

Nachhaltige Nutztierhaltung: mehr als nur Treibhausgase

Stefan J. Hörtenhuber^{1*}, Martin Seiringer-Gaubinger¹, Wilhelm Knaus¹, Verena Größbacher¹, Werner Zollitsch¹

Zusammenfassung

Tierhaltung ist mit negativen Umweltwirkungen wie Treibhausgasemissionen (THG), aber auch positiven Ökosystemleistungen und sozio-ökonomischen Leistungen verbunden. Sie verursacht etwa 8 % der österreichischen THG-Emissionen, die Sequestrierung durch Wälder kann einen Teil davon kompensieren. Für das Ziel eines klimaneutralen „Landsektors“ (Land- und Forstwirtschaft) bis 2035 sind noch große Anstrengungen nötig, eine gewisse Reduktion des Tierbestands erscheint nötig. Im EU-Vergleich weisen österreichische tierische Produkte etwa ein Viertel geringere CO₂-e auf. Die CO₂-Erwärmungsäquivalente nach der Methode GWP* zeigen, dass eine kontinuierliche leichte Abnahme der CH₄-Emissionen eine Umkehr des Temperaturanstiegs bewirken kann. Die heimische Tierhaltung erbringt viele positive Leistungen, insbesondere durch Dauergrünlandnutzung, u.a. betreffend Schutz von Böden, Biodiversität, Wasserqualität, Ernährungssicherung, Einkommen und Erhaltung von Infrastruktur in ländlichen Regionen. Die zukünftige Tierhaltung soll vermehrt Synergien von positiven Ökosystemleistungen mit reduzierten THG-Emissionen anstreben.

Schlagwörter: THG, CO₂-e, GWP*, Ökosystemleistungen

Summary

Livestock farming causes negative environmental impacts such as greenhouse gas (GHG) emissions, but also provides positive ecosystem services and socio-economic benefits. Livestock farming accounts for about 8 % of Austria's GHG emissions, sequestration by forests can only compensate for a part of this. For the goal of a climate-neutral land sector by 2035, great efforts are still needed and a certain reduction of livestock numbers seems necessary. In an EU-wide comparison, Austrian livestock production shows about 25% lower CO₂-e. The CO₂ warming equivalents according to the GWP* method show that a continuous slight decrease in CH₄ emissions can reverse the temperature increase. Austrian livestock production provides many positive services, especially through permanent grassland use, for example regarding soil protection, biodiversity and water quality, food security, income and maintenance of infrastructure in rural regions. Future livestock production should increasingly tackle synergies of positive ecosystem services with reduced GHG emissions.

Keywords: GHG, CO₂-e, GWP*, ecosystem services

Klimawandel und andere Nachhaltigkeitsaspekte

Klimawandelfolgen und die Begrenzung klimarelevanter Emissionen werden als eine der größten Herausforderungen für anthropogene und natürliche biologische Systeme gesehen (Steffen et al. 2015).

¹ Institut für Nutztierwissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien, Gregor-Mendel-Straße 33, 1180 WIEN

* Ansprechpartner: Dr. Stefan J. Hörtenhuber, email: stefan.hoertenhuber@boku.ac.at

Daneben werden in verschiedenen Studien weitere Umweltaspekte häufig genannt: Biodiversität, Landnutzung, Schad- und Nährstoffemissionen (N und P) sowie Wassernutzung (Steffen et al. 2015, Raworth 2017, Rockström et al. 2021).

Raworth (2017) definierte mit der „Doughnut economy“ ein Konzept, gemäß dem sich eine lebenswerte Gesellschaft innerhalb sozialer und planetarer Grenzen entfaltet. Zu bereits adressierten ökologischen Punkten kommen soziale Aspekte wie Gleichberechtigung oder politische Partizipation, Einkommen und Wohlstand.

Bei einigen sozio-ökonomischen Kriterien wie Ernährungssicherung, Arbeitsplätze und Einkommen oder Gesundheit leistet die Nutztierhaltung weltweit einen wichtigen Beitrag: 40 % der globalen landwirtschaftlichen Wertschöpfung kommen von der Tierhaltung (Salmon et al. 2020). Mindestens 600 Millionen Kleinbauern in Ländern des globalen Südens sind direkt auf Lebensmittel, zusätzliche Einkünfte und weitere Ökosystemleistungen von ihren Tieren angewiesen; 34 % des weltweit konsumierten Eiweißes sind tierischer Herkunft, meist von vergleichsweise hoher Qualität (FAO 2020). Ökosystemleistungen mit weltweiter Bedeutung beinhalten u.a. den Erhalt des fruchtbaren, erosionsarmen Graslands mit wichtigen Funktionen wie Kohlenstoff (C)-Speicherung und Förderung von Biodiversität (Leroy et al. 2018, Ryschawy et al. 2017).

Andererseits tragen Nutztiere zur Überschreitung planetarer Grenzen bei, wobei Land(über)nutzung und Klimawirkungen besonders hervorstechen. Weltweit beansprucht die Tierhaltung etwa 80 % der landwirtschaftlichen Flächen, produziert darauf allerdings nur 20 % der Nahrungsenergie (Ritchie 2020, Wirsenius 2010). Hinsichtlich Klimarelevanz stehen Nutztiere und insbesondere Wiederkäuer sowohl innerhalb der Landwirtschaft als auch im Vergleich mit anderen Sektoren im Zentrum der Kritik. U.a. weisen Twine (2021) und Willett et al. (2019) darauf hin, dass eine drastische Änderung der Ernährungsgewohnheiten mit mehr pflanzlichen Lebensmitteln in den Ländern des globalen Nordens dringend erforderlich sei, um eine Lebensmittelversorgung innerhalb planetarer Belastungsgrenzen zu ermöglichen.

Zwar ist die globale Tierhaltung nicht der einzige, aber ein wesentlicher Verursacher anthropogener CH_4 -Emissionen: 32 % der Methanemissionen stammen aus der Tierhaltung, 35 % aus Öl- und Gasförderung sowie Kohlebergbau (bis zur Distribution der fossilen Energie), 20 % von Mülldeponien und 8 % aus Reisanbau. Die UNEP (2021) empfiehlt, dass ein Sechstel bis ein Siebtel der bis zum Jahr 2030 einzusparenden CH_4 -Emissionen in der Tierhaltung erbracht werden.

Wir wollen im Folgenden erörtern, wie hoch die Relevanz der österreichischen Tierhaltung betreffend negativer Klimawirkungen sowie positiver Ökosystemleistungen und sozio-ökonomischen Folgewirkungen ist.

Klimawirkungen der österreichischen Nutztierhaltung

Auch in Österreich ist die Tierhaltung durch CH_4 -Emissionen für 6 % der CO_2 -Äquivalente (CO_2 -e) verantwortlich (siehe Anderl et al. 2021; GWP_{100} für das Jahr 2019); Milchkühe weisen den größten Anteil auf. CH_4 -Emissionen aus anderen Sektoren tragen nur 2 % zu CO_2 -e bei. Über die Hälfte der nationalen N_2O -Emissionen stehen über Futterbau und Wirtschaftsdünger mit der Tierhaltung in enger Verbindung, diese machen 4 % der nationalen CO_2 -e (Anderl et al. 2021; GWP_{100} für das Jahr 2019) aus. In Summe stammen damit ca. 10 % der CO_2 -e aus dem Sektor Landwirtschaft, davon über 8 % aus der Tierhaltung, wobei Emissionen aus anderen Sektoren, beispielsweise Vorleistungen der Industrie (u.a. zur Herstellung von Handelsdünger), aus Transporten und Feldarbeit nicht berücksichtigt sind.

Seit 1990 konnten nicht nur die Emissionen gesenkt, sondern auch die Produktivität erhöht werden, wodurch die CO_2 -e je Einheit bewirtschafteter Fläche und je Produkteinheit für fast alle Erzeugnisse gesunken sind. Eine Ausnahme bildet Rindfleisch, dessen Erzeugung durch den Ausbau der Mutterkuhhaltung etwas „extensiver“ aber „emissionsintensiver“

wurde. Je kg Milch konnten die CO₂-e von 1990 bis 2019 um ganze 32 % gesenkt werden (siehe Anderl et al. 2021, Statistik Austria 2021 ab).

Das Ziel der Klimaneutralität, wie es unter anderem mit der „LULUCF“-Verordnung der EU (2018/841) bis zum Jahr 2035 für den „Landsektor“ (Land- und Forstwirtschaft, Landnutzung und Landnutzungsänderungen) vorgesehen ist, scheint schwierig zu erreichen. Neben der CO₂-Sequestrierung in Wäldern (Anderl et al. 2021) sind Anstrengungen zur Emissionsminderung in der Tierhaltung, u.a. durch eine Verminderung der Tierbestände, nötig.

Einfacher wäre unter österreichischen Bedingungen die „Klimaneutralität“ zu erreichen und obendrein wäre es eine brauchbarere Bewertung hinsichtlich z.B. Klimazielen des Pariser Abkommens, wenn nicht die CO₂-e des GWP₁₀₀ bewertet würden, sondern die „CO₂-Erwärmungsäquivalente“ (CO₂-we) nach der Methode GWP* (Allen et al. 2018, Smith et al. 2021). Während das GWP₁₀₀ die Wirkung einer Emission auf den Strahlungsantrieb (in W je m²) misst, berücksichtigt das GWP* auch die Änderungen aktueller CH₄-Emissionen im Verhältnis zum Abbau der historischen Emissionen und bezieht sich direkt auf den durch die Emission verursachten Temperaturanstieg. Anders als CO₂ und N₂O reichert sich CH₄ bei gleichbleibender Emissionsintensität nicht in der Atmosphäre an, weil es nach durchschnittlich 12 Jahren wieder abgebaut wird. Bei einem kontinuierlichen leichten Rückgang des kurzlebigen THGs CH₄ ist sein Beitrag zur Temperaturerwärmung null bzw. „neutral“. Eine stärkere CH₄-Reduktion, wie sie über viele Jahre für Österreich sichtbar ist, kompensiert auch Teile des Temperaturanstiegs, der durch N₂O- und CO₂-Emissionen verursacht wird.

Die GWP*-Methode zeigt jedoch auch, dass ein Anstieg der CH₄-Emissionen eine hohe Klimawirkung aufweist. Für „neues“, zusätzlich emittiertes CH₄ macht der Umrechnungsfaktor des GWP* (die CO₂-we) in den ersten 20 Jahren etwa das Vierfache des GWP₁₀₀-Faktors (CO₂-e) aus. Daraus ergibt sich eine hohe Relevanz der CH₄-Emissionen, sowohl für negative Folgen als auch mögliche Minderungsoptionen. Unabhängig davon, ob die Klimawirkungen mit dem GWP₁₀₀ oder dem GWP* bewertet werden: ein Rückgang des CH₄ aus der Tierhaltung ist erforderlich, um Klimaziele wie sie z.B. im Pariser Klimaabkommen formuliert wurden, zu realisieren.

Erreicht werden können die reduzierten CH₄- und N₂O-Emissionen aus der Tierhaltung mit Maßnahmen, wie sie in *Tabelle 1* beschrieben werden. Manche der Minderungsoptionen gehen auch mit einer verbesserten Anpassung gegenüber Klimawandelfolgen einher, z.B. N-Fixierung durch Leguminosen, die den Humusgehalt und damit die Wasserspeicherkapazität der Böden erhöht.

Im internationalen Vergleich liegen die CO₂-e österreichischer tierischer Produkte relativ niedrig. Modifizierte Ergebnisse nach Leip et al. (2010) mit aktualisierten Umrechnungsfaktoren für CH₄ und N₂O zeigen, dass österreichische Erzeugnisse trotz großer Variabilität und Unsicherheiten numerisch deutlich geringere Emissionen als EU-Durchschnittswerte aufweisen; dies gilt bspw. für Milch (-24 %) ähnlich wie für Rindfleisch (-25 %) oder Schweinefleisch (-23 %). Viele der in *Tabelle 1* adressierten Minderungsoptionen sind in der heimischen Tierhaltung zumindest teilweise bereits umgesetzt, wie der Verzicht auf kritische Sojakomponenten bei der Milch- und der Eierzeugung. Trotzdem sollten weitere Emissionsreduktionen – möglichst gleichzeitig mit der Realisierung weiterer positiver Leistungen – umgesetzt werden.

In einem StartClim-Projekt wurden Faktoren zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit von Rinder- und Schweinebetrieben gegenüber Klimawandelfolgen definiert (*Abbildung 1*; Hörtenhuber und Zollitsch 2014). Der Versorgung mit Futter und Wasser kommt neben einem Hitzestress-vermindernden Haltungssystem eine wichtige Rolle zu. Synergien zu reduzierten THG-Emissionen, z.B. durch die Anpassung von Rationen zur Reduktion der CH₄-Verluste und den Anbau spezifischer Kulturen, die u.a. aufgrund eines reduzierten Düngereinsatzes mit geringen Lachgasemissionen verbunden sind, sind möglichst auszunutzen.

Maßnahme	Quellen
Alle Nutztierarten: Ersatz kritischer Futtermittel, v.a. von Soja(produkten) aus Südamerika mit Emissionen durch Landnutzungsänderungen	Bellarby et al. (2012); Hörtenhuber et al. (2010, 2011); Sasu-Boakye et al. (2014)
Alle Nutztierarten: Kofermentation des Wirtschaftsdüngers in einer Biogasanlage – Reduktion CH ₄ -Emissionen und Ersatz fossiler Energie	Hörtenhuber et al. (2010); Oehmichen et al. (2021)
Alle Nutztierarten: Emissionsmindernde Stallhaltungssysteme (z.B. Einstreusysteme mit regelmäßiger Entmistung, evtl. Kompoststall) und Wirtschaftsdüngerbehandlung wie Separierung, Ansäuerung, evtl. Kompostierung	Emmerling et al. (2020); Fillingham et al. (2017); Kupper et al. (2020)
Alle Nutztierarten: Reduktion der N-Saldi (Hoftorbilanzen), N-Fixierung durch Leguminosen statt synthetischer N-Handelsdünger	u.a. Hörtenhuber et al. (2013) für Milchrinder
Wiederkäuer: pflanzliche und synthetische Futtermittelzusatzstoffe zur Verminderung der enterogenen CH ₄ -Bildung	Abecia et al. (2018); Ballard et al. (2011); Belanche et al. (2020); Van Wesemael et al. (2019)
Rinder: Erhöhung Weideanteil (Wirtschaftsdüngerlagerung entfällt, Verminderung NH ₃ -Emissionen; verbesserte Futterqualität und damit Verminderung enterogener CH ₄ -Bildung, Leistungsanstieg)	Hörtenhuber et al. (2010); Steinwidder et al. (2018)
Rinder: Erhöhung Grundfutterqualität mit CH ₄ -Reduktion aus enterogener Fermentation, Produktivitätsanstieg	Beauchemin et al. (2011); Hörtenhuber et al. (2010); Knapp et al. (2014)
Milchkühe: Erhöhung Lebens- bzw. Lebenstagsleistung (Verdünnung THGe aus Aufzucht und durch Erhaltungsbedarf bedingt)	Hörtenhuber et al. (2010)

Tabelle 1: Relevante Maßnahmen der Treibhausgas-minderung für die österreichische Nutztierhaltung.

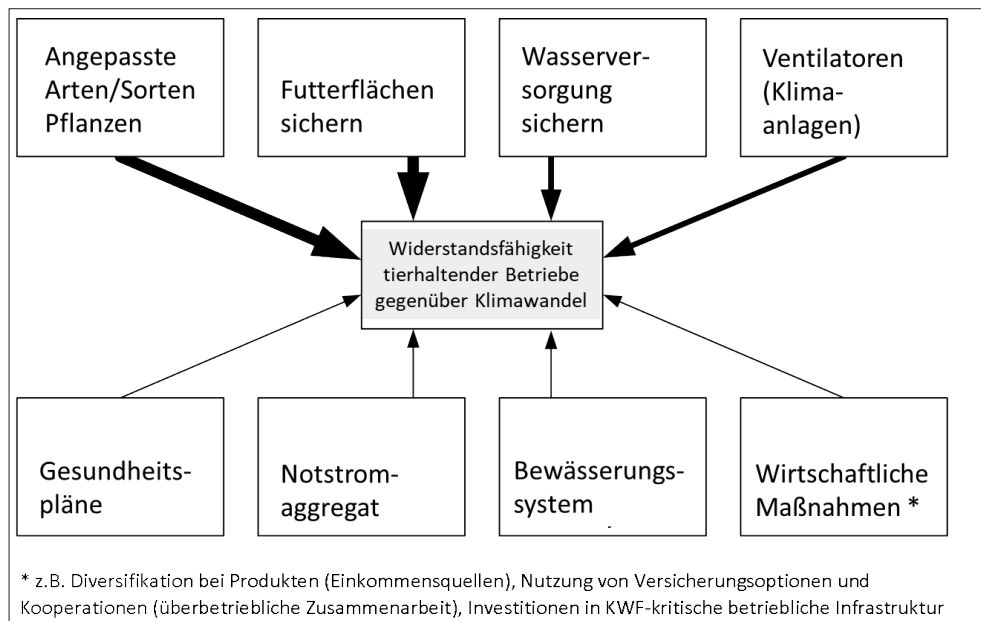


Abbildung 1: Resilienzfördernde Maßnahmen gegenüber Klimawandelfolgen (KWF) für Rinder- und Schweinebetriebe.

Ökosystemleistungen und sozio-ökonomische Wirkungen der österreichischen Tierhaltung

Extensive und semi-intensive Wiederkäuer-Produktionssysteme in Österreich erbringen mit der Nutzung von Dauergrünland eine Reihe von Ökosystemleistungen. Bewirtschaftetes Dauergrünland ist durch den dauerhaften Bewuchs erosionsstabiler als Ackerkulturen (Zessner et al. 2016), es schützt damit Böden und vermindert auch Lawinenabgänge (Tasser et al. 2003). Ebenso halten österreichische Dauergrünlandböden deutlich mehr Kohlenstoff (C) als Ackerböden (Gerzabek et al. 2003, Strebl et al. 2002, Anderl et al. 2021): Je Hektar sind in den oberen 30 cm des Bodens bei Dauergrünland durchschnittlich 70 t C und bei Ackerland 50 t C gespeichert. Durchschnittliches Dauer-

grünland bindet über den gesamten Bodenhorizont (C in Boden und Vegetation im Mittel der Aufwuchsperiode) nach eigenen Berechnungen auf Basis von Daten in Houghton und Hackler (2001) knapp 200 t C pro ha und ist damit vergleichbar mit durchschnittlichem Wald in unseren Breiten.

Tierhaltung ist bei Nutzung von Dauergrünland auch für hohe Trinkwasserqualitäten durch bspw. geringen Austrag von Nitrat vorteilhaft. Nach Eder et al. (2015) werden lediglich 3 % des auf Dauergrünland ausgebrachten N in Grund- und Oberflächengewässer ausgewaschen, während es bei Ackerland 28 % sind.

Die kleinstrukturierten landwirtschaftlichen Flächen Österreichs weisen, u.a. durch heimisches Dauergrünland, hohes Potenzial für einen Erholungswert und für Biodiversität auf (Schirpke et al. 2019, Stotten 2021). Besonders viele alpine und subalpine Flächen sind als „high nature value farmland“ (HNVF; „Biodiversitätsflächen“) ausgewiesen. HNVF-Flächen sind naturnahe landwirtschaftliche Flächen, d.h. Flächen außer Nutzung wie Ackerbrachen, oder Streuwiesen, Hutweiden, Almflächen, Bergmäher sowie ein- oder extensive zweimähdige Wiesen und Flächen mit Landschaftselementen. Neben extensiv genutzten Dauergrünlandflächen tragen auch extensiv bewirtschaftete Ackerflächen, z.B. extensiv genutzte Luzerne- und Feldfutterflächen, zu einem hohen Biodiversitätsgrad bei. Im Jahr 2018 machten HNVF-Flächen bei einer Invekos-Datenabfrage 34 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus, nach Holzer et al. (2019) konzentriert sich ein hohes Biodiversitätsvorkommen, gemessen an Heuschrecken und Tagfaltern, allerdings nur auf je ca. 5 % der Acker- und Grünlandfläche. Eine wichtige Funktion der Biodiversität für die Landwirtschaft ist die Bestäubung durch Insekten, z.B. Wildbienen, Hummeln oder Schwebfliegen. Studien zeigen bei einer Reihe landwirtschaftlicher Kulturen, u.a. bei Soja- und Ackerbohne oder Raps einen Rückgang der Erträge und der Ertragsstabilität, wenn diese Bestäuber nicht mehr vorhanden sind (Klein et al. 2007, Palmer et al. 2009).

Im Gegensatz zur intensiven Rindermast (maisbasierte Stier- und Kalbinnenmast) und der Mast von Schweinen oder Geflügel weisen Dauergrünland-basierte Produktionssysteme wie Jungrinder-, Kalbinnen- und Ochsenmast zwar einen hohen gesamten Flächenbedarf, aber einen geringen Ackerflächenbedarf je Produkteinheit und damit eine geringe Lebensmittelkonkurrenz bzw. eine hohe Lebensmittelkonversionseffizienz (LKE) auf. Während nach Ertl et al. (2016) die Erzeugung von Geflügel-, Schweine- und Stierfleisch im österreichischen Durchschnitt deutlich mehr humanernährungstaugliches Eiweiß verbraucht als in den Produkten enthalten ist, bilanzieren v.a. Milchrinder positiv in Hinblick auf die Bereitstellung von Eiweiß für die menschliche Ernährung.

Durch die Tierhaltung werden in peripheren Gebieten, beispielsweise in Kombination mit (Agro-) Tourismus und anderen Aktivitäten, Arbeitsplätze erhalten und die Bevölkerungsdichte, die Infrastruktur und kommunale Aktivitäten aufrechterhalten (Stotten 2021). Im internationalen Vergleich wird in Österreich mit einem Anteil von der tierischen Produktion von 47 % der agrarischen Wertschöpfung ein relativ hoher Wert erzielt (Statistik Austria 2021c).

Schlussfolgerungen

Trotz des verhältnismäßig starken Beitrags der Nutztierhaltung zu landwirtschaftlichen THG-Emissionen ist diese ein wichtiger Bestandteil der heimischen Landwirtschaft. Neben den Umweltwirkungen ist Tierhaltung mit vielen positiven Ökosystemleistungen bzw. sozio-ökonomischen Leistungen verbunden. Insofern erscheint ihre Erhaltung und Weiterentwicklung wichtig. Letztere soll weitere Emissionsreduktionen beinhalten, um die angepeilten Klimaziele zu erreichen und ihren Beitrag zu einem möglichst klimaneutralen „Landsektor“ zu leisten. Insbesondere sind solche Minderungsmaßnahmen anzustreben, die Synergien zu Ökosystemleistungen und sozio-ökonomischen Leistungen sowie Anpassungen an Klimawandelfolgen ermöglichen.

Literatur

- Abecia L., Martínez-Fernandez G., Waddams K., Martín-García A.I., Pinloche E., Creevey C.J., Denman S.E., Newbold C.J., Yáñez-Ruiz D.R. (2018) Analysis of the Rumen Microbiome and Metabolome to Study the Effect of an Antimethanogenic Treatment Applied in Early Life of Kid Goats. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02227>
- Allen M.R., Shine K.P., Fuglestedt J.S., Millar R.J., Cain M., Frame D.J., Macey A.H. (2018) A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1), 16. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0026-8>
- Ballard V., Aubert T., Tristant D., Schmidely P. (2011) Effects of plants extracts on methane production and milk yield for dairy cows. 18, 141.
- Beauchemin K.A., Janzen H.H., Little S.M., McAllister T. A., McGinn S.M. (2011) Mitigation of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada – Evaluation using farm-based life cycle assessment. *Animal Feed Science and Technology*, 166–167, 663–677. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.047>
- Belanche A., Newbold C., Morgavi D., Bach A., Zweifel B., Yáñez-Ruiz D. (2020) A Meta-analysis Describing the Effects of the Essential oils Blend Agolin Ruminant on Performance, Rumen Fermentation and Methane Emissions in Dairy Cows. *Animals*, 10(4), 620. <https://doi.org/10.3390/ani10040620>
- Bellarby J., Tirado R., Leip A., Weiss F., Lesschen J.P., Smith P. (2013) Livestock greenhouse gas emissions and mitigation potential in Europe. *Global Change Biology*, 19(1), 3–18. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02786.x>
- Eder A., Blöschl G., Feichtinger F., Herndl M., Klammler G., Hösch J., Erhart E., Strauss P. (2015) Indirect nitrogen losses of managed soils contributing to greenhouse emissions of agricultural areas in Austria: results from lysimeter studies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 101(3), 351–364. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9682-9>
- Emmerling C., Krein A., Junk J. (2020) Meta-Analysis of Strategies to Reduce NH₃ Emissions from Slurries in European Agriculture and Consequences for Greenhouse Gas Emissions. *Agronomy*, 10(11), 1633. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111633>
- Ertl P., Steinwidder A., Schönauer M., Krimberger K., Knaus W., Zollitsch W. (2016) Net food production of different livestock: A national analysis for Austria including relative occupation of different land categories / Netto-Lebensmittelproduktion der Nutztierhaltung: Eine nationale Analyse für Österreich inklusive relativer Flächenbeanspruchung. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 67(2), 91–103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/boku-2016-0009>
- FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations). (2020) Nutrition and livestock. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca7348en>
- Fillingham M.A., VanderZaag A.C., Burt S., Baldé H., Ngwabie N.M., Smith W., Hakami A., Wagner-Riddle C., Bittman S., MacDonald D. (2017) Greenhouse gas and ammonia

emissions from production of compost bedding on a dairy farm. *Waste Management*, 70, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.013>

Gerzabek M.H., Strebl F., Tulipan M., Schwarz S. (2005) Quantification of organic carbon pools for Austria's agricultural soils using a soil information system. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(Special Issue), 491–498. <https://doi.org/10.4141/S04-083>

Holzer T., Zuna-Kratky T., Bieringer G. (2019) Bewertung der Wirkung relevanter LE-Maßnahmen auf Heuschrecken und Tagfalter als Indikatorarten für Biodiversität (p. 58). <https://info.bmlrt.gv.at/dam/jcr:e50d0c0e-8dd2-4a63-8af2-61102051f107/Studie%202:%20Evaluierung%20Wirkung%20C3%96PUL-Ma%C3%9Fnahmen%20Heuschrecken%20und%20Tagfalter.pdf>

Hörtenhuber S.J., Lindenthal T., Zollitsch W. (2011) Reduction of greenhouse gas emissions from feed supply chains by utilizing regionally produced protein sources: the case of Austrian dairy production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(6), 1118–1127. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4293>

Hörtenhuber S., Lindenthal T., Amon B., Markut T., Kirner L., Zollitsch W. (2010) Greenhouse gas emissions from selected Austrian dairy production systems - model calculations considering the effects of land use change. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 25(4), 316–329. <https://doi.org/10.1017/S1742170510000025>

Hörtenhuber S., Zollitsch W. (2014) Entwicklung einer Bewertungsmethode für die Effekte des Klimawandels auf Produktion und Tierwohl sowie die Anpassungsfähigkeit der Nutztierhaltung, Endbericht von StartClim 2014.B [Endbericht von StartClim]. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung, Österreichische Bundesforste AG, Land Oberösterreich. Auftragnehmer: Universität für Bodenkultur, Institut für Nutztierwissenschaften., Wien.

Hörtenhuber S., Kirner L., Neumayr C., Quendler E., Strauss A., Drapela T., Zollitsch W. (2013) Integrative Bewertung von Merkmalen der ökologischen, ökonomischen und sozial-ethischen Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Produktionssysteme am Beispiel von Milchproduktionssystemen (p. 232). Universität für Bodenkultur - Department für Nachhaltige Agrarsysteme. https://dafne.at/content/report_release/750fba6e-e7b1-4c7f-9c53-61d1459fad26_0.pdf

Houghton R.A., Hackler J.L. (2001) Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850 to 1990. Carbon Dioxide Information Analysis Center, U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.

Klein A.-M., Vaissière B.E., Cane J.H., Steffan-Dewenter I., Cunningham S.A., Kremen C., Tscharntke T. (2007) Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1608), 303–313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>

Knapp J.R., Laur G.L., Vadas P.A., Weiss W.P., Tricarico J.M. (2014) Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of

reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, 97(6), 3231–3261. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>

Kupper T., Häni C., Neftel A., Kincaid C., Bühler M., Amon B., VanderZaag A. (2020) Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage - A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 300, 106963. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106963>

Leip A., Weiss F., Wassenaar T., Perez I., Fellmann T., Loudjani P., Tubiello F., Grandgirard D., Monni S., Biala K. (2010) Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions (GGELS). European Commission, Joint Research Centre. https://agritrop.cirad.fr/558780/1/document_558780.pdf

Leroy G., Hoffmann I., From T., Hiemstra S.J., Gandini G. (2018) Perception of livestock ecosystem services in grazing areas. *Animal*, 12(12), 2627–2638. <https://doi.org/10.1017/S1751731118001027>

Oehmichen K., Majer S., Thrän D. (2021) Biomethane from Manure, Agricultural Residues and Biowaste-GHG Mitigation Potential from Residue-Based Biomethane in the European Transport Sector. *Sustainability*, 13(24), 14007. <https://doi.org/10.3390/su132414007>

Palmer R.G., Perez P.T., Ortiz-Perez E., Maalouf F., Suso M.J. (2009) The role of crop-pollinator relationships in breeding for pollinator-friendly legumes: from a breeding perspective. *Euphytica*, 170(1–2), 35–52. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-9953-0>

Raworth K. (2017) A Doughnut for the Anthropocene: humanity's compass in the 21st century. *The Lancet Planetary Health*, 1(2), e48–e49. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30028-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30028-1)

Ritchie H. (2020) Our World in Data - How much of the world's land would we need in order to feed the global population with the average diet of a given country? <https://ourworldindata.org/agricultural-land-by-global-diets>

Rockström J., Gupta J., Lenton T.M., Qin D., Lade S.J., Abrams J.F., Jacobson L., Rocha J.C., Zimm C., Bai X., Bala G., Bringezu S., Broadgate W., Bunn S.E., DeClerck F., Ebi K.L., Gong P., Gordon C., Kanie N., ... Winkelmann R. (2021) Identifying a Safe and Just Corridor for People and the Planet. *Earth's Future*, 9(4). <https://doi.org/10.1029/2020EF001866>

Ryschawy J., Disenhaus C., Bertrand S., Allaire G., Aznar O., Plantureux S., Josien E., Guinot C., Lasseur J., Perrot C., Tchakerian E., Aubert C., Tichit M. (2017) Assessing multiple goods and services derived from livestock farming on a nation-wide gradient. *Animal*, 11(10), 1861–1872. <https://doi.org/10.1017/S1751731117000829>

Salmon G.R., MacLeod M., Claxton J.R., Pica Ciamarra U., Robinson T., Duncan A., Peters A.R. (2020) Exploring the landscape of livestock 'Facts.' *Global Food Security*, 25, 100329. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100329>

Sasu-Boakye Y., Cederberg C., Wirsenius S. (2014) Localising livestock protein feed production and the impact on land use and greenhouse gas emissions. *Animal*, 8(8), 1339–1348. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001293>

Smith M.A., Cain M., Allen M.R. (2021) Further improvement of warming-equivalent emissions calculation. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 4(1), 19. <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00169-8>

Statistik Austria. (2021a) Milch. Kuhmilcherzeugung und -verwendung 2020. https://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/land_und_forstwirtschaft/viehbestand_tierische_erzeugung/milch/index.html

Statistik Austria. (2021b) Versorgungsbilanz für Fleisch nach Arten 2020 - Schlachtgewicht in Tonnen (Supply balance for meat by livestock species 2020 - Slaughter weight in tonnes). https://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_PDF_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=022374

Statistik Austria. (2021c) Landwirtschaftliche Gesamtrechnung. https://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/land_und_forstwirtschaft/gesamtrechnung/landwirtschaftliche_gesamtrechnung/index.html

Steffen W., Richardson K., Rockstrom J., Cornell S.E., Fetzer I., Bennett E.M., Biggs R., Carpenter S.R., de Vries W., de Wit C.A., Folke C., Gerten D., Heinke J., Mace G.M., Persson L.M., Ramanathan V., Reyers B., Sorlin S. (2015) Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855–1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

Steinwider A., Starz W., Rohrer H., Husler J., Pfister R. (2018) Milchflächenleistung von Bio-Milchkühen bei Vollweide- oder Silagefütterung im Berggebiet Österreichs. *Züchtungskunde*, 90(3), 218–239.

Stotten R. (2021) The role of farm diversification and peasant habitus for farm resilience in mountain areas: the case of the Ötztal valley, Austria. *International Journal of Social Economics*, 48(7), 947–964. <https://doi.org/10.1108/IJSE-12-2019-0756>

Strebl F., Gebetsroither E., Orthofer R. (2002) Greenhouse gas emissions from agricultural soils in Austria (p. 69). ARC Seibersdorf Research GmbH. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:34077871

Tasser E., Mader M., Tappeiner U. (2003) Effects of land use in alpine grasslands on the probability of landslides. *Basic and Applied Ecology*, 4(3), 271–280. <https://doi.org/10.1078/1439-1791-00153>

Twine R. (2021) Emissions from Animal Agriculture-16.5% Is the New Minimum Figure. *Sustainability*, 13(11), 6276. <https://doi.org/10.3390/su13116276>

Anderl et al. (Umweltbundesamt; 2021) Austria's National Inventory Report 2021 (Band 0761; p. 807). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0761.pdf>

United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition. (UNEP; 2021) Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions (p. 170). <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>

Van Wesemael D., Vandaele L., Ampe B., Cattrysse H., Duval S., Kindermann M., Fievez V., De Campeneere S., Peiren N. (2019) Reducing enteric methane emissions from dairy cattle: Two ways to supplement 3-nitrooxypropanol. *Journal of Dairy Science*, 102(2), 1780–1787. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14534>

Willett W., Rockström J., Loken B., Springmann M., Lang T., Vermeulen S., Garnett T., Tilman D., DeClerck F., Wood A., Jonell M., Clark M., Gordon L.J., Fanzo J., Hawkes C., Zurayk R., Rivera J.A., De Vries W., Majele Sibanda L., ... Murray C.J.L. (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)

Wirsenius S., Azar C., Berndes G. (2010) How much land is needed for global food production under scenarios of dietary changes and livestock productivity increases in 2030? *Agricultural Systems*, 103(9), 621–638. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2010.07.005>

Zessner M., Hepp G., Zoboli O., Manonelles O.M., Kuderna M., Weinberger C., Gabriel O. (2016) Erstellung und Evaluierung eines Prognosetools zur Quantifizierung von Maßnahmenwirksamkeiten im Bereich der Nährstoffeinträge in Oberösterreichische Oberflächengewässer. - Bericht im Auftrag des Amtes der Oö. Landesregierung (p. 132).