeit der grundlegenden Stickstoffflüsse und –Pools wird jedoch durch die Stickstoffbilanz der Schweizer Landwirtschaft gut abgesichert (z.B. Spiess, 2011). Die Höhe der Emissionsfaktoren ist hingegen mit grossen Unsicherheiten behaftet. Messungen in der Schweiz weisen allerdings nicht darauf hin, dass die Standardfaktoren für die direkten N₂O-Emissionen des IPCC im Mittel zu massgeblichen Unter- oder Überschätzungen führen (z.B. Flechard et al., 2005; Flechard et al., 2007; Skinner et al., 2016). Grössere Vorbehalte müssen vor allem beim Emissionsfaktor der indirekten N₂O-Emissionen von Bühlmann et al. (2015) gemacht werden. Dieser liegt zwar noch im Vertrauensbereich des IPCC, ist aber mit 2.5% anderthalb mal so hoch wie der Standardemissionsfaktor. Die Unsicherheiten der N₂O-Emissionsfaktoren dominieren insgesamt die Unsicherheiten der landwirtschaftlichen THG-Emissionen und sind auch für das Gesamtinventar der schweizerischen Emissionen massgebend (FOEN, 2017).

Während die CH₄-Emissionen eindeutig der Tierhaltung und den einzelnen Tierkategorien zugeschrieben werden können, beruht die Aufteilung der N₂O-Emissionen auf vereinfachenden Annahmen. So wird zum Beispiel davon ausgegangen, dass sämtliche Hofdünger (10.7% der Gesamtemissionen) im Futterbau und alle Handelsdünger (5.9% der Gesamtemissionen) im Pflanzenbau angewandt werden. Ein Vergleich mit dem Normbedarf der Kulturen zeigt, dass der N-Bedarf im Futterbau alleine mit den Hofdüngern gedeckt werden kann, allerdings nur unter der Annahme einer hundertprozentigen N-Verfügbarkeit. Bei den Kulturen des Pflanzenbaus wird der Bedarf durch die verfügbaren Handelsdünger um etwa das Zweifache übertroffen. Somit ist zu vermuten, dass ein wesentlicher Teil der Handelsdünger auch im Futterbau eingesetzt wird und die Emissionen der Tierhaltung mit dem vorliegenden Ansatz eher unterschätzt werden.

Übrige Treibhausgasemissionen

Die übrigen Emissionen, die nicht im Landwirtschaftssektor des nationalen THG-Inventars rapportiert werden (LULUC, Energie, Vorleistungen), sind mit 26% an den landwirtschaftlichen THG-Emissionen beteiligt. 11.2% wurden der Tierhaltung zugeordnet und 14.5% der Pflanzenproduktion. Die Zuteilung auf Tier- und Pflanzenproduktion ist zu 2/3 eindeutig (LULUC, Futtermittelimporte, Gewächshausbeheizung). Die Aufteilung der restlichen Emissionen (Energie, übrige Vorleistungen) beruht wiederum auf grobe Annahmen. Durch die vollumfängliche Zuteilung der Vorläuferemissionen aus der Mineraldüngerherstellung zum Pflanzenbau, dürften die Emissionen der Tierhaltung wiederum eher unterschätzt werden.

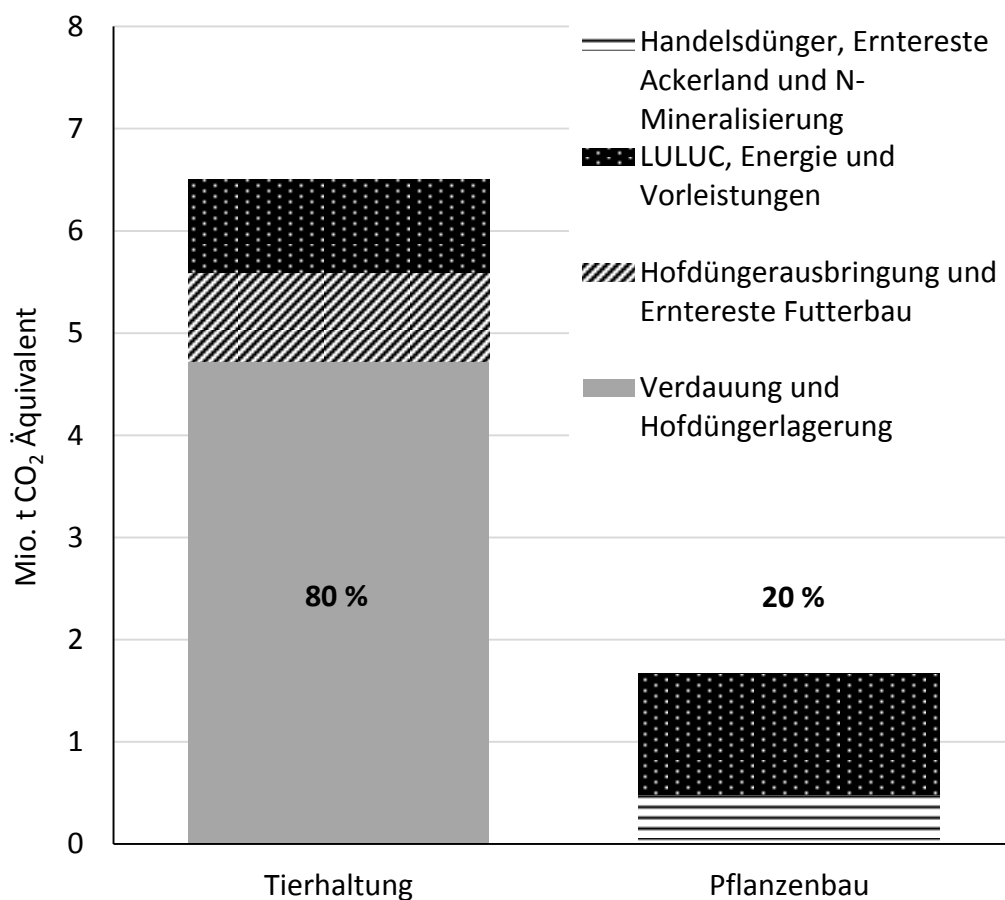


Abbildung 2: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Schweizer Landwirtschaft 2015 auf die Tierhaltung und den Pflanzenbau.

Bedeutung der Tierhaltung und Konsequenzen für Emissionsminderungsstrategien

Insgesamt führt die gewählte Zuordnung zu einer Aufteilung der THG-Emissionen von 80:20 % auf die Tierhaltung und den Pflanzenbau. Der hohe Anteil der Emissionen der unmittelbar dem Rindvieh (59%) respektive den Wiederkäuern im allgemeinen (63%) zugeordnet werden kann unterstreicht die Bedeutung dieser Tierkategorien.

Die Bedeutung der landwirtschaftlichen THG-Emissionen im Allgemeinen und der Tierhaltung im Speziellen zeigt sich nicht nur in den nationalen Inventaren, welche die Produktionsperspektive abbilden, sondern auch aus der Konsumperspektive. Nach Jungbluth et al. (2011) sind die Nahrungsmittel mit ungefähr 10 Mio. t CO₂-Äquivalent (11% der Gesamtnachfrage) die wichtigste Kategorie des Güterkonsums in der Schweiz. Weitere 3,5 Mio. t CO₂-Äquivalent entstehen durch die Bereitstellung von anderen Landwirtschaftlichen Gütern. Bretscher et al. (2014) schätzen die Emissionen der Land- und Ernährungswirtschaft aus der Konsumperspektive für das Jahr 2010 etwas höher auf 16,3 Mio. t CO₂-Äquivalent. Davon entfallen über 80% auf tierische Produkte und fast 50% alleine auf Rindfleisch und Milchprodukte (Bretscher et al., 2015).

Trotz der erwähnten Unschärfe bei der Berechnung und vor allem bei der sektoriellen Zuteilung der Emissionen (siehe dazu z.B. auch Herrero et al., 2011) wird die grosse Bedeutung der Tierhaltung für die THG-Emissionen in zahlreichen Studien hervorgehoben (Leip et al., 2010; Sakadevan and Nguyen, 2017; Steinfeld et al., 2006). Auch die herausragende Rolle der Wiederkäuer wurde bereits verschiedentlich thematisiert (z.B. Moss et al. 2000; Ripple et al. 2014). Aufgrund der hohen THG-Emissionen wird folglich dem Tierhaltungssektor im Allgemeinen (Bellarby et al., 2013; Havlik et al., 2014; Herrero et al., 2016; Hristov et al., 2013; GRA-SAI, 2014) und den Wiederkäuern im Speziellen (Caro et al., 2016; Grainger and Beauchemin, 2011; Martin et al., 2010) eine entsprechende Verantwortung bei der Emissionsminderung zugeschrieben. Das technische Reduktionspotential wird allerdings als limitiert angesehen (z.B. 15-19%; Leip et al., 2010) und ist häufig durch ökonomische und/oder politische Rahmenbedingungen zusätzlich begrenzt (z.B. Herrero et al., 2016). Diverse Studien wie zum Beispiel von Bryngelsson et al. (2016) oder Hedenus et al. (2014) kommen daher zum Schluss, dass technische Massnahmen alleine nicht genügen, um die gesetzten Reduktionsziele zu erreichen. Es wird darauf hingewiesen, dass zusätzliche Anstrengungen durch Umstellung der Ernährungsgewohnheiten hin zu vermehrt vegetarischen Produkten notwendig sind.

Auch die Klimastrategie der Landwirtschaft der Schweiz sieht Handlungsbedarf sowohl auf der technischen, betrieblichen und organisatorischen Ebene als auch auf der Verbraucherseite (BLW, 2011). Mit der Umlagerung der tierbezogenen Direktzahlungsbeiträge auf die Fläche soll mit der Agrarpolitik AP14-17 ein Signal hin zu einer weniger tierintensiven Landwirtschaft gegeben werden (Schweizerischer Bundesrat, 2012). Die entsprechenden Prognosen der Entwicklung der Agrarstrukturen rechnen demzufolge mit einem Rückgang der Tierpopulation (Möhring et al., 2015). Die Entwicklung der Rindviehbestände 2014 und 2015 verlief dann auch entsprechend den Erwartungen. Mit der bisherigen Minderungsrate kann das Ziel der Klimastrategie Landwirtschaft, die THG-Emissionen bis 2050 um mindestens einen Drittel gegenüber 1990 zu senken, jedoch trotzdem nicht erreicht werden. Weitere Anstrengungen sind notwendig. Die hier gezeigten Resultate legen nahe, dass diese vor allem in der Tierhaltung und insbesondere bei den Wiederkäuern zu verorten sind.

Literaturverzeichnis

Agroscope (2014a): Fütterungstool zur Ermittlung des Energie- und Stickstoffumsatzes von Milchkühen in der Schweiz. Agroscope, Institut für Nutztierwissenschaften (INT), Posieux, Schweiz.

Agroscope (2014b): Lime application in Swiss Agriculture. Internal documentation by Bretscher, D.. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station (ART), Zürich, Switzerland.

- Agroscope (2016): Fütterungsempfehlungen für Wiederkäuer (Grünes Buch). Agroscope, Posieux, Schweiz. <https://www.agroscope.admin.ch>. (10.11.2016)
- Bellarby, J., Foereid, B., Hastings, A. and Smith, P. (2008): Cool Farming: Climate impact of agriculture and mitigation potential. Greenpeace, Amsterdam, The Netherlands.
- Bellarby, J., Tirado, R., Leip, A., Weiss, F., Lesschen, J.P. and Smith, P. (2013): Livestock greenhouse gas emissions and mitigation potential in Europe. *Global Change Biology* **19** (1): 3-18.
- Bretscher, D., Leuthold-Stärfl, S., Felder, D. und Fuhrer, J. (2014): Treibhausgasemissionen aus der schweizerischen Land- und Ernährungswirtschaft. *Agrarforschung Schweiz* **5** (11+12): 458-465.
- Bretscher, D., Lansche, J. und Felder, D. (2015): Klimaschutz und Ernährung. In: *Agrarbericht 2015*. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern, Schweiz.
- Bryngelsson, D., Wirsenius, S., Hedenus, F. and Sonesson, U. (2016): How can the EU climate targets be met? A combined analysis of technological and demand-side changes in food and agriculture. *Food Policy* **59**: 152-164.
- Bühlmann, T., Hiltbrunner, E., Körner, Ch., Rihm, B. and Achermann, B. (2015): Induction of indirect N₂O and NO emissions by atmospheric nitrogen deposition in (semi-)natural ecosystems in Switzerland. *Atmospheric Environment* **103** (0): 94–101.
- Bundesamt für Landwirtschaft (2011): Klimastrategie Landwirtschaft: Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern, Schweiz.
- Caro, D., Kebreab, E. and Mitloehner, F. M. (2016): Mitigation of enteric methane emissions from global livestock systems through nutrition strategies. *Climatic Change* **137** (3): 467-480.
- Estermann, B. L., Wettstein, H.-R., Sutter, F. and Kreuzer, M. (2001): Nutrient and energy conversion of grass-fed dairy and suckler beef cattle kept indoors and on high altitude pasture. *Animal Research* **50** (6): 477–493.
- Flechard, C.R., Neftel, A., Jocher, M., Ammann, C. and Fuhrer, J. (2005): Bi-directional soil/atmosphere N₂O exchange over two mown grassland systems with contrasting management practices. *Global Change Biology* **11** (12): 2114-2127.
- Flechard, C.R., Ambus, P., Skiba, U. et al. (2007): Effects of climate and management intensity on nitrous oxide emissions in grassland systems across Europe. *Agriculture Ecosystems & Environment* **121** (1-2): 135-152.
- Flisch, R., Sinaj, S., Charles, R. und Richner, W. (2009): Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau 2009. Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW und Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, *Agrarforschung* **16** (2).
- FOEN (2017): Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2015: National Inventory Report, CRF-tables. Submission of 11 April 2017 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Switzerland.

Gerber, P., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Faluccci, A. and Tempio, G. (2013): Tackling climate change through livestock - A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

Grainger, C. and Beauchemin, K.A. (2011): Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Animal Feed Science and Technology* **166–167** (0): 308-320.

GRA-SAI (2014): Reducing greenhouse gas emissions from livestock: Best practice and emerging options. Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases (GRA), Sustainable Agriculture Initiative (SAI).

Havlík, P., Valin, H., Herrero, M., Obersteiner, M., Schmid, E., Rufino, M.C., Mosnier, A., Thornton, P.K., Böttcher, H., Conant, R.T., Frank, S., Fritz, S., Fuss, S., Kraxner, F. and Notenbaert, A. (2014): Climate change mitigation through livestock system transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111** (10): 3709-3714.

Hedenus, F., Wirsenius, S. and Johansson, D.A.J. (2014): The importance of reduced meat and dairy consumption for meeting stringent climate change targets. *Climatic Change* **124** (1): 79-91.

Henne, S., Brunner, D., Oney, B., Leuenberger, M., Eugster, W., Bamberger, I., Meinhardt, F., Steinbacher, M. and Emmenegger, L. (2016): Validation of the Swiss methane emission inventory by atmospheric observations and inverse modelling. *Atmos. Chem. Phys.* **16** (6): 3683-3710.

Herrero, M., Gerber, P., Vellinga, T., Garnett, T., Leip, A., Opio, C., Westhoek, H.J., Thornton, P. K., Olesen, J., Hutchings, N., Montgomery, H., Soussana, J.F., Steinfeld, H. and McAllister, T.A. (2011): Livestock and greenhouse gas emissions: The importance of getting the numbers right. *Animal Feed Science and Technology* **166-167**: 779-782.

Herrero, M., Henderson, B., Havlik, P., Thornton, P.K., Conant, R.T., Smith, P., Wirsenius, S., Hristov, A.N., Gerber, P., Gill, M., Butterbach-Bahl, K., Valin, H., Garnett, T. and Stehfest, E. (2016): Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change* **6** (5): 452-461.

Hiller, R.V., Bretscher, B., DelSontro, T., Diem, T., Eugster, W., Henneberger, R., Hobi, S., Hodson, E., Imer, D., Kreuzer, M., Künzle, T., Merbold, L., Niklaus, P.A., Rihm, B., Schellenberger, A., Schroth, M.H., Schubert, C.J., Sigrist, H., Stieger, J., Buchmann, N. and Brunner, D. (2014): Anthropogenic and natural methane fluxes in Switzerland synthesized within a spatially explicit inventory. *Biogeosciences* **11**: 1941–1959.

Hristov, A.N., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., Frikins, J., Rotz, A., Dell, C., Adesogan, A., Yang, W.Z., Tricarico, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Dijkstra, J. and Oosting, S. (2013): Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production: A review of technical options for non-CO₂ emissions. *Animal Production and Health Paper No. 177*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara T. and Tanabe, K. (eds.). Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan.

Jans, F., Kessler, J., Münger, A. und Schlegel, P. (2015): Fütterungsempfehlungen für die Milchkuh. In: Fütterungsempfehlungen für Wiederkäuer (Grünes Buch), Kapitel 4. Agroscope, Posieux, Schweiz.

Jungbluth, N., Nathani, C., Stucki, M. and Leuenberger, M. (2011): Environmental Impacts of Swiss Consumption and Production: A combination of input-output analysis with life cycle assessment. Environmental studies no. 1111. Federal Office for the Environment, Bern, Switzerland.

Külling, D.R., Dohme, F., Menzi, H., Sutter, F., Lischer, P. and Kreuzer, M. (2002): Methane emissions of differently fed dairy cows and corresponding methane and nitrogen emissions from their manure during storage. *Environmental Monitoring and Assessment* **79** (2): 129–150.

Kupper, T., Bonjour, C., Achermann, B., Zaucker, F., Rihm, B. und Menzi, H. (2013): Ammoniakemissionen in der Schweiz 1990–2010 und Prognose bis 2020. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Zollikofen, Schweiz.

Leip, A., Weiss, F., Wassenaar, T., Perez, I., Fellmann, T., Loudjani, Ph., Tubiello, F., Grandgirard, D., Monni, S. and Biala, K. (2010): Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions (GGELS) - final report. European Commission, Joint Research Centre (JRC), Ispra, Italy.

Mangino, J., Bartram, D. and Brazy, A. (2001): Development of a methane factor to estimate emissions from animal waste lagoons. U.S.EPA's 17th Annual Emission Inventory Conference, Atlanta GA. U.S. EPA, Washington, D.C., USA.

Martin, C., Morgavi, D.P. and Doreau, M. (2010): Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *Animal* **4** (3): 351-365.

Menzi, H., Arrigo, Y., Huguenin, O., Münger, A., Schori, F., Wyss, U. und Schlegel, P. (2016): Neue Ausscheidungsrichtwerte für Milchkühe. *Agrarforschung Schweiz* **7** (10): 428-435.

Möhring, A., Mack, G., Ferjani, A., Kohler, A. and Mann, S. (2015): Swiss Agricultural Outlook. Agroscope Science. Agroscope, Ettenhausen, Switzerland.

Moss, A.R., Jouany, J.-P. and Newbold, J. (2000): Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Ann. Zootech.* **49** (3): 231-253.

Ripple, W.J., Smith, P., Haberl, H., Montzka, S.A., McAlpine, C. and Boucher, D.H. (2014): Ruminants, climate change and climate policy. *Nature Climate Change* **4** (1): 2-5.

Sakadevan, K. and Nguyen, M.L. (2017): Chapter Four - Livestock production and its impact on nutrient pollution and greenhouse gas emissions. *Advances in Agronomy* **141**: 147-184.

SBV (2016): Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung, 2016. Schweizer Bauernverband (SBV), Brugg, Schweiz.

Schweizerischer Bundesrat (2012): Botschaft zur Weiterentwicklung der Agrarpolitik in den Jahren 2014–2017 (Agrarpolitik 2014–2017). Schweizerischer Bundesrat 01.02.2012. Bern, Schweiz.

Skinner, C., Mäder, P., Fließbach, A. and Gattinger, A. (2016): Determination of greenhouse gas sources and sinks in Swiss arable soils. Final Report. Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), Frick, Switzerland.

Spiess, E. (2011): Nitrogen, phosphorus and potassium balances and cycles of Swiss agriculture from 1975 to 2008. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **91** (3): 351–365.

Staerfl, S.M., Amelchanka, S.L., Kälber, T., Soliva, C.R., Kreuzer, M. and Zeitz, J.O. (2012): Effect of feeding dried high-sugar ryegrass ('AberMagic') on methane and urinary nitrogen emissions of primiparous cows. *Livestock Science* **150** (1–3): 293–301.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. and de Haan, C. (2006): *Livestock's long shadow: Environmental issues and options*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.

Zeitz, J.O., Soliva, C.R. and Kreuzer, M. (2012): Swiss diet types for cattle: how accurately are they reflected by the Intergovernmental Panel on Climate Change default values? *Journal of Integrative Environmental Sciences*, **9**: sup1, 199–216.

Zundel, Ch. (2016): Stickstoff in der Landwirtschaft. In: *Agrarbericht 2016*. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern, Schweiz.