

Faktencheck Klimawandel, Landwirtschaft, Ernährung: Studie zum Stand des Wissens

Teil A: Ausführlicher Literaturüberblick zum aktuellen Stand des Wissens mit Hintergrundinformationen

Studie M01:2020-0.799.481, VI/1

im Auftrag der Sektion VI – Klima und Energie des
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Prof. UZ Dr.nat.techn. Barbara Amon

Final Version 22.11.2021

Table of contents

1 Präambel – Vision für zukünftige Agrarsysteme	3
2 Tierhaltung als Bestandteil einer zirkulären Bioökonomie für globale Lebensmittel- und Ernährungssicherung mit geringen negativen Umweltwirkungen – ein Überblick über Grundlagenpapiere	4
3 Allgemeine Grundprinzipien und ihre Definitionen	8
4 Die Rolle der Tierhaltung für die in einer biobasierten Kreislaufwirtschaft.....	11
5 Integration von Pflanzenbau und Tierhaltung	16
6 Landwirtschaft und Klimaschutz / Klimaneutralität.....	18
7 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	22
References	23

1 Präambel – Vision für zukünftige Agrarsysteme

Die derzeitige landwirtschaftliche Praxis verursacht erhebliche Umweltschäden und infolgedessen negative Auswirkungen auf die Gesundheit und gesundheitsbezogene Kosten: Luftverschmutzung, Feinstaubbelastung, Nitrate im Grundwasser, Klimawandel, ungesunde Ernährung, Verbreitung von Antibiotikaresistenzen und vieles mehr. Die derzeitige Art und Weise, Landwirtschaft zu betreiben, verursacht massive Kosten und Gesundheitsgefahren, deren Last derzeit auf die Gesellschaft abgewälzt wird.

Die Lösung dieser Umwelt- und Gesundheitsprobleme erfordert einen grundlegenden Paradigmenwechsel für zukünftige Agrarsysteme. Um diese Probleme in Zukunft zu vermeiden, müssen wir die Rolle der Landwirtschaft grundlegend überdenken, so dass das derzeitige Aufgabenspektrum der Landwirtschaft - die Produktion von Biomasse - um den Schutz und die Förderung der Gesundheit erweitert wird und die Landwirtschaft als integraler Bestandteil der umfassenden One Health Konzepte verstanden wird. Durch die Berücksichtigung regionaler Aspekte, insbesondere bei Fruchtfolgen, außerlandwirtschaftlichen Stoffströmen, einer regionalen Nährstoffverteilung und der regionalen Optimierung von Züchtungsstrategien und Viehbesatz können zusätzliche Potenziale erschlossen werden. Damit wird die Landwirtschaft zu einem wesentlichen Element des Gesundheitsschutzes, und die Bedeutung der Landwirtschaft wird deutlich erhöht.

Wir haben die Vorstellung, dass zukünftige landwirtschaftliche Systeme Lebensmittel, Futtermittel, Biomaterialien und Biomasse in Einklang mit der Natur erzeugen. Wir gehen auch davon aus, dass sich der derzeitige Gegensatz zwischen konventioneller und ökologischer Landwirtschaft nach und nach auflösen wird, da die konventionelle Landwirtschaft zunehmend im Einklang mit den Mechanismen der Natur betrieben wird und die ökologische Landwirtschaft zunehmend digitale Technologien der Präzisionslandwirtschaft nutzen wird. Aus diesem Grund wird in diesem Dokument nicht zwischen konventioneller und ökologischer Landwirtschaft unterschieden. Die Studie beleuchtet die Entwicklung und Anwendung innovativer Technologien und Bewirtschaftungsstrategien, die geeignet sind, das Potenzial der natürlichen Voraussetzungen effizient und nachhaltig zu nutzen. Hierbei wird die regionale Optimierung von besonderer Bedeutung sein. Bisher konzentriert sich die Optimierung weitgehend auf einzelne landwirtschaftliche Betriebe. Die regionale Optimierung bietet ein großes Potenzial zur Steigerung des Produktionsniveaus, ohne die Umwelt zu beeinträchtigen.

2 Tierhaltung als Bestandteil einer zirkulären Bioökonomie für globale Lebensmittel- und Ernährungssicherung mit geringen negativen Umweltwirkungen – ein Überblick über Grundlagenpapiere

Die in der UN-Agenda 2030 angestrebte Nachhaltigkeit der Lebensmittelsysteme steht derzeit vor zahlreichen Herausforderungen in miteinander verknüpften Bereichen: dauerhafte Lebensmittel- und Ernährungssicherheit, Existenzgrundlagen und Wachstum, Klimaanfälligkeit sowie Resilienz und Nutzung natürlicher Ressourcen (EU-C, 2020b; FAO, 2017c, 2018c; Pradhan et al., 2017; Wezel et al., 2020). Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation (FAO) schätzt, dass 800 Millionen Menschen von chronischem Hunger, 2 Milliarden Menschen von Mikronährstoffmangel und mehr als 650 Millionen Menschen im Jahr 2030 von Unterernährung betroffen sein werden. 6 Millionen Kinder sterben jedes Jahr vor ihrem fünften Lebensjahr und 202 Millionen Menschen sind arbeitslos (FAO, 2017a, 2018a). Die Ziele für nachhaltige Entwicklung bilden den Rahmen, um Lösungen für die aktuellen Herausforderungen zu finden, und es wird erwartet, dass die Landwirtschaft, einschließlich der Tierhaltung, eine zentrale Rolle bei der Umsetzung der Nachhaltigkeit in einer zirkulären Bioökonomie spielt (FAO, 2017a, 2018a). Eine kreislauforientierte Bioökonomie zielt darauf ab, die Ausbeute von Ressourcen zu minimieren, regenerative Praktiken zu fördern, den Verlust natürlicher Ressourcen zu verhindern und die Wiederverwendung und das Recycling von unvermeidlichen Nebenprodukten, Verlusten oder Abfällen zu fördern (Muscat et al., 2021). In Europa trägt der Tierhaltungssektor wesentlich zur Wirtschaftsleistung bei. Ihr Wert macht 40 % der gesamten landwirtschaftlichen Tätigkeit aus (ATF, 2021). Prognosen zeigen, dass der Bedarf an hochwertigen Lebensmitteln (mehr Fleisch, Obst und Gemüse im Vergleich zu Getreide) aufgrund einer Weltbevölkerung, die im Jahr 2050 voraussichtlich 10 Milliarden Menschen mit höherem Einkommen erreichen wird, wahrscheinlich ansteigen wird (FAO, 2017b, 2018a). Daher wird die Nachfrage nach hochwertigeren Lebensmitteln, insbesondere nach Proteinen und Mikronährstoffen, steigen. Tierische Produkte liefern sehr hochwertige Proteinnahrung, wichtige Mikronährstoffe (Vitamin B12, A, B3, B6 und D, Zink, Selen, Kalzium, Phosphor und Eisen) und verschiedene bioaktive Komponenten. Tierhaltungssysteme erbringen auch Ökosystemleistungen wie die Erhaltung von Grünland und die Bewirtschaftung von wenig fruchtbaren Gebieten. Wirtschaftsdünger verbessert die Produktivität der Pflanzen. Tiere können Nebenströme der Biomasse aus der Pflanzenproduktion und der Lebensmittelindustrie recyceln, um qualitativ hochwertige Lebensmittel zu produzieren.

Da die Nachfrage nach tierischen Produkten voraussichtlich weiter steigen wird, wird der Druck auf die Landressourcen weiter zunehmen. Es wird erwartet, dass die Produktionssysteme in den nächsten zehn Jahren intensiver werden und eine Produktionssteigerung von bis zu 14 % bei der Tierhaltung und 84 % bei den Kulturpflanzen erreicht wird. Größere Bestände werden voraussichtlich zum Wachstum des Tierhaltungssektors beitragen, insbesondere in Schwellenländern und Ländern mit niedrigem Einkommen durch intensive Fütterung, verbesserte Genetik und Herdenmanagement. Infolgedessen werden die Treibhausgasemissionen aufgrund der intensiven Tierhaltung, die bereits jetzt etwa 81-86 % der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen ausmachen, zu einer immer größeren Herausforderung. Der Sektor ist auch die Quelle von mehr als 80 % der landwirtschaftlichen Stickstoffemissionen in europäischen Gewässern und 90 % der Ammoniakemissionen des

(ATF, 2021). Allein die Lieferketten der Tierhaltung sind für rund 7,1 Gt CO₂eq/Jahr Gesamt-THG-Emissionen verantwortlich. Die weltweit größten Fleisch- und Molkereiunternehmen könnten für bis zu 1 Gt CO₂eq/Jahr (14 %) verantwortlich sein. Schätzungen gehen auch von etwa 1,7 Gt CO₂eq/Jahr aus, die von Kleinbauern, hauptsächlich in Entwicklungsländern, verursacht werden (Leahy et al., 2020). Nahezu ein Drittel der weltweiten Nahrungsmittelproduktion und mehr als ein Drittel der Tierhaltung könnten bis 2081-2100 aus ihrem derzeitigen Klimaraum gedrängt werden, wenn wir die Erwärmung nicht auf 1,5-2 °C begrenzen können (Kummu et al., 2021).

Gleichzeitig wirkt sich der Klimawandel zunehmend auf den Sektor aus, was zu einem Rückgang der Erträge und der ländlichen Lebensgrundlagen führt und gleichzeitig die Ungleichheiten zwischen den Regionen der Welt verschärft (Mirzabaev et al., 2021). Der derzeitige globale Anteil der Landwirtschaft an der Gesamtproduktion und der Beschäftigung ist rückläufig, das Wachstum der Erträge hat sich verlangsamt. Ein zunehmender Anteil von kleineren Betrieben gibt die Landwirtschaft auf, um Beschäftigungsmöglichkeiten außerhalb der Landwirtschaft zu finden, was zu verstärkten Migrationsströmen führt (FAO, 2017b). Projektionen zeigen weitere Auswirkungen des Klimawandels auf die Tierhaltung mit direkten Auswirkungen auf das Tierwohl, das Wachstum, die Fortpflanzung und die Gesundheit der Tiere und indirekten Auswirkungen auf die Produktivität von Weiden, Futterpflanzen und Futtermitteln (Wreford & Topp, 2020). Auch die Tragfähigkeit von Weideflächen und die Pufferfähigkeit von agro-pastoralen und pastoralen Systemen könnten sich verringern, was die Produktivität der Tierhaltung erheblich beeinträchtigt (Nardone et al., 2010). Der Tierhaltungs- und Geflügelsektor wird zunehmend als Risiko für die öffentliche Gesundheit angesehen, insbesondere im Hinblick auf zoonotische Krankheiten (GBS2020, 2020). Grenzüberschreitende Schädlinge und Krankheiten breiten sich schneller aus. Ein Teil der Bakterien ist gegen Antibiotika resistent (ca. 60 000 Tonnen Antibiotika werden jährlich eingesetzt), die natürlichen Ressourcen werden degradiert und die biologische Vielfalt geht immer mehr verloren (FAO, 2017c, 2018c, 2020). Die zunehmende Häufigkeit von Dürren, Überschwemmungen, Waldbränden und neuen Schädlingen sind weitere Anzeichen dafür, dass unser Lebensmittelsystem bedroht ist (EU-C, 2020b). Gleichzeitig werden nur etwa 25 % der jährlich erzeugten Biomasse geerntet, so dass große Mengen an Ernterückständen und agroindustriellen Nebenprodukten nicht genutzt werden (FAO, 2017c, 2018c, 2020). Andererseits verursachen die Lebens-/Futtermittelproduktion, die enterische Fermentation, tierische Abfälle und Landnutzungsänderungen Treibhausgasemissionen (FAO, 2017a, 2018a, 2020). Darüber hinaus machen Lebensmittelverluste und -abfälle etwa 30 % der landwirtschaftlichen Produktion aus, was ebenfalls zu Umweltschäden führt, ganz zu schweigen von den wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Aspekten.

Der Landwirtschaftssektor muss einen Beitrag zu den Bemühungen leisten, bis zum Ende des Jahrhunderts negative Nettoemissionen zu erreichen, um die globale Erwärmung unter 1,5°C zu halten und die negativen Auswirkungen des Klimawandels abzumildern. Unter Verwendung eines Szenarios, das die globale Erwärmung kosteneffizient über alle Sektoren hinweg auf 1,5 °C begrenzt, deuten die Ergebnisse auf globale Kalorienverluste bei Lebensmitteln hin, die je nach den verwendeten Nachfrageelastizitäten zwischen 110 und 285 kcal pro Kopf und Tag im Jahr 2050 liegen (Frank et al., 2017). Die Beeinflussung von Ernährungsmustern durch ein wachsendes Bewusstsein für den Zusammenhang zwischen Ernährung und menschlicher Gesundheit könnte einen Weg für Veränderungen in der Nachfrage nach tierischen Produkten sein (Leahy et al., 2020). Frank et al. (2017) stellen fest, dass die Auswirkungen auf die

Ernährungssicherheit in den Nicht-Annex-I-Ländern höher sein werden, wenn diese sich entscheiden, nicht zu den Minderungsmaßnahmen beizutragen, während andere Länder ihre Bemühungen zur Reduktion der THG-Emissionen fortsetzen, um das globale Klimaziel zu erreichen, als wenn sie sich an einem globalen Abkommen beteiligen, da ineffiziente Minderungsmaßnahmen die Kosten für die landwirtschaftliche Produktion und damit die Lebensmittelpreise erhöhen.

In Bezug auf das Menschenrecht auf angemessene Nahrung und eine nachhaltige und gesunde Ernährung kann der Tierhaltungssektor eine Schlüsselrolle bei der direkten oder indirekten Bewältigung vieler dieser globalen Herausforderungen spielen (BMEL, 2020; ATF, 2019; EU-C, 2020a; FAO, 2018b). Nutztiere können durch ihre direkte Interaktion mit Land, Vegetation, Boden und Lebensraum wertvolle regulierende und unterstützende Ökosystemleistungen erbringen. Sie tragen zur Steigerung der Pflanzenproduktivität durch Wirtschaftsdünger und tierische Zugkraft bei. Die Gesamtnährstoffe aus dem Wirtschaftsdünger übersteigen die Nährstoffe aus synthetischen Düngemitteln.

Die Tierhaltung könnte auch dazu beitragen, die Biomasse-Nebenströme aus den Nahrungsmittelsystemen aufzuwerten. Tierhaltung kann zahlreiche Biomasse-Nebenströme nutzen: Grünland aus marginalisierten Gebieten, Ernterückstände von Anbauflächen, Nebenprodukte der lebensmittelverarbeitenden Industrie und Lebensmittelabfälle/-verluste aus vorgelagerten Bereichen des Lebensmittelsystems, um qualitativ hochwertige Produkte zu erzeugen (Dou, 2018; Zanten, 2015). Schätzungen zufolge könnten bis zu 80 % des Tierfutters aus diesen Komponenten hergestellt werden (Mottet, 2017). Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation (FAO) ist bei den Bemühungen um die Quantifizierung von Lebensmittelverlusten und -abfällen führend, um geeignete Maßnahmen zur Verringerung dieser Verluste und der damit verbundenen Emissionen auf globaler Ebene zu entwickeln. So zeigten die Statistiken der FAO im Jahr 2016, dass sich die weltweiten jährlichen Lebensmittelverluste und -abfälle auf etwa 30 % der Getreideproduktion, 40-50 % der Hackfrüchte, des Obstes und des Gemüses, 20 % der Ölsaaten, des Fleisches und der Milchprodukte und 35 % des Fisches belaufen. Zusammen mit den verschwendeten Ressourcen und den Umweltauswirkungen verursachen sie allein in Europa jährlich Kosten in Höhe von etwa 143 Milliarden Euro (Teigiserova D.A., 2020). Diese Abfälle aus den Lebensmittelsystemen werden von politischen Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit zunehmend als dringendes Problem erkannt, und die Tierhaltung könnte zur Lösung beitragen.

Obwohl der Tierhaltungssektor ein großer Verbraucher landwirtschaftlicher Ressourcen und eine Quelle für Umweltverschmutzung ist, bietet er auch eine Reihe von Möglichkeiten, die für die Nachhaltigkeit der Lebensmittelsysteme und den Übergang zu einer stärker kreislauforientierten Wirtschaft entscheidend sind. Dazu gehören die Umwandlung marginaler Biomasseströme in hochwertige Produkte, die Erhaltung des Bodenkohlenstoffs, Landschaften/Biodiversität und die Integration mit der Pflanzenproduktion. Mit der zunehmenden Intensivierung, Spezialisierung und räumlichen Trennung von Tierhaltung und Pflanzenbau sind jedoch zunehmend Ungleichgewichte entstanden (EIP-Agri, 2017). Die Tiere werden oft nicht überwiegend mit Biomasse gefüttert, die für den Menschen nicht verwertbar ist, oder mit Futtermitteln, die auf Flächen angebaut werden, die für den Anbau von Pflanzen ungeeignet sind, und viele Systeme sind auf ein einziges Ziel, nämlich die Produktionseffizienz in einem linearen Wirtschaftsparadigma optimiert (ATF, 2019; EIP-Agri, 2017).

Globale Grenzen, begrenzte Ressourcen und globale Herausforderungen wie Klimawandel, Land- und Ökosystemdegradation sowie eine wachsende Bevölkerung erfordern einen Paradigmenwechsel von linearen Ansätzen zu einer zirkulären und hocheffizienten Ressourcennutzung (EU-C, 2018). Die Agrar- und Ernährungssysteme, einschließlich der Tierhaltungssysteme, bilden da keine Ausnahme: Es müssen neue Wege der Produktion und des Konsums gesucht werden, die die ökologischen Grenzen unseres Planeten respektieren (ATF, 2019; EU-C, 2019). Es sind lokal angepasste Lösungen erforderlich, um das Potenzial der Bioökonomie zu nutzen, die Resilienz der lokalen und regionalen Lebensmittelversorgung zu stärken und gleichzeitig die natürlichen Ressourcen nachhaltig zu nutzen. Ökologische Grenzen müssen auf verschiedenen räumlichen Skalen untersucht werden. Die Wissensbasis und das Verständnis spezifischer Bioökonomiegebiete sollten auf der Erfassung von mehr Daten, der Generierung besserer Informationen und einer systemischen Analyse beruhen, die zu maßgeschneiderten Beratungsdiensten für nachhaltige Bewirtschaftungsentscheidungen für den Primärsektor und zur Stärkung der lokalen Gemeinschaften führen (EU-C, 2018, 2019, 2020c).

Dies erfordert transformative Prozesse, die auf systemischen Ansätzen beruhen, um die Tierhaltung wirksam in die Kreislaufwirtschaft zu integrieren (ATF, 2019; EIP-Agri, 2017; EU-C, 2018; FAO, 2017a, 2018a). Ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Komponenten der Lebensmittelsysteme ist erforderlich, um die Co-Benefits zu maximieren und die systemweite Transformation zu beschleunigen (EU-C, 2020c). Konzepte wie nachhaltige Intensivierung, Agrarökologie, Agroforstwirtschaft, klimasmarte Landwirtschaft, naturbasierte Landwirtschaft und konservierende Landwirtschaft sind von Bedeutung (FAO, 2017a, 2018a, 2020; Pretty et al., 2018). Sie werden dazu beitragen, die Tier- und Pflanzenproduktion (wieder) miteinander zu verbinden, um die Nutzung von Restbiomassen zur Nahrungsmittelproduktion zu optimieren, einschließlich Kaskaden- und Recyclingansätzen, so dass kaum Verluste entstehen, sondern Biomasse umgewandelt und aufgewertet wird (EU-C, 2018; FACCE-JPI, 2020; GBS2020, 2020). So werden Kohlenstoff, Nährstoffe und Wasser wiederverwendet/recycelt, was zu weniger Abfällen und Emissionen und einer geringeren Abhängigkeit von mineralischen Stickstoffdüngern führt, während gleichzeitig Phosphor erhalten bleibt (ATF, 2019; EU-C, 2018; FACCE-JPI, 2020; FAO, 2018a, 2019b, 2020; GBS2020, 2020).

Es sind auch Maßnahmen erforderlich, um One-Health-Ansätze zu unterstützen, den Einsatz von Antibiotika zu minimieren, den Dialog zwischen verschiedenen Interessengruppen zu fördern, die Regulierungsbehörden zu stärken, die Verbesserung der Produktionsverfahren zu fördern und das Tierwohl verstärkt zu behandeln (FAO, 2018a, 2019a). Dies erfordert eine konsequentere internationale Zusammenarbeit, um Ungleichheiten zwischen und innerhalb von Ländern zu verringern und vertikal koordinierte und organisierte nachhaltige Lebensmittelsysteme zu erreichen, die durch verantwortungsvolle Investitionen unterstützt werden (FACCE-JPI, 2020; FAO, 2017b, 2018a). Das Verständnis der Vielfalt und Komplexität von Landwirtschafts- und Ernährungssystemen, einschließlich der Herausforderungen der Akteure und der Gleichgewichte zwischen den Geschlechtern, würde den Übergang von der linearen zur zirkulären Bioökonomie erleichtern (FAO, 2018a, 2019b). Integrierte Modellierungsansätze unter Verwendung von multikriteriellen Bewertungen, verbesserten Ökobilanzen und politischen Analyseinstrumenten müssen verstärkt werden (FACCE-JPI, 2020).

Die Notwendigkeit, Nachhaltigkeit zu erreichen, ist auch ein starker Anreiz, die Wirtschaft und die Produktionssysteme zu modernisieren und gleichzeitig grüne, hochqualifizierte und lokale Arbeitsplätze zu schaffen (ATF, 2019; EU-C, 2018, 2019). Die Reform der Lebensmittelmärkte und die Schaffung von Anreizen für nachhaltige Konsummuster, die Förderung eines verantwortungsvollen Konsums und von Marktveränderungen sowie die Erleichterung der Umstellung auf eine gesunde Ernährung bei gleichzeitiger Verringerung der Lebensmittelverschwendung sind notwendige Schritte auf der Verbraucherebene, die das entscheidende Bindeglied für eine nachhaltigere menschliche Ernährung und eine gesündere Umwelt darstellen (EU-C, 2020c). Eine Steigerung der Kreislaufwirtschaft und der Ressourceneffizienz der Lebensmittelsysteme ist insbesondere in der Tierhaltung erforderlich, da diese derzeit erhebliche Umweltauswirkungen hat (EU-C, 2020b, 2020c). Dieser Sektor hat das Potenzial, die aktuellen Herausforderungen zu bewältigen und einen Beitrag zum Klimaschutz (d. h. zum Ziel der Klimaneutralität der EU für 2050) zu leisten und gleichzeitig Ökosystemdienstleistungen zu fördern, nicht zuletzt die Erhaltung und Wiederherstellung der biologischen Vielfalt und der Landschaften (ATF, 2019, 2021).

3 Allgemeine Grundprinzipien und ihre Definitionen

Grundlagen der Agrarökologie

Agrarökologie ist ein integrierter Ansatz, der ökologische Konzepte und Prinzipien zur Gestaltung und zum Management nachhaltiger Lebensmittelsysteme anwendet (Barrios et al., 2020). Sie erfordert den Einsatz von Forschung, Bildung und Maßnahmen in einer transdisziplinären Art und Weise, um die ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Dimensionen der Nachhaltigkeit von Lebensmittelsystemen zu erreichen (Wezel et al., 2020). Agrarökologie basiert auf bottom-up Prozessen, die darauf abzielen, kontextbezogene Lösungen für lokale Probleme zu finden durch die Integration von Wissenschaft und traditionellem, praktischem und lokalem Wissen der Erzeuger (Barrios et al., 2020). Das Konzept ist dynamisch, stützt sich auf Grundsätze, die auf die Struktur und das Management des landwirtschaftlichen Systems abzielen (Billen, 2021; Bonaudo et al., 2014; Morais et al., 2021), und wird von der FAO durch zehn Schlüsselemente beschrieben. Diese Elemente sind Vielfalt, Synergien, Ko-Kreation und gemeinsame Nutzung von Wissen, Effizienz, Recycling, Widerstandsfähigkeit, menschliche und soziale Werte, Kultur und Lebensmitteltraditionen, verantwortungsvolle Unternehmensführung sowie Kreislauf- und Solidarwirtschaft (Barrios et al., 2020).

Drei wesentliche Strategien der Agrarökologie werden in der Literatur entweder im ökologischen Landbau oder bei der Integration von Pflanzenbau und Tierhaltung: Verbesserung der Nährstoffnutzungseffizienz, Verbesserung der Futtermittelverwertung und Verbesserung der biologischen Stickstofffixierung zur Verbesserung der Systemleistung und/oder der Kreislaufwirtschaft (Billen, 2021; Bonaudo et al., 2014; Barrios et al., 2020; Morais et al., 2021).

In Bezug auf die Stickstoffnutzungseffizienz stellten Bonaudo et al. (2014) fest, dass eine moderate Verringerung der Intensivierung in Verbindung mit einer stärkeren Integration von Pflanzenbau und Tierhaltung den Einsatz externer Inputs (Düngemittel, fossile Brennstoffe) deutlich reduziert und die Kreislauffähigkeit beider Systeme durch die Wiederverwertung der Nebenströme von Pflanzenbau und Tierhaltung erhöht. Billen (2021), der die Folgen der Anwendung agrarökologischer Strategien (bis 2050) simulierte, errechnete einen Rückgang der

überschüssigen Stickstoffverluste um fast die Hälfte, der sich aus einer Verringerung der Viehbestandsdichte auf europäischer Ebene ergibt. Dies wurde durch den Verzicht auf synthetische Düngemittel, die Verringerung der N-Verluste in der Umwelt und die Reduzierung der Futtermittelimporte erreicht.

Zur Verringerung der Entwaldung, des Verlusts der biologischen Vielfalt und des Klimawandels berichteten Bonaudo et al. (2014), dass eine moderate Intensivierung und eine verstärkte Integration von Pflanzenbau und Tierhaltung ein hohes Maß an natürlichen Inputs durch ein moderates Maß an chemischen Inputs (Herbizide und Düngemittel) ersetzen kann, was zu einer höheren Produktion und geringeren Umweltauswirkungen führt.

Die Agrarökologie stützt sich auf fünf Prinzipien, die dazu beitragen, ökologische und wirtschaftliche Vorteile zu erzielen, die für ein breites Spektrum von Wiederkäuer-, Schweine-, Geflügel-, Aquakultur- und integrierten Nutztierhaltungssystemen quantifiziert werden. Die Grundsätze sind: (i) integriertes Tiergesundheitsmanagement, (ii) Verringerung des für die Produktion erforderlichen externen Inputs, (iii) Verringerung der Umweltverschmutzung durch Optimierung der metabolischen Funktionsweise der landwirtschaftlichen Systeme, (iv) Verbesserung der funktionalen Vielfalt innerhalb der landwirtschaftlichen Systeme zur Stärkung ihrer Widerstandsfähigkeit und (v) Erhaltung der biologischen Vielfalt durch Anpassung des Managements auf Betriebs- und Landschaftsebene (Dumont et al. 2018).

Nachhaltige Intensivierung

Nachhaltige Intensivierung (NI) ist definiert als ein Prozess oder System, bei dem die landwirtschaftlichen Erträge gesteigert werden, um die menschlichen Bedürfnisse ohne negative Umweltauswirkungen und ohne Umwandlung zusätzlicher nichtlandwirtschaftlicher Flächen zu befriedigen (Pretty et al., 2018). NI basiert auf der Notwendigkeit, die Produktion durch höhere Erträge und nicht durch mehr Land zu steigern, wobei die Ernährungssicherheit und nicht nur die Produktivität im Vordergrund steht. Das Konzept stellt die ökologische Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme in den Vordergrund, ohne einer bestimmten Vision oder Methode der landwirtschaftlichen Produktion den Vorzug zu geben, sondern lässt vielmehr eine Vielzahl von Mitteln zur Erreichung der Nachhaltigkeit zu (Garrett et al., 2017; Pretty et al., 2018). Es werden neue Ansätze benötigt, wie z. B. der integrierte Pflanzenschutz im Ackerbau, der die Ernteerträge um etwa 40 % steigern kann (Pretty & Bharucha, 2015), und die Integration von Pflanzenbau und Tierhaltung, die sowohl die Produktivität von Ackerbau und Tierhaltung als auch das Management natürlicher Ressourcen verbessern könnte (Duncan et al., 2016).

Dumont et al. (2018) bewerteten die potenzielle Nachhaltigkeit agrarökologischer Verfahren im Vergleich zur nachhaltigen Intensivierung (NI), die derzeit in der Wiederkäuerwirtschaft weit verbreitet ist. Sie stellten ihre Werte, ihre Ansichten über Lebensmittelkonsummuster, ihre Ansichten über die Rolle der Technologie und die Beziehung zwischen Mensch und Natur gegenüber. Sie gehen davon aus, dass die NI darauf abzielt, die Produktion auf den vorhandenen landwirtschaftlichen Flächen zu steigern, um den weiteren Eingriff in die verbleibenden natürlichen Ökosysteme zu begrenzen, während die Agrarumweltmaßnahmen offener für eine Umstellung der Ernährung in Richtung eines geringeren Verzehrs von tierischem Eiweiß sind, um das gesamte Ernährungssystem wieder ins Gleichgewicht zu bringen. Sie stellen fest, dass eine höhere Effizienz in der Landwirtschaft nicht immer mit einer hohen Nachhaltigkeit im Sinne von Selbstversorgung und Erneuerbarkeit verbunden ist. Daher bleibt der Bedarf an externen chemischen Inputs in integrierten Betrieben mit Pflanzenbau und Tierhaltung

bestehen, wenn keine ökologische Komplementarität zwischen Pflanzen und Tieren erreicht wird.

Naturbasierte Landwirtschaft

Die naturbasierte Landwirtschaft ist eine Form der nachhaltigen Landwirtschaft, die die Nutzung natürlicher, ökologischer Prozesse optimiert und in die landwirtschaftliche Praxis integriert. Sie zielt darauf ab, Lebensmittel innerhalb der von der Umwelt gesetzten Grenzen zu erzeugen und positive Auswirkungen auf die biologische Vielfalt zu haben. Die naturbasierte Landwirtschaft kann durch drei Dimensionen beschrieben werden: funktionale Agrobiodiversität, minimale negative Auswirkungen der landwirtschaftlichen Praxis auf die natürliche Umwelt sowie Landschaftspflege und Erhaltung der Arten auf dem Landwirtschaftsbetrieb (Erisman et al. 2017).

Rhodes (2012) beschreibt die naturbasierte Landwirtschaft als ein geschlossenes System, das keine anderen als die von der Natur bereitgestellten Inputs zulässt und sich von der ökologischen Landwirtschaft unterscheidet. Sie sind der Ansicht, dass die ökologische Landwirtschaft die Natur stört, finden aber Ähnlichkeiten zwischen der naturnahen Landwirtschaft und der Permakultur. Die Permakultur wird als ein Bereich des ökologischen Designs und der ökologischen Technik angesehen, der darauf abzielt, nachhaltige menschliche Siedlungen und sich selbst erhaltende landwirtschaftliche Systeme nach dem Vorbild natürlicher Ökosysteme zu entwickeln. Bewusst gestaltete Landschaften imitieren die in der Natur vorkommenden Muster und Beziehungen, während sie eine Fülle von Nahrungsmitteln, Fasern und Energie für die Deckung des lokalen Bedarfs liefern. Die Permakultur unterscheidet sich also von der naturbasierten Landwirtschaft durch die Tatsache, dass sie den Menschen (Menschen und Städte) in den Mittelpunkt des Systems stellt.

Regenerative Landwirtschaft

Regenerative Landwirtschaft ist ein landwirtschaftliches System, das darauf abzielt, die Gesundheit des Bodens und die biologische Diversität im Ackerland zu regenerieren und gleichzeitig die Nahrungsmittelproduktion und die Rentabilität des Landwirtschaftsbetriebs zu erhalten. Daher hat sie Vorteile für die Nachhaltigkeit von landwirtschaftlichen Systemen (Brown et al., 2018). Die regenerative Landwirtschaft wendet vier Hauptprinzipien an, um die Natur zu imitieren und Nahrungsmittel und Fasern zu liefern und gleichzeitig den Boden, die Widerstandsfähigkeit, die Diversität und die Gemeinschaft aufzubauen (Burns, 2021). Diese sind der Verzicht auf Bodenbearbeitung, die Beseitigung von räumlich-zeitlichen Ereignissen mit unbedecktem Boden, die Förderung der Pflanzendiversität im Betrieb und die Integration von Tierhaltung und Pflanzenbau (LaCanne & Lundgren, 2018). Regenerative Landwirtschaft hat das Potenzial, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft zu verringern durch eine Kombination aus Kohlenstoff-Speicherung in Böden und oberirdischer Biomasse und die Verwendung geernteter Biomasse zum Ausgleich des Verbrauchs fossiler Brennstoffe (Colley et al., 2020).

4 Die Rolle der Tierhaltung für die in einer biobasierten Kreislaufwirtschaft

Hintergrund

Das Paradigma der Kreislaufwirtschaft zielt darauf ab, Wirtschaftswachstum und ökologisches Wohlergehen durch eine effektivere Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen zu erhalten, und Abfälle zu minimieren. Das Konzept schlägt eine Abkehr von der linearen End-of-Life-Konzeption des Lebensmittelsystems vor, bei der Menschen Produkte mit hohem Wert (pflanzlichen oder tierischen Ursprungs) nutzen und Abfälle produzieren (Korhonen, 2018). Dies ist erforderlich, um Nachhaltigkeit zu erreichen, da die globale Nachfrage nach Energie und Materialien mit der schnell wachsenden Bevölkerung steigt (Teigiserova & Thomsen, 2020). Gleichzeitig gehen riesige Mengen an Lebensmitteln, fast ein Drittel der weltweiten Produktion für den menschlichen Verbrauch, verloren oder werden verschwendet (Gustavsson & Sonesson, 2011). In diesem Zusammenhang ist eine Quantifizierung von großer Bedeutung, um geeignete Maßnahmen zur Verringerung der Lebensmittelverschwendung und der damit verbundenen Emissionen zu entwickeln. Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation (FAO) ist auf globaler Ebene führend bei solchen Initiativen. So zeigten Statistiken der FAO im Jahr 2016, dass sich die weltweiten jährlichen Lebensmittelverluste und -abfälle auf etwa 30 % der Getreideproduktion, 40-50 % der Hackfrüchte, des Obstes und Gemüses, 20 % der Ölsaaten, des Fleisches und der Milchprodukte und 35 % des Fisches belaufen (FAO, 2016). Zusammen mit den verschwendeten Ressourcen und den Umweltauswirkungen verursachen sie allein in Europa jährlich Kosten in Höhe von etwa 143 Milliarden Euro (Teigiserova & Thomsen, 2020; siehe auch Kap. 2 in diesem Bericht). Diese Abfälle aus den Lebensmittelsystemen werden von politischen Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit zunehmend als dringendes Problem erkannt. Dennoch übt die Nachfrage nach Lebensmitteln weiterhin einen zunehmenden Druck auf die Agrar- und Ernährungssysteme, einschließlich der Wälder, aus, was zu mehr Treibhausgasemissionen führt, insbesondere zu Kohlenstoffemissionen aufgrund von Landnutzungsänderungen und dem Verlust der Biodiversität (Van Zanten, 2018). Die Tierhaltung, das weltweit größte landwirtschaftliche Landnutzungssystem, ist ein Beleg für diesen beobachteten Trend. Dauerwiesen und -weiden bedecken etwa ein Viertel der Landfläche der Erde und machen rund 70 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus. Darüber hinaus wird etwa ein Drittel des weltweit produzierten Getreides für die Tierhaltung verwendet. Die Ernährungsgewohnheiten tragen erheblich zu diesem Phänomen bei. Schätzungen zeigen, dass die Ernährung von Menschen mit mehr als einem Drittel (9-23 g) des täglichen Proteinbedarfs aus Tierhaltung zu einer zunehmenden Konkurrenz um Nahrung zwischen Mensch und Tier führen könnte. Für den Menschen essbare Pflanzen würden an Tiere verfüttert oder derzeitige Grünlandflächen oder unkultivierte Flächen (wie Wälder) für die Pflanzenproduktion umgewandelt (Van Zanten, 2018). Weiden werden oftmals auf Grenzertragsflächen angelegt, und ein unzureichendes Weidemanagement führt zu Bodendegradation und trägt zum Verlust der Biodiversität bei.

Daher ist ein Umdenken erforderlich, um den Biomasseabfallströmen durch Wiederverwendung und/oder Recycling der im System anfallenden Abfälle einen Mehrwert zu verleihen. Das System von Landwirtschaft, Lebensmitteln und Abfällen umfasst die Teilsysteme Pflanzenbau, Tierhaltung, Lebensmittel-/Futtermittelverarbeitungsindustrie, Verbrauch und Abfallwirtschaft. Obwohl die Tierhaltung ein großer Verbraucher landwirtschaftlicher Ressourcen und eine Quelle der Umweltverschmutzung ist, bietet sie auch

eine Reihe von Hebelwirkungen und Chancen, die für die Nachhaltigkeit der Lebensmittelsysteme und den Übergang zu einer stärker kreislaforientierten Wirtschaft entscheidend sind. Dazu gehören die Umwandlung marginaler Biomasseströme in hochwertige Produkte, die Erhaltung des Bodenkohlenstoffs, Landschaften/Biodiversität und die Integration mit der Pflanzenproduktion. All dies kann erreicht werden, wenn flexible regionale Strategien für mehr Effizienz und Kreislaufwirtschaft ergriffen werden.

Tierhaltung zur Aufwertung von Biomasse-Nebenströmen in der Kreislaufwirtschaft

Tierhaltung zur Verwertung von Lebensmittelabfällen (aus Haushalten und Gaststätten)

Die Tierhaltung kann marginale Ressourcen nutzen und umwandeln, um qualitativ hochwertige Produkte für die menschliche Ernährung zu erzeugen. Grünland aus marginalen Gebieten, Ernterückstände von Anbauflächen, Nebenprodukte der lebensmittelverarbeitenden Industrie und Lebensmittelabfälle/-verluste aus vorgelagerten Bereichen des Lebensmittelsystems sind die wichtigsten Ressourcen, die durch die Tierhaltung recycelt werden können (Dou, 2018; Zanten, 2015). Lebensmittelabfälle und -verluste sind eine beträchtliche Senke für natürliche Ressourcen, einschließlich Land, Wasser, Energie und Düngemittel, die in ihren Produktionszyklus investiert werden, und belasten gleichzeitig die Umwelt (Dou, 2018). Mehrere industrielle Prozesse tragen zur Erzeugung großer Abfallströme bei. Dazu gehören die lebensmittelverarbeitende Industrie, Abfälle aus Gaststätten und Haushalten sowie Abfälle aus der Lebensmittelzubereitung. Lebensmittelabfälle (aus Gaststätten und Haushalten) machen den größten Anteil aus, weisen aber eine größere Variabilität in der Zusammensetzung auf, was zu Schwierigkeiten bei der Integration dieser Ressourcen in Tierhaltungssysteme führt (Ferguson, 2016). Die Umweltbelastung wird auf 8% der jährlichen globalen Treibhausgasemissionen geschätzt, da ein großer Teil der Lebensmittelabfälle auf Deponien landet, wo sie Emissionen verursachen (Teigiserova & Thomsen, 2020; Dou, 2018). Der Beitrag der Tierhaltung zur Verwertung von Lebensmittelabfällen befindet sich in der Mitte der Abfallhierarchiepyramide (Teigiserova & Thomsen, 2020). Sie spielen eine Schlüsselrolle bei der Wiederverwendung natürlich ungenießbarer und verarbeiteter Abfälle und wandeln diese in wertvolle Produkte wie Fleisch, Milch und Eier um (Dou, 2018). Dazu verwenden sie entweder Lebensmittelabfälle direkt aus ihren täglichen Rationen oder nach einer physikalischen, chemischen oder biologischen Verarbeitung. Physikalische Behandlungen wie Erhitzen, Entwässern, Trocknen und Zerkleinern führen zu einheitlichen und sicheren Futtermitteln aus Lebensmittelabfällen (Dou, 2018; Romero-Huelva et al., 2017). Biologische Behandlungen haben in letzter Zeit ebenfalls große Aufmerksamkeit erlangt. In der Literatur wird häufig über den Einsatz neuer Technologien berichtet, bei denen Mikroben und/oder Metaboliten eingesetzt werden, um Nebenprodukte zu fermentieren und so den Nährwert zu erhöhen (Oloche, 2019). Diese alternativen Lösungen zur Wiederverwertung von Lebensmittelabfällen innerhalb des Lebensmittelsystems könnten Futtergetreide und wertvolle Ressourcen direkt für den menschlichen Verzehr zur Verfügung stellen (anstatt sie an Tier zu verfüttern) und gleichzeitig die mit der landwirtschaftlichen Produktion verbundenen Umweltbelastungen verringern (Dou, 2018).

Tierhaltung zur Verwertung von agroindustriellen Nebenprodukten und Nebenerzeugnissen

Landwirtschaftliche Nebenprodukte und Nebenerzeugnisse sind ein weiterer wichtiger Biomassestrom, den die Tierhaltung verwerten kann. Sie fallen bei der Ernte von Nahrungsmitteln und Industriepflanzen in den Betrieben und bei der Verarbeitung von Industriepflanzen zur Energiegewinnung an. Ethanol und Biodiesel sind die wichtigsten

Produkte, die aus landwirtschaftlichen Rohstoffen wie Getreidekörnern und Ölsaaten gewonnen werden. Weltweit fallen etwa 147.2 Millionen Tonnen Rückstände aus der obstverarbeitenden Industrie und 74.19 Mrd. t Ernterückstände an (Sadh et al., 2018). In der Europäischen Union werden jedes Jahr schätzungsweise 18,4 Milliarden Tonnen an Nebenprodukten erzeugt. Gemüsesektor und Tierhaltungssektor liegen mit 44 % bzw. 31 % an der Spitze, gefolgt von Getreide (22 %) und Obst (2 %) (Bedoić, 2019). Gleichzeitig werden etwa 53 Millionen Tonnen hochwertiger Futtermittel aus Pflanzen hergestellt, die für die Energieerzeugung, d.h. für Ethanol und Biodiesel, verwendet werden (Popp, 2016). Durch die Umwandlung dieser Bioabfallströme kann die Tierhaltung zu mehr Nachhaltigkeit in den Nahrungsmittelsystemen beitragen. In der Literatur wird weithin berichtet, dass agroindustrielle Nebenprodukte sowie Lebensmittelzubereitungs- und Konsumabfälle Nährstoffe in ausreichender Menge und Qualität enthalten, um Tierhaltung zu ermöglichen. Diese Nährstoffe können dann in der Tierhaltung in Proteine, Energie und Mineralien für die menschliche Ernährung umgewandelt werden. Beispielsweise sind limitierende Nährstoffe wie Stickstoff (gemessen am Rohprotein) in Nebenprodukten von tropischen Früchten (6,3-13 %), Getreide (17-25 %), Biotreber (19-31 %) und Ölsaatenmehl (27,3-55 %) in mäßigem bis hohem Maße vorhanden. Nebenerzeugnisse der Biokraftstoffproduktion liefern ebenfalls Eiweiß in einer Größenordnung von 9,8 % bis 38% (FAO 2012; Ferguson et al., 2016). Phosphor für die Fütterung findet sich auch in relativ ausreichendem Maße in agroindustriellen Nebenprodukten. Die FAO berichtet von einer Spanne von 0,06 bis 0,47 für Früchte und 0,32 bis 1,92 für Getreidenebenprodukte (Wadhwa and Bakshi, 2013; FAO, 2012). Die Nährstoffzusammensetzung dieser Neben- und Beiprodukte variiert jedoch stark, was zu einem gemischten Erfolg bei ihrer Verwendung in der Tierhaltung geführt hat. Forscher haben sie in unterschiedlichen Mengen (Abbeddou, 2011; Romero-Huelva, 2017) oder als Ersatz für Energie (Akinola, 2013) oder Proteinbestandteile (Bizzuti, 2021; Pang, 2018) in der Fütterung von Wiederkäuern (Ogbuewu & Mbajorgu, 2019; Reynolds, 2019; Aregheore, 2002; Pang, 2018) und in der Fütterung von Nicht-Wiederkäuern (Akinola, 2013; Muthui, 2019; Romero-Huelva, 2017) verwendet. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Leistung verbessert wurde (Nurfeta, 2010; Bizzuti, 2021) oder mit der von konventionellen Futtermitteln vergleichbar war (Pang, 2018; Oloche, 2019; Romero-Huelva, 2017).

Die pflanzlichen Nebenerzeugnisse wurden anhand von Nachhaltigkeitsindikatoren mit hoher Relevanz für die Kreislaufwirtschaft bewertet. Dazu gehören das Verhältnis von für den Menschen essbarem Output zu für den Menschen essbarem Futterinput (eFCR), gemessen für Energie- und Proteinoutput (Pang, 2018; Ertl et al., 2015), Energie- und Stickstoffnutzungseffizienz und Treibhausgasemissionen (Romero-Huelva, 2017; Pang, 2018; Bizzuti, 2021). Lao (2020) berichtete über positive Auswirkungen auf die Immunität, wenn Tiere mit Biotreber gefüttert werden. Es wird auch über Auswirkungen auf die Qualität der tierischen Erzeugnisse berichtet, z. B. über die Verbesserung des Fettsäureprofils der Milch durch die Einbeziehung von Nebenprodukten (Abbeddou, 2011; Angulo et al., 2012; Romero-Huelva, 2017) oder die Fleischqualität bei Wiederkäuern (Salami et al., 2019).

Einige Fragen bleiben jedoch unbeantwortet, die mehr Licht auf die Bedeutung der Tierhaltung bei der Verwertung von Ernte- und Lebensmittelabfällen werfen könnten. Dazu gehören die Auswirkungen der Verarbeitung dieser Abfälle auf die Treibhausgasemissionen und die Frage, wie diese Emissionen berücksichtigt werden können. Zweitens: Obwohl klar ist, dass die Leistung der Tierhaltung verbessert und die Konkurrenz mit dem Menschen durch die Nutzung von Biomasse-Nebenströmen als Futtermittel verringert wird, ist immer noch unklar, wie die

Tierhaltung im Vergleich zu anderen Verwertungsoptionen bei der Nutzung dieser Abfälle abschneidet. Diese Unsicherheit ist Teil einer aktuellen Debatte zwischen Pflanzenbau- und Tierhaltungswissenschaftlern, in der erstere nachdrücklich vorschlagen, der Verwendung einiger Biomasseabfälle für die Kompostierung und andere Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit Vorrang einzuräumen, ohne sie an Tiere zu verfüttern. Ihr Vorschlag stützt sich auf den zusätzlichen Beitrag zu den Treibhausgasemissionen während der Verarbeitung von Abfällen/Reststoffen und aufgrund der Stoffwechselaktivitäten der Tiere. Es besteht jedoch Einigkeit darüber, dass die Nutzung dieser Nebenströme in der Tierhaltung dazu beiträgt, die Nährstoffkreisläufe im Produktionssystem erheblich zu verkürzen, negative Umweltauswirkungen zu verringern und die Resilienz zu stärken. Bereits, Bouwman et al. (2013) berichteten über Stickstoff- und Phosphorüberschüsse in der Größenordnung von 138 g.y⁻¹ bzw. 12 g Tg.y⁻¹, die in die Umwelt gelangen. Sie betonen außerdem die Integration von Pflanzenbau und Tierhaltung, um einen höheren Nutzen auf Systemebene zu erzielen.

Tierhaltung zur Verwertung von Biomasse aus Marginallandschaften

Die Tierhaltung ist die größte Form der Landnutzung auf der Erde, sie nimmt 30 % der verfügbaren Fläche ein. Sie ist aber eine wichtige Quelle für den Lebensunterhalt von über 1,3 Milliarden Menschen und trägt zu 40 % des landwirtschaftlichen BIP auf globaler Ebene bei (Smith et al., 2013). Die derzeitige landwirtschaftliche Praxis belastet die Ressourcen der Erde in einem Ausmaß, das die Gefahr für erhebliche Schäden besteht (Fernandez-Mena et al., 2020). Der Tierhaltungssektor konkurriert mit anderen Landnutzungssystemen um Land, Wasser und fossile Energie. Die jüngsten Trends im Bevölkerungswachstum und die damit einhergehende Nachfrage nach hochwertigen Lebensmitteln setzen die landwirtschaftlichen Systeme weiter unter Druck, ihren Output zu verbessern. Daher müssen die Rolle und die Konzepte der Tierhaltung grundlegend überdacht und die knappen Landressourcen besser genutzt werden. Marginalflächen gelten seit langem als Möglichkeit, Nutztiere, insbesondere Wiederkäuer, nachhaltig zu ernähren. Marginalflächen wurden allgemein als Flächen definiert, die nicht für agrarwirtschaftliche Zwecke genutzt werden und daher keinen Gewinn abwerfen. Ursprünglich beschränkte sich die Definition auf die Klassifizierung von Land, das für den Anbau von Pflanzen genutzt wird, wurde aber später überarbeitet, um auch andere Formen der Landnutzung einzubeziehen, einschließlich der Nutzung für Bewahrung von naturnahen Flächen (Dale et al., 2010; Gopalakrishnan et al., 2011; Dauber et al., 2012), die auf ökonomische Wirtschaftlichkeit ausgerichtet ist und den Schwerpunkt auf die Kosteneffizienz der Produktion legen, aber auch Umweltbedingungen, Anbautechniken, Agrarpolitik, makroökonomische und rechtliche Bedingungen einbeziehen. Daher können unter Marginalflächen aus agronomischer Sicht ungenutzte oder brachliegende Anbauflächen, aufgegebenes Ackerland und aufgegebenes Weideland verstanden werden (Gopalakrishnan et al., 2011). Aus wirtschaftlicher Sicht gehören zu den Marginalflächen Flächen, die nicht in der Lage sind, mehr Wert zu erwirtschaften, als in sie investiert wird. Dazu gehören Flächen mit niedrigen Bodenproduktivitätsindizes in Bezug auf Dürre, Nässe und Länge der Vegetationsperiode. Gebiete mit flachen oder steinigten Böden, sauren oder salzhaltigen Böden, Böden mit Nährstoffmängeln oder anderen ungünstigen chemischen Bedingungen werden ebenfalls als marginal eingestuft. Dies gilt auch für die Topografie, einschließlich Böden, die stark erodierbar, geneigt und/oder für den Menschen oder seine Maschinen unzugänglich sind (Dale et al., 2010; Gopalakrishnan et al., 2011). Die räumliche Verteilung und Quantifizierung von Marginalflächen ist in den verschiedenen Regionen, Ländern und Organisationen nicht einheitlich geregelt Campbell et al. (2008) gehen davon aus, dass weltweit etwa 384 bis 471

Millionen Hektar Marginalland zur Verfügung stehen. Andere Forscher stuften auf globaler Ebene etwa 1,6 Mrd. ha Land als marginal ein, hauptsächlich aufgrund von Temperatureinschränkungen. Kang et al. (2013) gaben an, dass die weltweiten Marginalländer etwa 36 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche ausmachen und sich auf 1,3 Mrd. ha belaufen. Die meisten dieser für den Anbau ungeeigneten Flächen dienen der Tierhaltung durch Dauerwiesen und -weiden. Es wird geschätzt, dass etwa 70 % der weltweiten Flächen für die Tierhaltung genutzt werden, hauptsächlich als Weideland und für die Produktion von Futterpflanzen (van Zanten et al., 2015). Unter den Marginalländern machen Trockengebiete etwa 20,2 Millionen km² aus, von denen 74 % der Weideflächen auf Trockengebieten liegen (Fu et al., 2021). Die Vegetation auf diesen Flächen ist oft von schlechter Qualität, die Bodeneigenschaften liegen unter den Anforderungen der Pflanzenproduktion und das Gelände ist für die menschliche Nutzung nicht geeignet (Gopalakrishnan et al., 2011).

Die Tierhaltung, insbesondere die von Wiederkäuern, stellt eine wertvolle Option zur Aufwertung dieser Flächen dar, indem sie die Biomasse (oft von schlechter Qualität) von Dauerwiesen und Weiden in hochwertige Produkte umwandelt und so zu einer nachhaltigen Ernährungssicherheit beiträgt (van Zanten et al., 2015). Wiederkäuer sind dank einer Reihe von Pansenmikroben in der Lage, faseriges Pflanzenmaterial abzubauen. Daher können Wiederkäuer in marginalen Gebieten weiden, wie z. B. an Berghängen oder auf niedrig gelegenen Feuchtgrünland. Dies trägt dazu bei, landwirtschaftliche Flächen für die Erzeugung von Nahrungsmitteln zu nutzen (Eisler et al., 2014). Die FAO schätzt, dass weltweit etwa 360 Millionen Rinder und über 600 Millionen Schafe und Ziegen von Weideflächen abhängig sind. Für mehr als 100 Millionen Menschen, die in Trockengebieten leben, stellen sie die einzige Lebensgrundlage dar. Außerdem sind sie eine Nahrungsquelle für mindestens 800 Millionen Menschen, deren Ernährung weltweit nicht gesichert ist (Smith et al., 2013).

Die Nutzung von Marginalland für Bioenergie erzeugende Pflanzen gewinnt zunehmend an Bedeutung, da die Tierhaltung künftig tendenziell auf die Verwertung von Neben-/Koprodukten und Lebensmittelabfällen zur Unterstützung der Ernährungssysteme beschränkt werden sollte. Die entscheidende Rolle der Tierhaltung auf lokaler Ebene zur Unterstützung kleinbäuerlicher Systeme, insbesondere in Entwicklungsländern, sollte nicht unterschätzt werden.

Bewirtschaftung von Flächen mit hohem Kohlenstoffgehalt

Rinder tragen zu fast zwei Dritteln der Emissionen aus der Tierhaltung bei, entweder durch direkte Aktivitäten wie Stoffwechselprozesse oder indirekt durch Aktivitäten entlang der Lieferkette. Andererseits spielt die Tierhaltung eine Rolle bei der Regulierung der Nährstoffflüsse, insbesondere in den Weidegebieten, die als kohlenstoffreiche Gebiete gelten. Grünlandbasierte Landschaften mit einer dominanten Population natürlicher Gras-, Strauch- und Baumarten für die Ernährung von Wiederkäuern spielen eine regulierende Rolle bei der Erhaltung des Kohlenstoffbestands in diesen Gebieten. Daher bieten sie eine starke Hebelwirkung zur Verringerung der Treibhausgasemissionen durch die potenzielle Kohlenstoffbindung in Weideflächen. Es wurde festgestellt, dass Grünland weltweit keinen Beitrag an der Erderwärmung hat (FAO, 2019b). Whish et al. (2016) beschreiben das deutlich höhere Kohlenstoffbindungspotenzial von Weideflächen in Australien im Vergleich zu Flächen, auf denen Ackerbau betrieben wird. Villanueva-Lopez et al. (2015), die die Rolle von Weideflächen bei der Kohlenstoffspeicherung hervorheben, berichten, dass es keinen Unterschied gibt zwischen grasbasierten Landwirtschaftssystemen und solchen mit Bäumen.

Sie spielen beide eine wichtige Rolle bei der Kohlenstoffspeicherung. Darüber hinaus ist das Grasland-Biom das größte Landnutzungssystem der Welt, das bis zu 40 % (59 Millionen km²) der Oberfläche bedeckt und 10-30 % (245 Gt) des weltweiten organischen Kohlenstoffs im Boden speichert (Zhou, et al., 2019).

Eine Optimierung der Grünlandbewirtschaftung könnte den organischen Kohlenstoff (SOC) im Boden erhöhen (FAO, 2019c). Bewirtschaftungspraktiken wie die Düngung mit organischen Düngemitteln (Wirtschaftsdüngern) erhöhen nicht nur die Pflanzenbiomasse, sondern verbessern auch den SOC und die SOC-Retention (12-15 % Retention auf lange Sicht). Überweidung hingegen könnte sich nachteilig auf den SOC auswirken, wobei hierzu die Ergebnisse nicht einheitlich sind. Eine intensive Beweidung im Rahmen der Grünlandbewirtschaftung erhöht die CH₄-Emissionen aus der Tierhaltung und verringert die Emissionen von wird grasenden Tieren. Eine intensivere Bewirtschaftung erhöht die N₂O-Emissionen aufgrund eines höheren Stickstoffumsatzes und der Düngung der Weiden. Aber auch in diesem Fall könnten die komplexen Wechselwirkungen zwischen Beweidung, Kohlenstoffeintrag in den Boden und Zersetzungsprozessen zu einer Zunahme oder Abnahme des SOC führen (Chang et al., 2021). Dies könnte von den Veränderungen der Tierhaltung auf Grünland, der Stabilität des im Grünland angesammelten Bodenkohlenstoffs und der Fähigkeit des Bodens, in Zukunft mehr Kohlenstoff zu speichern, beeinflusst werden (Chang et al., 2021).

5 Integration von Pflanzenbau und Tierhaltung

Pflanzenbau und Tierhaltung in Europa haben sich im Zuge der grünen Revolution intensiviert, spezialisiert und räumlich voneinander getrennt (ATF, 2021). Der Prozess der Intensivierung ging einher mit der Vereinheitlichung der Tierhaltung und der Anbausysteme auf allen Ebenen und der Übernutzung nicht erneuerbarer Ressourcen, um auf politische und wirtschaftliche Zwänge zu reagieren (Lemaire et al., 2014). Das Intensivierungsparadigma führte zu sozioökonomischen Vorteilen für die Landwirte, die ihren Produktionsumfang und die Spezialisierung der Arbeit erhöhten (EIP-Agri, 2017; Schut et al., 2021). Die Spezialisierung hat auch dazu beigetragen, die Lebensmittelpreise zu senken und den Zugang zur Ernährung für einen großen Teil der Bevölkerung zu verbessern (Ghimire et al., 2021). Allerdings hat sie sich auch negativ auf die Umwelt ausgewirkt. Die Folgen wie Wasserverschmutzung aufgrund eines Übermaßes an Wirtschaftsdüngern in bestimmten Gebieten und eine hohe Abhängigkeit von externen Mineral- und Futtermitteln, der Verlust der Biodiversität und eine geringere Widerstandsfähigkeit gegenüber Klimawandel bedingten Veränderungen sind dokumentiert. Diese negativen Auswirkungen stehen teilweise im Zusammenhang mit der Trennung von Pflanzenbau und Tierhaltung sowohl auf betrieblicher als auch auf regionaler Ebene.

Die im letzten Jahrhundert vollzogene Transformation der Agrarsysteme hat die Entkopplung von Pflanzenbau und Tierhaltung begünstigt (Garrett et al., 2017). Mehrere Faktoren trugen zu diesem Wandel bei: die zunehmende Verfügbarkeit billiger Mineraldünger und Futtermittel, die hohen Preise und Subventionen, die stabilen Produktpreise und Einkommen sowie der zunehmende wirtschaftliche Wettbewerb zwischen den Produktionsgebieten, der einige Gebiete zur Spezialisierung veranlasste (Mosquera-Losada, Borek, Balaguer, Mezzarila, & Ramos-Font); Schut et al., 2021). Die regionalen Spezialisierungen kamen der wachsenden Dienstleistungsindustrie zugute, da unter anderem neue Dienstleistungen in den Bereichen Krankheitsbekämpfung, Feldarbeit, Bereitstellung von hochwertigem Kraftfutter und Veterinärdienste entstanden und die Landwirte zu einer weiteren Spezialisierung anregten

(Schut et al., 2021). Technologische Fortschritte in den Bereichen Pflanzenbau und Tierhaltung, maschinelles Melken und synthetische Düngemittel begünstigten ebenfalls den Prozess der Spezialisierung zur Steigerung der Effizienz, während gleichzeitig die Zahl der gemischten Betriebe zurückging (Schut et al., 2021; Ghimire, Wang, & Fleck, 2021). Dieser Trend ist in Westeuropa mit größeren Betrieben stärker ausgeprägt, während Osteuropa mit kleineren Betrieben eher zu gemischten Landwirtschaftssystemen tendiert (Schut et al., 2021).

Allerdings steht die Spezialisierung heute vor zahlreichen Herausforderungen, die durch die zunehmende Marktvolatilität aufgrund der Rücknahme der Marktinterventionspolitik verursacht werden, was für die Erzeuger ein Einkommensrisiko darstellt. Zweitens werfen die Produktionsverfahren in spezialisierten Betrieben ernste soziale und wirtschaftliche Probleme auf. Sie tragen zu Treibhausgasemissionen, Wasser- und Luftverschmutzung, Versalzung und dem Verlust der Biodiversität bei (ATF, 2019; Garrett et al., 2017; Ghimire et al., 2021; Schut et al., 2021). Aufgrund der Spezialisierung und Intensivierung sind die landwirtschaftlichen Betriebe stark auf Mineraldünger und Pestizide angewiesen, die Nährstoffkreisläufe, insbesondere Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor, ausweiten. Infolgedessen haben sie Probleme, den Gehalt an organischer Substanz aufrechtzuerhalten, was zu einem geringen organischen C-Gehalt führt und die Bodenfruchtbarkeit reduziert, während Tierhaltungsbetriebe den P-Gehalt im Boden anreichern (ATF, 2019; EIP-Agri, 2017; Schut et al., 2021). Die Vereinfachung der Fruchtfolgen und die intensive Grünlandbewirtschaftung mit übermäßigem Einsatz von Pestiziden haben zu einem Verlust an Biodiversität und Lebensräumen für Wildtiere geführt (ATF, 2019).

Die Intensivierung der Tierhaltung hat auch die Probleme im Bereich Tiergesundheit und Tierschutz verschärft (Leenstra et al. 2013). Außerdem ist die lokale Überproduktion von Flüssigmist in spezialisierten Geflügel- und Schweinehaltungsbetrieben ein gravierendes Umweltproblem, unter anderem wegen der Gefahr der Eutrophierung. Aufgrund der Verfügbarkeit kostengünstiger Düngemittel werden Wirtschaftsdünger nicht mehr als wertvolle Ressource mehr für den Ackerbau gesehen (ATF, 2019).

Die derzeitige hohe Produktivität der europäischen landwirtschaftlichen Systeme ist das Ergebnis von Spezialisierung und Intensivierung und bietet dem Landwirt sozioökonomische Vorteile (EIP-Agri, 2017; Schut et al., 2021). Zu den weiteren Vorteilen der Spezialisierung gehören die Größenordnung der Betriebe, die soziale Dimension mit einer starken Abhängigkeit von ganzjährigen Familienarbeitskräften und der Wettbewerb um Land, bei dem große Betriebe dazu neigen, ihre Flächen auf Kosten kleinerer Betriebe zu vergrößern (Schut et al., 2021).

Die EU-Nitrat-Richtlinie regelt den Tierbesatz pro Fläche und die Ausbringung von Wirtschaftsdünger pro Hektar. In Brasilien zielt die Politik im Bereich Landwirtschaft auf eine Integration von Pflanzenbau, Tierhaltung und Forstwirtschaft ab (Garrett et al., 2017). Die EU hat beschlossen, die Verbindungen zwischen Tierhaltung und Pflanzenbau zu stärken, und hat zu diesem Zweck Forschungs- und Innovationsprioritäten festgelegt (ATF, 2019; EIP-Agri, 2017). Mit der Strategie "Vom Erzeuger zum Verbraucher" strebt die EU einen Übergang zu fairen, gesunden und widerstandsfähigen Tierhaltungssystemen an und zielt auf die Senkung der Produktionskosten, die Verbesserung der Bodenbewirtschaftung, der Wasserqualität und der Biodiversität sowie die Verringerung des Einsatzes von Düngemitteln, Pestiziden und Treibhausgasemissionen zum Nutzen der Landwirte und Bürger ab.

Ein verbesserter Zugang zu IKT-Instrumenten für den Einsatz in der Präzisionslandwirtschaft und der Datenwissenschaft, soll helfen, die gesetzten Ziele zu erreichen (EU-C, 2020b). Dies soll zu einer verbesserten Fähigkeit führen, die ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen der vorgeschlagenen Praktiken und Innovationen zu berücksichtigen. Der Green Deal der EU verpflichtet sich, Maßnahmen zur Wiederherstellung natürlicher Ökosysteme zu ergreifen, die nachhaltige Nutzung von Ressourcen zu fördern und die menschliche Gesundheit zu verbessern. Die Vereinbarung spricht sich für die digitale Transformation aus, um den Wandel im Agrarsektor zu beschleunigen, und für eine angemessene Berücksichtigung der Kompromisse zwischen wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Zielen. Verschiedene politische Instrumente wie Regulierung, Normung, Innovation und Dialog dienen dazu, diese Verpflichtung zu stärken. Diese Verpflichtung kommt in dem Vorschlag der EU-Kommission zum Ausdruck, das Ziel der EU für die Verringerung der Treibhausgasemissionen bis 2030 auf mindestens 50% und in Richtung 55% gegenüber dem Niveau von 1990 auf verantwortungsvolle Weise zu erhöhen (EU-C, 2019). Viele europäische Länder haben in jüngster Zeit Klimagesetze erlassen, in denen zum ersten Mal verbindliche THG-Emissionsreduktionsziele für den Agrarsektor festgelegt werden (Meyer-Ohlendorf, 2019). Die Methanstrategie ruft dazu auf, ein Gleichgewicht zwischen Technologien, Märkten und veränderten Ernährungsgewohnheiten herzustellen und nachhaltige Geschäftsmöglichkeiten für Landwirte zu schaffen (EU-C, 2020a; Zhongming et al., 2021). Für eine erfolgreiche Re-Integration der landwirtschaftlichen Systeme ist eine Abkehr von traditionellen Ansätzen und Konzepten erforderlich.

Die Europäische Union unterstützt im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) die Einführung und Integration der Agroforstwirtschaft in landwirtschaftliche Systeme. Der Begriff "Agroforstwirtschaft" wird für Systeme verwendet, bei denen Bäume und Landwirtschaft entweder auf "Wald"- oder "landwirtschaftlichen" Flächen koexistieren, um von den daraus resultierenden ökologischen und wirtschaftlichen Wechselwirkungen zu profitieren (Burgess et al., 2018; Moreno et al., 2018). Die GAP (2014-2020) legt Ziele für die Einrichtung von Agroforstflächen fest, aber die Programme wurden entweder noch nicht angekündigt oder von den Landwirten in mehreren Ländern oder Regionen nicht ausreichend angenommen (nur 1,5% der geplanten Gesamtfläche wurden bis 2018 umgesetzt) (Burgess et al., 2018). Die Gesamtfläche der Agroforstwirtschaft in der EU27 wird auf 15,4 Mio. ha geschätzt, was 3,6 % der territorialen Fläche oder 8,8 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche entspricht.

6 Landwirtschaft und Klimaschutz / Klimaneutralität

6.1 Integrierter Energie- und Klimaplan für Österreich

Das Grantham Research Institute an der LSE und das Sabin Center an der Columbia Law School geben einen Überblick über die Klimaschutzgesetze der Welt¹. In Bezug auf Österreich heißt es dort: "Der Nationale Energie- und Klimaplan (ENCP) ist ein integriertes Zehnjahresdokument, das die Europäische Union jedem ihrer Mitgliedsstaaten auferlegt hat, damit die EU ihre Gesamtziele für Treibhausgasemissionen erreichen kann. Österreichs Plan zielt insbesondere darauf ab, die Entwicklung des Verkehrssektors zu verbessern, ein Sektor, der in Österreich noch verbesserungsbedürftig ist, vor allem in Ballungsgebieten und entlang von Transitstrecken. In diesem Zusammenhang impliziert die Dekarbonisierung mehrere Ziele

¹ <https://climate-laws.org/about>

und Maßnahmen: 1) die Reduktion der Treibhausgasemissionen (non-ETS) um 36% gegenüber 2005, 2) die Stärkung und der Ausbau des öffentlichen Verkehrs, 3) ein Mobilitätsmanagement für Unternehmen, Städte, Gemeinden, Regionen und Tourismus, 4) E-Mobilität im Individualverkehr, 5) die Ökologisierung der Normverbrauchsabgabe und der motorbezogenen Versicherungssteuer, 6) der Vorsteuerabzug für Elektrofahrräder und -motorräder. Die Dekarbonisierung umfasst Maßnahmen in den Bereichen Gebäude, Land- und Forstwirtschaft, Abfallwirtschaft, fluorierte Gase und Raumplanung. Im Energiebereich besteht das Hauptziel darin, den Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch auf 46-50% zu erhöhen und 100% des Stromverbrauchs aus erneuerbaren Energien zu decken (national/ausgewogen). Um dieses Ziel zu erreichen, bleibt das wichtigste Instrument die Besteuerung (Steuervergünstigungen oder Steuerbefreiungen). Der Plan zielt auch auf Maßnahmen in folgenden Bereichen ab: 1) Energieeffizienz, 2) Energiebinnenmarkt, 3) Forschung/Innovation/Wettbewerbsfähigkeit, 4) Bewertung und Monitoring.

Tabelle 1 des Integrierten Nationalen Energie- und Klimaplan für Österreich enthält detaillierte Maßnahmen für den Agrarsektor:

- Vermeidung von Methan- und Lachgasemissionen in der Landwirtschaft, insbesondere durch:
 - Düngemittelmanagement
 - Einbringung eines wesentlichen Anteils des Wirtschaftsdüngers in Biogasanlagen
- Erhaltung und Aufbau von Humus (durch Bewirtschaftungsmethoden und Pflege von Ackerflächen)
- Erhaltung von Dauergrünland
- Anpassungen in der Tierhaltung

Dies soll durch die folgenden Instrumente erreicht werden:

- Finanzierung von klimarelevanten Praktiken und Maßnahmen
- Ordnungspolitische Maßnahmen
- Wirtschaftliche Rahmenbedingungen (z.B. über das Erneuerbaren Ausbau Gesetz)

Schatzter und Lindenthal (2020) verfassten eine Studie zum Einfluss von unterschiedlichen Ernährungsweisen auf Klimawandel und Flächeninanspruchnahme in Österreich und Übersee. Sie kommen zu dem Schluss, dass der Fleischkonsum reduziert werden muss, wenn die Klimaziele in der Landwirtschaft erreicht werden sollen. Die gegenwärtige Ernährungsweise in Österreich verursacht erhebliche THG-Emissionen und viele weitere negative Umwelteffekte innerhalb Österreichs sowie in anderen Ländern (u.a. auch in Südamerika und Südostasien über Soja- und Palmölimporte). Laut der Berechnungen von Schatzter und Lindenthal (2020) könnten 28% der THG-Emissionen pro Person und Jahr eingespart werden, wenn der Fleischanteil in der Ernährung um 66 % reduziert wird. Vegetarische und vor allem vegane Ernährungsweisen führen zu noch höheren THG-Einsparungen von 48% resp. 70%.

5.2 Vorschläge zur Klimaneutralität - Deutschland

In Deutschland werden im Wesentlichen drei Handlungsfelder gesehen, um Klimaneutralität im Bereich der Landwirtschaft zu erreichen (Grethe et al. 2021):

1. Stickstoffeffizienz verbessern
2. Konsum und Produktion tierischer Produkte verringern
3. Moore wiedervernässen

Diese Handlungsfelder weisen besonders hohe Minderungspotenziale auf, ihre Adressierung ist volkswirtschaftlich sinnvoll und sie leisten auch in anderen Nachhaltigkeitsdimensionen hohe Zielbeiträge. Die Autoren berechnen, dass diese Maßnahmen zu einer Reduktion der THG-Emissionen aus Landwirtschaft und landwirtschaftlicher Bodennutzung in Deutschland von heute über 100 Mio. t jährlich auf unter 50 Mio. t jährlich bis 2045 führen können. Konkret wird dafür folgendes empfohlen:

1. Stickstoffeffizienz der Düngung verbessern.

Bis zum Jahr 2030 sollen N-Überschüsse auf 70 kg N/ha vermindert werden, was zu einer THG-Reduktion von 3,5 Mio. t CO₂-Äqu. Jährlich führt. Gleichzeitig werden weitere 1 Mio. t CO₂-Äqu aus der Mineraldüngerproduktion eingespart. Bis 2045 sollen die N-Überschüsse dann auch 50 kg N/ha gesenkt werden, wodurch weitere 1,5 Mio. t CO₂-Äqu. in der Landwirtschaft eingespart werden. und zusätzliche Einsparungen in der Mineraldüngerproduktion erreichen. Um dieses Ziel zu erreichen werden eine belastbare, transparente und überprüfbare einzelbetriebliche Stoffstrombilanzierung und eine N-Steuer (50 Cent/kg N) vorgeschlagen.

2. Konsum und Produktion tierischer Produkte verringern und Zusammensetzung des Konsums tierischer Produkte ändern

Tierische Produkte, insbesondere Rindfleisch, haben deutlich höhere THG-Emissionen als pflanzliche Produkte. Eine Ernährung mit weniger tierischen und mehr pflanzlichen Produkten kann CO₂-Emissionen deutlich mindern (u.a. Barnsley et al. 2021). Würde der Verzehr tierischer Produkte um 30% reduziert werde, so ließen sich in Deutschland rund 14 Mio. t CO₂-Äqu. einsparen. Dies gilt unter der Prämisse, dass die Reduktion des Verbrauchs mit einer äquivalenten Reduktion der Tierhaltung einhergeht. Die Studie von Grethe et al. (2021) weist dabei auf die erheblichen Synergien mit weiteren Nachhaltigkeitszielen hin. Die Autoren schlagen vor, die Transformation in Richtung einer mehr pflanzenbasierten Ernährung durch Information, Bildung, öffentliche Gemeinschaftsverpflegung, ein staatliches Klimalabel und Preisanreize zu unterstützen.

3. Moore wiedervernässen

Landwirtschaftliche genutzte Moore und Anmore umfassen knapp 7% der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland. Trocken gelegte Moorböden verursachen in Deutschland etwa 40% der gesamten landwirtschaftlichen THG-Emissionen. Das Wiedervernässen der Moorböden könnte pro Jahr mehr als 30 Mio. t CO₂-Äqu. einsparen. Ob eine weitgehende Vernässung gelingt und dieses Potential erreichbar ist derzeit noch Gegenstand von Diskussionen.

Die deutsche Strategie geht davon aus, dass Maßnahmen innerhalb Deutschlands getroffen werden: geringere Stickstoffverluste, geringerer Verbrauch an tierischen Lebensmitteln und damit verringerte Produktion sowie Wiedervernässung von Mooren.

5.3 Vorschläge zur Klimaneutralität – Dänemark

Dänemark geht hier einen anderen Weg. Basierend auf der Annahme, dass die Produktion in Dänemark klimafreundlicher als in anderen Ländern soll die dänische Produktion ausgebaut und die erzeugten Produkte exportiert werden. Dadurch wird die weniger klimafreundliche Produktion in andern Ländern reduziert. Die dänische Strategie setzt einen deutlicheren Fokus auf Technologie-Entwicklung für geringere Emissionen. Die verbesserten Technologien sollen

sowohl in Dänemark als auch außerhalb zum Einsatz kommen mit dem Ziel, die THG-Emissionen weltweit zu senken.

Der Bericht „A Pathway to Carbon Neutral Agriculture in Denmark“ (Searchinger et al. 2021) fasst folgende Highlights zusammen:

- Die dänische Landwirtschaft, vor allem die Schweine- und Milchwirtschaft, erzeugt jährlich 17,4 Millionen Tonnen Treibhausgase (Kohlendioxidäquivalent oder CO₂e).
- Die Umwandlung einheimischer Ökosysteme, die in Dänemark landwirtschaftlich genutzt werden, hat auf Jahresbasis zu einem Verlust von 48 Millionen Tonnen CO₂ geführt, womit eine Basis-Emission festgelegt wurde, welche die "kohlenstoffneutrale" Landwirtschaft nicht überschreiten sollte.
- Die dänische Landwirtschaft hat relativ niedrige Emissionen pro Nahrungsmittleinheit, so dass eine Verringerung der Produktion in Dänemark zu einer Verlagerung der Nahrungsmittelproduktion an andere Standorte führen und wahrscheinlich die globalen Emissionen erhöhen würde.
- Vielversprechende Maßnahmen könnten die Emissionen der heimischen Produktion um 80% reduzieren.
- Um "kohlenstoffneutral" zu sein, d.h. seinen Teil dazu beizutragen, die Abholzung von Wäldern zu vermeiden, während die weltweite Nahrungsmittelproduktion zunimmt, muss die dänische Landwirtschaft zwischen 2017 und 2050 wahrscheinlich 45% mehr Nahrungsmittel pro Hektar produzieren.
- Durch Futtermitteleffizienz und Ertragssteigerungen, die Verlagerung von Anbauprodukten, neuartige Verwendungen von Gräsern und Verbesserungen auch außerhalb von Dänemark könnte Dänemark die Landnutzungseffizienz noch weiter steigern und genügend Torfgebiete und Wälder wiederherstellen, um die verbleibenden Emissionen der landwirtschaftlichen Produktion auszugleichen.
- Diese Strategie erfordert ehrgeizige Anstrengungen zur Entwicklung und Anwendung neuer Technologien.
- Die dänischen Bemühungen zur Emissionsminderung in der Landwirtschaft sind am effektivsten, wenn sie die technologischen, wirtschaftlichen und politischen Innovationen entwickeln, die die Emissionsminderung auch auf globaler Ebene vorantreiben.

7 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Die Landwirtschaft, wie sie derzeit praktiziert wird, verursacht in erheblichem Maße Umweltschäden, die sich negativ auf die Gesundheit und die damit verbundenen Kosten auswirken. Um diese Probleme in Zukunft zu vermeiden, müssen die landwirtschaftlichen Systeme in umfassende One-Health-Konzepte integriert werden, die den Zusammenhang zwischen der Gesundheit von Menschen, Tieren und der Umwelt anerkennen. Die Landwirtschaft erweitert ihr Spektrum von der engen Aufgabe der Biomasseproduktion hin zu einer umfassenden Rolle beim Schutz und der Förderung der Gesundheit und übernimmt damit Verantwortung für die Verringerung von Umwelt- und Gesundheitsrisiken, die derzeit externalisiert werden.

In jüngster Zeit haben die EU, die UN und die FAO eine Reihe von Strategiepapieren veröffentlicht, die sich mit der Lebensmittel- und Ernährungssicherheit, der Klimaanfälligkeit, dem Klimawandel, der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen und der Resilienz befassen. Die FAO bewertete die globale Situation in Bezug auf die Zukunft von Lebensmitteln und Landwirtschaft und veröffentlichte Berichte über zukünftige nachhaltige Tierhaltungssysteme. Auf EU-Ebene wurden die Bioökonomie-Strategie, die „Farm to Fork“-Strategie, der "Green Deal" und die Notwendigkeit einer Kreislaufwirtschaft veröffentlicht, um eine Vision zukünftiger Systeme zu schaffen. Landwirtschaftliche Aktivitäten müssen die planetaren Grenzen respektieren. Nährstoffverluste und Treibhausgasemissionen müssen vermieden werden. Daraus ergibt sich die Forderung nach einer besseren Integration von Pflanzenbau und Tierhaltung und einem Überdenken der Rolle der Tierhaltung in bioökonomischen Kreislaufsystemen. Produktion und Verbrauch von Produkten tierischen Ursprungs müssen auf ein Niveau reduziert werden, das eine nachhaltige Produktion ermöglicht.

Konzepte wie nachhaltige Intensivierung, Agrarökologie, Agroforstwirtschaft, klimaintelligente Landwirtschaft, naturnahe Landwirtschaft und konservierende Landwirtschaft sind auf dem Weg zu künftigen nachhaltigen Agrarsystemen von erheblicher Bedeutung. Die digitale Transformation wird Werkzeuge liefern, um landwirtschaftliche Prozesse mit hoher Effizienz und geringen Umweltauswirkungen besser zu steuern. Dies wird dazu beitragen, die Tierhaltung und die Pflanzenproduktion (wieder) miteinander zu verbinden, um Synergien und eine höhere Leistung auf der Grundlage neuer Futtermittel, Düngemittel und einer verbesserten Bodenfruchtbarkeit zu erzielen. Das Schließen von Kohlenstoff- und Nährstoff-Kreisläufen wird zu einer Verringerung von Abfällen und Emissionen, insbesondere von Methan und Stickstoff, führen. Weitere Maßnahmen sind erforderlich, um One-Health-Konzepte zu unterstützen, den Einsatz von Antibiotika zu minimieren, den Dialog zwischen den verschiedenen Interessengruppen zu fördern, die Verbesserung der Produktionsverfahren zu fördern und das Tierwohl als weitere Priorität zu berücksichtigen.

References

- Abbeddou, S., Rischkowsky, B., Richter, E. K., Hess, H. D., & Kreuzer, M. (2011). Modification of milk fatty acid composition by feeding forages and agro-industrial byproducts from dry areas to Awassi sheep. *Journal of Dairy Science*, *94*(9) 4657-4668.
- Akinola, O. S., Alabi, J. O., Fafiolu, A. O., Adedayo, F. T., Sogunle, O. M., Oduguwa, O. O., & Fanimo, A. O. (2013). Nutritive value of fermented and amino acid-supplemented malted sorghum sprouts for growing pigs. *Tropical Animal Health and Production* *45*(2), 657-663.
- Aregheore, E. M., *Tropical Animal Health and Production*,. (2002). Chemical evaluation and digestibility of cocoa (*Theobroma cacao*) byproducts fed to goats. . *Tropical Animal Health and Production*, *34*(4), 339-348.
- ATF (Animal Task Force). (2019). Vision Paper towards European Research and Innovation. Retrieved from Brussels: http://animaltaskforce.eu/Portals/0/ATF_Vision_Paper_2019.pdf
- ATF (Animal Task Force). (2021). A Strategic Research and innovation Agenda for a sustainable livestock sector in Europe. Retrieved from Brussels: http://animaltaskforce.eu/Portals/0/2nd%20White%20Paper/ATF-2nd%20whitepaper_final.pdf
- Barrios, E., Gemmill-Herren, B., Bicksler, A., Siliprandi, E., Brathwaite, R., Moller, S., ... & Tiftonell, P. (2020). The 10 Elements of Agroecology: enabling transitions towards sustainable agriculture and food systems through visual narratives. *Ecosystems and People*, *16*(1), 230-247.
- Bedoić, R., Ćosić, B., & Duić, N. (2019). Technical potential and geographic distribution of agricultural residues, co-products and by-products in the European Union. *Science of the Total Environment*, *686*, 568-579.
- Billen, G., Aguilera, E., Einarsson, R., Garnier, J., Gingrich, S., Grizzetti, B., ... & Sanz-Cobena, A. . (2021). Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity. . *One Earth*, *4*(6), 839-850.
- Bizzuti, B. E., de Abreu Faria, L., da Costa, W. S., Lima, P. D. M. T., Ovani, V. S., Krüger, A. M., ... & Abdalla, A. L. (2021). Potential use of cassava by-product as ruminant feed. *Tropical Animal Health and Production*, *53*(1), 1-7.
- BMEL (2020). Secure nutrition - promote growth. The BMEL's commitment to modern, sustainable agriculture, food and forestry in Africa. B. f. E. u. Landwirtschaft. Berlin. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/EN/Publications/afrika-konzept_en.html
- Bonaudo, T., Bendahan, A. B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., . . . Tichit, M. (2014). Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy*, *57*, 43-51.
- Bouwman L., G. K., Hoek KWvD., Beusen AHW, Vuuren DPV, Willems J, Rufino MC, Stehfest E 2013. (2013). Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agric induced by livestock prod 1900-2050 period *Proceedings of the National Academy of Science*, 20882–20887. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1012878108

- Brown, C. N., Mallin, M. A., & Loh, A. N. (2020). Tracing nutrient pollution from industrialized animal production in a large coastal watershed. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(8), 1-17.
- Burns, E. A. (2021). Placing regenerative farming on environmental educators' horizons. *Australian Journal of Environmental Education*, 37(1), 29-39.
- Campbell, J. E., Lobell, D. B., Genova, R. C., & Field, C. B. (2008). The global potential of bioenergy on abandoned agriculture lands. *Environmental science & technology*, 42(15), 5791-5794.
- Cárdenas, A., Moliner, A., Hontoria, C., & Ibrahim, M. (2019). Ecological structure and carbon storage in traditional silvopastoral systems in Nicaragua. *Agroforestry Systems*, 93(1), 229-239.
- Chang, J., Ciais, P., Gasser, T., Smith, P., Herrero, M., Havlík, P., . . . Li, W. (2021). Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands. *Nature Communications*, 12(1), 1-10.
- Colley, T. A., Olsen, S. I., Birkved, M., & Hauschild, M. Z. (2020). Delta life cycle assessment of regenerative agriculture in a sheep farming system. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 16(2), 282-290.
- Dale, V. H., Kline, K. L., Wiens, J., & Fargione, J. (2010). Biofuels: implications for land use and biodiversity (pp1-13): Ecological Society of America Washington, DC. <https://www.esa.org/biofuelsreports/>
- Dauber, J., Brown, C., Fernando, A. L., Finnan, J., Krasuska, E., Ponitka, J., . . . Weih, M. (2012). Bioenergy from “surplus” land: environmental and socio-economic implications. *BioRisk*, 7, 5-50. www.doi.org/10.3897/biorisk.7.3036
- Dou, Z., Toth, J. D., & Westendorf, M. L. (2018). Food waste for livestock feeding: Feasibility, safety, and sustainability implications. *Global Food Security*, 17, 154-161.
- Dumont, B., Groot, J., & Tichit, M. (2018). Make ruminants green again—how can sustainable intensification and agroecology converge for a better future? *Animal*, 12(s2), s210-s219.
- Duncan, A. J., Bachewe, F., Mekonnen, K., Valbuena, D., Rachier, G., Lule, D., . . . Erenstein, O. (2016). Crop residue allocation to livestock feed, soil improvement and other uses along a productivity gradient in Eastern Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 228, 101-110.
- EIP-Agri. (2017). Focus group on mixed farming systems livestock/cash crops. Retrieved from https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/fg16_minipaper5_2017_en.pdf
- Eisler, M. C., Lee, M. R., Tarlton, J. F., Martin, G. B., Beddington, J., Dungait, J. A., . . . Miller, H. (2014). Agriculture: steps to sustainable livestock. *Nature News*, 507(7490), 32.
- Erisman, J. W., van Eekeren, N., van Doorn, A., Geertsema, W., & Polman, N. (2017). Measures for nature-based agriculture No. 2821 (1566-7197). Wageningen Environmental Research. Retrieved from <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/448933>

- Ertl, P., Zebeli, Q., Zollitsch, W., & Knaus, W. (2015). Feeding of by-products completely replaced cereals and pulses in dairy cows and enhanced edible feed conversion ratio. *Journal of Dairy Science*, 98(2), 1225-1233.
- EU-C. (2018). A Sustainable Bioeconomy for Europe: Strengthening the Connection between Economy, Society and the Environment - Updated Bioeconomy Strategy. Brussels: European Commission. https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/sustainable-bioeconomy-europe-strengthening-connection-between-economy-society_en
- EU-C. (2019). A European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- EU-C. (2020a). EU strategy to reduce methane emissions [Press release] https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/eu_methane_strategy.pdf
- EU-C. (2020b). Farm to fork strategy: for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Retrieved from https://ec.europa.eu/food/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en
- EU-C. (2020c). Food 2030 pathways for action - Research and innovation policy as a driver for sustainable, healthy and inclusive food systems. Retrieved from Brussels: https://ec.europa.eu/info/publications/food-2030-pathways-action-research-and-innovation-policy-driver-sustainable-healthy-and-inclusive-food-systems-all_en
- FACCE-JPI. (2020). Strategic Research Agenda. Retrieved from <https://www.faccejpi.net/en/faccejpi/strategy/strategic-research-agenda.htm>
- FAO. 2012. Biofuel co-products as livestock feed - Opportunities and challenges, edited by Harinder P.S. Makkar. Rome. Retrieved from <https://www.fao.org/3/i3009e/i3009e00.htm>
- FAO. (2016). Global initiative on food loss and waste reduction. Key facts on food loss and waste you should know. Retrieved from <https://www.fao.org/3/i4068e/i4068e.pdf>
- FAO. (2017a). The Future of Food and Agriculture Driving action across the 2030 Agenda for SDGs. Retrieved from Rome: <https://www.fao.org/3/i7454en/i7454en.pdf>
- FAO. (2017b). The Future of Food and Agriculture Trends and challenges. Retrieved from Rome: <https://www.fao.org/3/i6881e/i6881e.pdf>
- FAO. (2017c). Livestock solutions for climate change. Retrieved from Rome: <https://www.fao.org/3/i8098e/i8098e.pdf>
- FAO. (2018a). The future of food and agriculture, alternative pathways to 2050. Retrieved from Rome: <http://www.fao.org/3/i8429EN/i8429en.pdf>
- FAO. (2018b). Shaping the future of Livestock. Retrieved from Rome: <https://www.fao.org/3/i8384en/i8384en.pdf>
- FAO. (2018c). World Livestock: transforming the livestock sector through the sustainable development goals. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from Rome: <http://www.fao.org/3/CA1201EN/ca1201en.pdf>
- FAO. (2019a). Averting risks to the food chain – A compendium of proven emergency prevention methods and tools. Retrieved from Rome: <https://www.fao.org/3/ca3608en/ca3608en.pdf>

- FAO. (2019b). Five practical actions towards low carbon livestock. Retrieved from Rome: <https://www.fao.org/3/ca7089en/ca7089en.pdf>
- FAO. (2019c). Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment Retrieved from Rome: <https://www.fao.org/3/ca2934en/CA2934EN.pdf>
- FAO. (2020). Livestock, natural resource use, climate change and environment [Press release] <https://www.fao.org/3/nd386en/nd386en.pdf>
- Ferguson, J. D. (2016). Food waste as animal feed. Food Waste Across the Supply Chain: a US Perspective on a Global Problem. Council for Agricultural Science and Technology, Ames, IA, 235-261. Retrieved from <https://www.cast-science.org/wp-content/uploads/2016/03/CAST-Food-Waste-Across-the-Supply-Chain-2016.pdf#page=252>
- Fernandez-Mena, H., MacDonald, G.K., Pelllerin, S. Nesme, T. (2020). Co-benefits and trade-offs from agro-food system redesign study for circularity: a case study with the FAN agent-Based Model. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 41-57.
- Frank, S., Havlík, P., Soussana, J.-F., Levesque, A., Valin, H., Wollenberg, E., . . . Herrero, M. (2017). Reducing greenhouse gas emissions in agriculture without compromising food security? *Environmental Research Letters*, 12(10), 105004.
- Fu C, C. Z., Wang G, Yu X A. (2021). Comprehensive framework for evaluating the impact of land use change and management on soil organic carbon stocks in global drylands. . *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 48, 103-109.
- Garrett, R., Niles, M. T., Gil, J. D., Gaudin, A., Chaplin-Kramer, R., Assmann, A., . . . Cortner, O. (2017). Social and ecological analysis of commercial integrated crop livestock systems: Current knowledge and remaining uncertainty. *Agricultural Systems*, 155, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.05.003>
- GBS2020. (2020). Expanding the Sustainable Bioeconomy – Vision and Way Forward. . Retrieved from https://gbs2020.net/wp-content/uploads/2020/11/GBS2020_IACGB-Communique.pdf
- Gopalakrishnan, G., Cristina Negri, M., & Snyder, S. W. (2011). A novel framework to classify marginal land for sustainable biomass feedstock production. *Journal of Environmental Quality*, 40(5), 1593-1600.
- Gustavsson, J., & Sonesson, U. (2011). ~~Global food losses and food waste: extent, causes and prevention.~~
- FAO. 2011. Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention. Retrieved from Rome. <https://www.fao.org/3/i2697e/i2697e.pdf>
- Angulo, J., Mahecha, L., Yepes, S. A., Yepes, A. M., Bustamante, G., Jaramillo, H., ... & Gallo, J. (2012). Nutritional evaluation of fruit and vegetable waste as feedstuff for diets of lactating Holstein cows. *Journal of Environmental Management*, 95, S210-S214.
- Kang, S., Post, W. M., Nichols, J. A., Wang, D., West, T. O., Bandaru, V., & Izaurralde, R. C. (2013). Marginal lands: concept, assessment and management. *Journal of Agricultural Science*, 5(5), 129. : <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v5n5p129>

- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological Economics* 143, 37-46.
- Kummu, M., Heino, M., Taka, M., Varis, O., & Viviroli, D. (2021). Climate change risks pushing one-third of global food production outside the safe climatic space. *One Earth*, 4(5), 720-729.
- LaCanne, C. E., & Lundgren, J. G. (2018). Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ*, 6, e4428. <https://doi.org/10.7717/peerj.4428>
- Lao, E. J., Dimoso, N., Raymond, J., & Mbega, E. R. (2020). The prebiotic potential of brewers' spent grain on livestock's health: a review. *Tropical Animal Health and Production*, 52(2), 461-472.
- Leahy, S., Clark, H., & Reisinger, A. (2020). Challenges and prospects for agricultural greenhouse gas mitigation pathways consistent with the Paris agreement. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 69.
- Mirzabaev, A., Olsson, L., Bezner Kerr, R., Pradhan, P., Rivera Ferre, M. G., & Lotze-Campen, H. (2021). Climate Change and Food Systems. Food Systems Summit Brief https://sc-fss2021.org/wp-content/uploads/2021/05/FSS_Brief_Climate_Change_and_Food_Systems.pdf
- Morais, T., Teixeira, R., Lauk, C., Theurl, M., Winiwarter, W., Mayer, A., . . . Erb, K.-H. (2021). Agroecological measures and circular economy strategies to ensure sufficient nitrogen for sustainable farming. *Global Environmental Change*, 69, 102313.
- Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., & Gerber, P. (2017). Livestock: on our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*, 14, 1-8.
- Muscat, A., de Olde, E. M., Ripoll-Bosch, R., Van Zanten, H. H., Metzger, T. A., Termeer, C. J., . . . de Boer, I. J. (2021). Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nature Food*, 1-6.
- Muthui, N. J., Matofari, J. W., Kingori, A. M., & Hülsebusch, C. G. (2019). Estimation of daily nutrient allowances for pigs fed with alternative feed resources in smallholder enterprises in Kenya. *Tropical Animal Health and Production*, 51(4) 799-808
- Nardone, A., Ronchi, B., Lacetera, N., Ranieri, M. S., & Bernabucci, U. (2010). Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science*, 130(1-3), 57-69.
- Nurfeta, A. (2010). Feed intake, digestibility, nitrogen utilization, and body weight change of sheep consuming wheat straw supplemented with local agricultural and agro-industrial by-products. *Tropical Animal Health and Production*, 42(5) 815-824.
- Ogbuewu, I. P., & Mbajiorgu, C. A. (2019). Potential of leaf and seeds of tropical plants in chicken diets: effect on spermatozoa and egg production (Review) *Tropical Animal Health and Production*, 51(2), 267-277.

- Oloche, J., Atooshi, M. Z., & Tyokase, M. U. (2019). Growth performance and blood profile of West African Dwarf (WAD) goats fed varying levels of treated sweet orange peels. *Tropical Animal Health and Production*, *51*(1), 131-136.
- Pang, D., Yan, T., Trevisi, E., & Krizsan, S. J. (2018). Effect of grain-or by-product-based concentrate fed with early-or late-harvested first-cut grass silage on dairy cow performance. *Journal of Dairy Science*, *101*(8), 7133-7145.
- Popp, J., Harangi-Rákos, M., Gabnai, Z., Balogh, P., Antal, G., & Bai, A. (2016). Biofuels and their co-products as livestock feed global economic and environmental implications. *Molecules*, *21*(3), 285-311.
- Pradhan, P., Costa, L., Rybski, D., Lucht, W., & Kropp, J. P. (2017). A systematic study of sustainable development goal (SDG) interactions. *Earth's Future*, *5*(11), 1169-1179.
- Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. J., . . . Morris, C. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, *1*(8), 441-446.
- Pretty, J., & Bharucha, Z. P. (2015). Integrated pest management for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa. *Insects*, *6*(1), 152-182.
- Reynolds, M. A., Brown-Brandl, T.M., Judy, J.V. , Herrick, K.J., Hales, K.E., Watson, A.K., Kononoff, P.J. (2019). Use of indirect calorimetry to evaluate utilization of energy in lactating Jersey dairy cattle consuming common coproducts. *Journal of Dairy Science*, *102*(1) 320-333.
- Rhodes, C. J. (2012). Feeding and healing the world: through regenerative agriculture and permaculture. *Science progress*, *95*(4), 345-446.
- Romero-Huelva, M., Ramírez-Fenosa, M. A., Planelles-González, R., García-Casado, P., & Molina-Alcaide, E. (2017). Can by-products replace conventional ingredients in concentrate of dairy goat diet? *Journal of Dairy Science*, *100*(6), 4500-4512.
- Sadh, P. K., Kumar, S., Chawla, P., & Duhan, J. S. (2018). Fermentation: a boon for production of bioactive compounds by processing of food industries wastes (by-products). *Molecules*, *23*(10), 2560.
- Salami, S. A., Luciano, G., O'Grady, M. N., Biondi, L., Newbold, C. J., Kerry, J. P., & Priolo, A. (2019). Sustainability of feeding plant by-products: A review of the implications for ruminant meat production. *Animal Feed Science and Technology*, *251*, 37-55.
- Smith, J., Sones, K., Grace, D., MacMillan, S., Tarawali, S., & Herrero, M. (2013). Beyond milk, meat, and eggs: Role of livestock in food and nutrition security. *Animal Frontiers*, *3*(1), 6-13.
- Teigiserova D.A., H., L. Thomsen, M. (2020). Towards transparent valorisation of food surplus, waste and loss - clarifying definitions, food waste hierarchy, and role in the circular economy. *Science of the Total Environment*, *706*, 136033.
- Van Zanten, H. H., Herrero, M., Van Hal, O., Rööös, E., Muller, A., Garnett, T., ... & De Boer, I. J. (2018). Defining a land boundary for sustainable livestock consumption. *Global Change Biology*, *24*(9), 4185-4194.

- Villanueva-López, G., Martínez-Zurimendi, P., Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L., & Montañez-Escalante, P. I. (2015). Carbon storage in livestock systems with and without live fences of *Gliricidia sepium* in the humid tropics of Mexico. *Agroforestry Systems*, 89(6), 1083-1096.
- Wadhwa, M., & Bakshi, M. P. S. (2013). Utilization of fruit and vegetable wastes as livestock feed and as substrates for generation of other value-added products. *Rap Publication*, 4, 1-67. Retrieved from <https://www.fao.org/3/i3273e/i3273e00.htm>
- Wezel, A., Herren, B. G., Kerr, R. B., Barrios, E., Goncalves, A. L. R., & Sinclair, F. (2020). Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6). doi:ARTN 40
10.1007/s13593-020-00646-z
- Whish, G., Pahl, L., & Bray, S. (2016). Implications of retaining woody regrowth for carbon sequestration for an extensive grazing beef business: a bio-economic modelling case study. *The Rangeland Journal*, 38(3), 319-330.
- Wreford, A., & Topp, C. F. (2020). Impacts of climate change on livestock and possible adaptations: A case study of the United Kingdom. *Agricultural Systems*, 178, 102737.
- Zanten, v. H., Meerburg, B.G., Herrero, M., and Boer, I.J.M. (2015). Opinion paper the role of livestock in a sustainable diet a land use perspective. *Animal*, 10(4), 547-549.
- Zhou, G., Luo, Q., Chen, Y., He, M., Zhou, L., Frank, D., ... & Zhou, X. (2019). Effects of livestock grazing on grassland carbon storage and release override impacts associated with global climate change. *Global change biology*, 25(3), 1119-1132.