

# **DIE ZUKUNFT UNSERER ERNÄHRUNG: NAHRUNGS- MITTELPRODUKTION UND NAHRUNGSMITTELQUALITÄT**

---

Ralph Bock, Constanze Bickelmann,  
Benjamin Leon Bodirsky, Tilman Grune,  
Hermine Mitter, Andreas Seidel-Morgenstern,  
Peter von Philipsborn, Harald von Witzke,  
Lothar Willmitzer





Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften

**DIE ZUKUNFT UNSERER ERNÄHRUNG:  
NAHRUNGSMITTELPRODUKTION  
UND NAHRUNGSMITTELQUALITÄT**





Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften

**DIE ZUKUNFT UNSERER ERNÄHRUNG:  
NAHRUNGSMITTELPRODUKTION  
UND NAHRUNGSMITTELQUALITÄT**

---

Ralph Bock, Constanze Bickelmann, Benjamin Leon Bodirsky,  
Tilman Grune, Hermine Mitter, Andreas Seidel-Morgenstern,  
Peter von Philipsborn, Harald von Witzke, Lothar Willmitzer

In der Reihe „Denkanstöße“ werden Beiträge der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften (BBAW) zu aktuellen forschungspolitischen und wissenschaftlichen Themen veröffentlicht. Die namentlich gekennzeichneten Beiträge geben die Auffassung der Autorinnen und Autoren wieder.

## **Impressum**

Herausgeber: Der Präsident der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

Redaktion: Ute Tintemann

Grafik: eckedesign GmbH Berlin

Druck: USE, Union Sozialer Einrichtungen gemeinnützige GmbH, Berlin

@ Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, 2025

Jägerstr. 22 – 23, 10117 Berlin, [www.bbaw.de](http://www.bbaw.de)

Lizenz: cc-by-nc-sa

ISBN 978-3-949455-41-4

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung – Die Zukunft unserer Nahrungsmittel</b>	<b>7</b>
<b>1    Globale Herausforderungen der Nahrungsmittelproduktion</b>	<b>11</b>
<b>1.1    Welternährung im Wandel</b>	<b>11</b>
1.1.1    Aktuelle Situation und Trends	11
1.1.2    Historische Entwicklung und Zukunftsperspektiven	13
<b>1.2    Landwirtschaft und Umwelt</b>	<b>15</b>
1.2.1    Produktivität	15
1.2.2    Bodenfunktionen und Bodendegradation	16
1.2.3    Biodiversität und Landnutzung	18
1.2.4    CO <sub>2</sub> -Fußabdruck der Landwirtschaft	20
1.2.5    Agrochemie	22
1.2.6    Stickstoff	23
<b>1.3    Krisenresilienz und Klimawandel</b>	<b>25</b>
1.3.1    Globale Krisen	25
1.3.2    Stressfaktoren, die von der unbelebten Umwelt ausgehen	27
1.3.3    Stressfaktoren, die von der belebten Umwelt ausgehen	31
<b>1.4    Ein vernetztes Agrar- und Ernährungssystem</b>	<b>33</b>
1.4.1    Hauptfaktoren für die Sicherung der Welternährung	33
1.4.2    Produktion und Handel	34
1.4.3    Herausforderungen der globalen Vernetzung	36
<b>2    Lösungen für eine nachhaltige Nahrungsmittelproduktion</b>	<b>39</b>
<b>2.1    Landnutzungskonzepte</b>	<b>39</b>
2.1.1    Innovation und Produktivität versus Extensivierung	39
2.1.2    Agrarforstsysteme	42
2.1.3    Urbane Landwirtschaft	43
2.1.4    Aquaponik	45
2.1.5    Fleisch aus dem Labor	47
<b>2.2    Innovative Technologien</b>	<b>49</b>
2.2.1    Kreislaufwirtschaft	49
2.2.2    Chemischer Pflanzenschutz	51
2.2.3    Künstliche Intelligenz (KI) und Informationstechnologie (IT)	53

<b>2.3</b>	<b>Moderne Züchtungstechniken</b>	55
2.3.1	Gentechnik	55
2.3.2	Neue Züchtungstechniken (Genomedierung)	61
2.3.4	Ökonomische Aspekte	68
<b>2.4</b>	<b>Politische Rahmenbedingungen</b>	70
<b>2.5</b>	<b>Ernährungspolitik in Deutschland</b>	76
<b>3</b>	<b>Zur Qualität unserer Nahrungsmittel</b>	80
<b>3.1</b>	<b>Inhaltsstoffe von Pflanzen</b>	80
<b>3.2</b>	<b>Wirkungen von Inhaltsstoffen</b>	83
<b>3.3</b>	<b>Lebensmittelanalytik</b>	85
<b>3.4</b>	<b>Entwicklung gesundheitsförderlicher Lebensmittel</b>	86
3.4.1	Klassische Züchtung und neue Züchtungsziele	86
3.4.2	Zum Potenzial der modernen Züchtungstechniken	88
<b>4</b>	<b>Akuter Forschungsbedarf</b>	91
<b>4.1</b>	<b>Inhaltsstoffe von Nahrungsmitteln</b>	91
<b>4.2</b>	<b>Wirkungen von Inhaltsstoffen und Präzisionsernährung</b>	93
<b>4.3</b>	<b>Klima- und Umweltfolgen</b>	94
<b>4.4</b>	<b>Zukunfts- und Transformationsforschung</b>	98
<b>5</b>	<b>Empfehlungen</b>	100
<b>5.1</b>	<b>Einsatz neuer Züchtungstechniken</b>	100
<b>5.2</b>	<b>Klima- und Umweltfolgen</b>	101
<b>5.3</b>	<b>Nachhaltige Transformation des Agrar- und Ernährungssystems</b>	102
<b>5.4</b>	<b>Forschungsinvestitionen</b>	103
	<b>Glossar</b>	107
	<b>Literatur</b>	109
	<b>Autorinnen und Autoren</b>	129
	<b>Kapitelverantwortliche</b>	130
	<b>Mitglieder der Interdisziplinären Arbeitsgruppe</b>	131

# Einleitung – Die Zukunft unserer Nahrungsmittel

Mit Klimawandel und Biodiversitätsverlust, Ressourcenknappheit, stetig wachsender Weltbevölkerung und dem rasanten Anstieg chronischer, ernährungsmitbedingter Krankheiten steht die Zukunft unserer Nahrungsmittel und des globalen Agrar- und Ernährungssystems derzeit vor großen Herausforderungen. Landwirtschaft und Ernährung der Welt befinden sich am Beginn eines bedeutsamen Wandels, der sowohl die Produktion als auch unseren Konsum deutlich verändern wird. Wir haben die Verantwortung, mithilfe innovativer Lösungen eine umweltverträgliche und gesundheitsorientierte Lebensmittelproduktion für alle Menschen auf unserem Planeten sicherzustellen. Dabei sind ein gutes Verständnis der vielfältigen wechselseitigen Abhängigkeiten der Elemente der Transformationsprozesse und die daraus resultierenden Implikationen für Wissenschaft und Politik für den Erfolg des Transformationsprozesses von zentraler Bedeutung.

Die interdisziplinäre Arbeitsgruppe „Ernährung, Gesundheit, Prävention“ der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften hat sich intensiv mit dem gegenwärtigen wissenschaftlichen Diskurs zur Zukunft unseres Agrar- und Ernährungssystems befasst. Die Diskussionen innerhalb der interdisziplinären Arbeitsgruppe und unter den Autor:innen knüpfen an Gutachten, Stellungnahmen und Analysen zahlreicher (inter-)nationaler Fachorganisationen und Arbeitsgruppen an: Diese formulieren übereinstimmend, wie dringlich eine Ernährungswende ist. Beispielweise unterstreicht der aktuelle Sachstandsbericht des „Intergovernmental Panel on Climate Change“<sup>1</sup>, dass der Klimawandel die globale Ernährungssicherheit trotz zunehmender landwirtschaftlicher Produktivität beeinträchtigt. Dieser fordert rasche und weitreichende Veränderungen des Agrar- und Ernährungssystems, mit dem Ziel, Treibhausgasemissionen substanziell und dauerhaft zu reduzieren und die Anpassung an den Klimawandel systematisch

---

1 IPCC. 2023. AR6. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

voranzutreiben. Auch die „Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services“<sup>2</sup> zeigt auf, wie sich die großen globalen Herausforderungen wie abnehmende biologische Vielfalt, abnehmende Ernährungs- und Wassersicherheit, zunehmende Gesundheitsrisiken und der voranschreitende Klimawandels gegenseitig verstärken. Die Plattform betont, dass Anstrengungen, diese einzeln anzugehen, nicht wirksam seien oder sogar kontraproduktiv sein können. Die EAT-Lancet Commission drängt darauf, dass eine tiefgreifende Transformation des aktuellen Agrar- und Ernährungssystems dringend notwendig sei. Sie schlägt die globale Planetary Health Diet vor, die für Mensch und Umwelt gleichermaßen gesund ist (Willet et al. 2019). Die „Food System Economics Commission“ berechnete zum einen die Kosten, die das bestehende Agrar- und Ernährungssystem für die Gesellschaft verursacht, und zum anderen den wirtschaftlichen Nutzen für dessen Transformation.<sup>3</sup> Das „Global Panel on Agriculture and Food Systems for Nutrition“ beschreibt ebenfalls Schritte, die für einen erfolgreichen Wandel des Agrar- und Ernährungssystems notwendig sind.<sup>4</sup>

Angesichts der aktuellen kritischen Lage haben auch Mitglieder der interdisziplinären Arbeitsgruppe „Ernährung, Gesundheit, Prävention“ konkrete Vorschläge für das Gelingen eines weitreichenden Wandels des Agrar- und Ernährungssystems erarbeitet. Diese Empfehlungen richten sich an die wissenschaftliche Gemeinschaft, an Multiplikator:innen in die Gesellschaft und insbesondere an die Politik in Deutschland. Die Ergebnisse erscheinen in zwei „Denkanstößen aus der Akademie“ mit den Titeln „Die Zukunft unserer Ernährung: Nahrungsmittelproduktion und Nahrungsmittelqualität“ und „Die Zukunft unserer Ernährung: Ernährung und Gesundheit“ (Grune et al. 2025, „Denkanstoß“ 18). Der vorliegende „Denkanstoß“ widmet sich den notwendigen Veränderungen auf der Produktionsseite einer Ernährungswende, wohingegen sich „Denkanstoß“ 18 mit dem Umdenken in und der Umgestaltung von unseren Ernährungsweisen beschäftigt. Denn eine Ernährungswende kann nur erfolgreich gelingen, wenn Agrar- und Ernährungssystem gemeinsam gesundheitsförderlich und nachhaltig umgestaltet werden.

Im vorliegenden Beitrag gibt zunächst **Kapitel 1** einen Überblick über den derzeitigen Zustand und die historische Entwicklung des globalen und vernetzten

---

2 IPBES. 2024. Nexus Assessment Report. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11382230>

3 FSEC. 2024. [https://foodsystemeconomics.org/wp-content/uploads/FSEC-Global\\_Policy\\_Report.pdf](https://foodsystemeconomics.org/wp-content/uploads/FSEC-Global_Policy_Report.pdf)

4 GLOPAN. 2020. [https://www.glopan.org/wp-content/uploads/2020/09/Foresight-2.0\\_Future-Food-Systems\\_For-people-our-planet-and-prosperity.pdf](https://www.glopan.org/wp-content/uploads/2020/09/Foresight-2.0_Future-Food-Systems_For-people-our-planet-and-prosperity.pdf)

Agrar- und Ernährungssysteme. Die aktuellen Herausforderungen für die Lebensmittelproduktion unter erschwerten Bedingungen (durch beispielsweise Krisen, Biodiversitätsverlust, Klimawandel und Konflikte) werden zudem beleuchtet.

In **Kapitel 2** werden exemplarisch zukunftssträchtige Landnutzungskonzepte und Innovationen dargestellt. Der aktuelle Kenntnisstand zu Nutzen und Risiken von modernen Züchtungstechniken wird diskutiert. Innovative Technologien werden dringend benötigt, da die aktuelle Nahrungsmittelproduktion zukünftig nicht ausreichen wird, um den Herausforderungen einer weiter wachsenden Weltbevölkerung zu begegnen. Zudem gilt es, die Verteilung von und den Zugang zu gesundheitsförderlichen Lebensmitteln sozial gerecht zu gestalten.

**Kapitel 3** widmet sich dem gegenwärtigen Wissensstand zur Nahrungsmittelqualität. Trotz Fortschritten in der Lebensmittelanalytik sind viele der Inhaltsstoffe ebenso wie Wechselwirkungen in unseren Nahrungsmitteln immer noch unbekannt. Die Entwicklung gesundheitsförderlicher Nahrungsmittel wird als eine zukunftssträchtige Innovation für die Sicherung gesundheitsförderlicher und nachhaltiger Nahrungsmittel für die gesamte Weltbevölkerung identifiziert.

**Kapitel 4** analysiert den Forschungsbedarf im Hinblick auf einen Wandel des Agrar- und Ernährungssystems. Die Autor:innen sehen zum einen Forschungsbedarf bezüglich der Entschlüsselung von Art, Wirkort und Wechselwirkung möglichst vieler Nahrungsmittelbestandteile sowie der Präzisionsernährung. Auch der Umgang mit Klima- und Umweltfolgen bedarf weiterer Forschung. Nicht zuletzt identifizieren die Autor:innen weitere Anstrengungen in der interdisziplinären Transformationsforschung, die sich mit grundlegenden Veränderungen in der Gesellschaft, Wirtschaft und Politik, insbesondere in Richtung Nachhaltigkeit befasst. Ziel ist es, die Bedingungen, Mechanismen und Akteur:innen von Transformationen zu verstehen und Wege für einen positiven Wandel zu entwickeln.

In **Kapitel 5** folgen an die Politik gerichtete Empfehlungen für ein erfolgreiches Gelingen einer Agrar- und Ernährungswende. Im Mittelpunkt stehen neben einer Deregulierung der neuen Züchtungstechniken auch Forschungsinvestitionen in die Agrochemie, die Umwelt- und Agrarsoziologie, und die Klimafolgen- und Transformationsforschung. Das Kapitel schließt mit Empfehlungen, die der Nachhaltigkeit der Ernährungswende dienen, wie beispielsweise die finanzielle Förderung und Institutionalisierung bestehender Strukturen. Die Autor:innen knüpfen

hier an die Empfehlungen zahlreicher (inter-)nationaler Fachgremien an.<sup>5</sup> Beispielsweise empfiehlt auch der Wissenschaftsrat eine transformationsorientierte und systemische Umstrukturierung der Agrar-, Lebensmittel- und Ernährungsforschung sowie eine stärkere Vernetzung der Wissenschaftsdisziplinen.<sup>6</sup>

Die Autor:innen danken allen Mitgliedern der Interdisziplinären Arbeitsgruppe „Ernährung, Gesundheit, Prävention“ für lebhaftes und konstruktives Diskutieren während des Entstehungsprozesses. Gemeinsam profitierten sie von inspirierenden Impulsen und Vorträgen von Gaby-Fleur Böhl (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit), Hans-Georg Frede (Mitglied BBAW, Universität Gießen), Cornelia Rauh (Technische Universität Berlin) und Andreas Römpp (Universität Bayreuth). Die Autor:innen sind zudem zwei Gutachtern und dem Präsidium der BBAW für wertvolle Verbesserungsvorschläge zu einer ersten Fassung dieses Beitrags sehr dankbar. Nicht zuletzt danken sie Ute Tintemann (BBAW) für kritisches Lektorat und umsichtige Redaktion sowie Emil von Lossow für umfassende Textredaktion.

Mit dem vorliegenden „Denkanstoß“ werden Perspektiven aufgezeigt, die ein sozial gerechtes, nachhaltiges, widerstandsfähiges und ressourcenschonendes Agrar- und Ernährungssystem ermöglichen können, das Ernährungssicherheit für alle gewährleistet, zu einer gesundheitsförderlichen Ernährung beiträgt und gleichzeitig innerhalb der planetaren Belastungsgrenzen operiert.

---

5 Unter anderem WBAE. 2020. <https://www.bmel.de/DE/ministerium/organisation/beiraete/agr-veroeffentlichungen.html>, Bürgerrat „Ernährung im Wandel“. 2024. <https://dserver.bundestag.de/btd/20/103/2010300.pdf>, FAO. 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0959en>, OECD-FAO. 2025. [https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034\\_601276cd-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034_601276cd-en.html)

6 WR. 2024. [https://www.wissenschaftsrat.de/download/2024/1956-24.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.wissenschaftsrat.de/download/2024/1956-24.pdf?__blob=publicationFile&v=6)

Erklärungen von Fachbegriffen sind im Glossar zu finden.

# 1 Globale Herausforderungen der Nahrungsmittelproduktion

## 1.1 Welternährung im Wandel

### 1.1.1 Aktuelle Situation und Trends

Die globale Verbrauchsnachfrage nach Nahrungsmitteln ist, gemessen in absolutem Energiebedarf (Kalorien), in den letzten 60 Jahren um das Dreifache gestiegen.<sup>7</sup> Der wichtigste Treiber hierfür ist das Wachstum der Bevölkerung, welche in diesem Zeitraum von 3 auf 8 Mrd. Menschen wuchs.<sup>8</sup> Der Anstieg des Pro-Kopf-Konsums hingegen verlangsamt sich allmählich. Der verbliebene Anstieg kann maßgeblich durch (i) eine erhöhte Nahrungsmittelverschwendung in Haushalten, (ii) einen Anstieg des Body-Maß-Indexes sowie (iii) einen gestiegenen biophysischen Nahrungsbedarf (durch veränderte demografische Bevölkerungszusammensetzung und steigende Körpergrößen) erklärt werden (Bodirsky et al. 2020).

Die **Nahrungsmittelverschwendung** in Haushalten ist insbesondere in Ländern mit mittleren und hohen Einkommen erheblich, jedoch aufgrund einer unvollständigen Datenlage nicht exakt bezifferbar (Xue et al. 2017). Werden jedoch die verfügbaren Kalorien mit dem plausiblen Energieverbrauch der Weltbevölkerung verglichen, ergibt sich eine Schätzung, dass weltweit 15 bis 20 % der für Haushalte verfügbaren Lebensmittel nicht von Menschen verzehrt werden (Hic et al. 2016; Bodirsky et al. 2020).

Mit dem kontinuierlichen Anstieg der Gesamtmenge der Nahrungsmittelnachfrage hat sich auch die Zusammensetzung der konsumierten Nahrung grundlegend verändert. Mit steigendem Durchschnittseinkommen eines Landes steigt der Anteil an tierischen Produkten, verarbeiteten Lebensmitteln und anfänglich auch an

---

7 FAOSTAT. 2025. <https://www.fao.org/faostat/en/#data>

8 World Bank. 2024. <http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>

Obst und Gemüse, wohingegen insbesondere der Konsum von Hülsenfrüchten und stärkehaltigen Knollen zurückgeht (Popkin 2001; Bodirsky et al. 2020). Mit der **Veränderung der nachgefragten Nahrungsmittelmenge und -zusammensetzung** geht eine Veränderung der Ernährungsumgebung einher. Gleichzeitig senken die zunehmende Urbanisierung und Motorisierung die physische Aktivität der Menschen. Die Ausweitung der Erwerbsarbeit und die Zurückdrängung der haushalts-internen Fürsorgearbeit minimiert die Zeit, die Menschen mit der Zubereitung und Einnahme von Mahlzeiten verbringen, und steigert den Konsum von verarbeiteten Nahrungsmitteln. Auch unsere Lebenserwartung steigt global durch eine verbesserte medizinische Versorgung. All dies hat Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit (Grune et al. 2025).

In den letzten Jahrzehnten ließ sich weltweit ein Rückgang des Bevölkerungsanteils mit **Untergewicht** feststellen, welcher vor allem auf den rapiden ökonomischen Aufstieg Chinas zurückgeht. In absoluten Zahlen blieb die Anzahl der untergewichtigen Menschen aufgrund des Bevölkerungswachstums global jedoch weitgehend konstant (NCD-RisC 2016a). Seit 2015 ist jedoch wieder ein rapider Anstieg an Unterernährung zu verzeichnen, welcher durch die COVID-19-Pandemie und den Ukrainekrieg weiter befeuert wurde.<sup>9</sup> Der Anteil der Kinder mit ernährungsmitbedingten Wachstumsstörungen sinkt; die durchschnittliche Körpergröße steigt weiter an (NCD-RisC 2016b). In den letzten Jahren hat sich dieser Trend jedoch stark verlangsamt.<sup>10</sup> Die geschätzte frühzeitige Sterblichkeit durch Unterernährung und Überernährung sind im Ausmaß vergleichbar,<sup>11</sup> jedoch steigt die Gesundheitslast durch Überernährung aktuell viel stärker an. Der Anstieg von Übergewicht und Adipositas ist in allen Ländern der Welt ungebrochen, selbst in Industrieländern, in denen sich die Nahrungsmittelzusammensetzung nicht mehr nennenswert ändert.<sup>12</sup>

In Fachkreisen wird die systematische Veränderung der Nahrungsmittelzusammensetzung, welche mit einer Veränderung der Ernährungsumgebung, den gesundheitlichen Folgen, der Modernisierung der Produktionskette sowie mit steigenden Umweltfolgen einhergeht, als „Nutrition Transition“ (dt. „**Wandel der Ernährungssysteme**“) bezeichnet. Für die zukünftige Entwicklung können unterschiedliche Szenarien modelliert werden: Zum einen könnte sich der beobachtete

---

9 SOFI. 2024. <https://www.fao.org/interactive/state-of-food-security-nutrition/en/>

10 FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0639en>

11 Global Burden of Diseases study. 2021. <https://ghdx.healthdata.org/gbd-2021>

12 WHO. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>

„Wandel der Ernährungssysteme“ weiter fortsetzen, indem immer mehr Länder die bisherigen Stadien des Wandels durchlaufen, während sie von einem Niedrig- zu einem Hoheinkommensland aufsteigen. Zum anderen gibt es auch transformative Szenarien, die eine Umstellung hin zu einer gesundheitsförderlichen und umweltfreundlichen Ernährung durchdenken („Ernährungswende“). Bei einer Fortsetzung der bisherigen Trends und Dynamiken wird erwartet, dass sich die Ernährungsmuster in Hoheinkommensländern stabilisieren, während sich insbesondere in niedrigen und mittleren Einkommensländern der Wandel der Ernährungssysteme rasch fortsetzt. Darauf folgt eine kontinuierliche aber langsame Reduktion der Unterernährung, wohingegen Adipositas und andere ernährungsmitbedingte Erkrankungen weltweit weiter stark ansteigen werden (Levy et al. 2011; Bodirsky et al. 2020; Okunogbe et al. 2022).

Ist ein Wandel hin zu einer gesunden und nachhaltigen Ernährung weltweit angestrebt, müsste sich die Ernährung einer breiten Bevölkerung grundlegend verändern, zum Beispiel hin zur planetaren Gesundheitsernährung (engl. „**Planetary Health Diet**“; Willett et al. 2019). Diese würde zu einer starken Reduktion von Unterernährung und ernährungsmitbedingter Krankheiten führen (Willett et al. 2019; Bodirsky et al. 2023). Um diese Umstellung zu ermöglichen, wäre in den ärmsten Ländern der Welt sowie bei den ärmsten Bevölkerungsgruppen innerhalb von Ländern mit mittleren Einkommen auch ein Einkommenstransfer, d. h. eine staatlich gesteuerte Umverteilungspolitik, notwendig (Hirvonen et al. 2020; Springmann et al. 2021). Bisher ist jedoch unklar, wie schnell dadurch das Auftreten ernährungsmitbedingter Erkrankungen gesenkt werden kann. Zudem haben die Menschen Denkmuster und Verhaltensweisen entwickelt, die eine Transformation erschweren können, wie die Arbeitsgruppe in Denkanstoß 18 zu „Ernährung und Gesundheit“ (Grune et al. 2025) dargelegt hat. Aktuell beschäftigt sich die Forschung damit, wie eine umfassende Ernährungswende effizient durch Politikinstrumente unterstützt werden kann (Levy et al. 2011; Afshin et al. 2017; Nugent et al. 2023).

### 1.1.2 Historische Entwicklung und Zukunftsperspektiven

Die globale Agrarproduktion bedient verschiedene Nachfragen. Neben der oben diskutierten Verbrauchsnachfrage nach Lebensmitteln gibt es auch eine Nachfrage nach Materialien (beispielsweise Baumwolle, Flachs, Stärke, Alkohol, Öl, Stroh), Bioenergie (beispielsweise Ethanol, Biodiesel, Biogas, traditionelle Brennstoffe wie Dung) oder Zwischenprodukten wie Futtermittel und Saatgut. Verluste in der Produktionskette, beispielsweise durch unzureichende Lagerung oder Kühlung, erfordern ebenfalls eine erhöhte Produktion.

Um eine steigende Nachfrage zu bedienen, bestehen verschiedene Möglichkeiten:

- Die **Ertragssteigerungen auf der Fläche** waren historisch am bedeutendsten. Diese Ertragssteigerungen erfolgten zum einen durch eine effizientere Ausnutzung des Ertragspotentials durch angepasste Düngung, eine Bekämpfung von Unkräutern, Schädlingen und Krankheiten sowie durch Bewässerung. Perspektivisch und in manchen Ländern bereits praktiziert, können Ertragssteigerungen auch durch die Steigerung des Ertragspotentials mittels neuer Züchtungen erreicht werden (siehe Kapitel 3.4.1). Es gibt auch systemische Formen der Ertragssteigerungen wie den Agrarhandel. Dieser erlaubt es, Ackerfrüchte auf besonders geeigneten Standorten (sogenannten Gunststandorten) anzubauen und damit höhere Erträge zu erreichen, oder den Wechsel zu anderen Feldfrüchten mit höherem Ertragspotential (beispielsweise von der Zuckerrübe zum Zuckerrohr).
- Die **Ausdehnung der Ackerflächen** um circa 17% in den letzten 60 Jahren hat einen weit geringeren Beitrag zur Produktionssteigerung geliefert als erhofft, sogar unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Gunststandorte im Regelfall zuerst bewirtschaftet wurden. Eine Möglichkeit, die bewirtschaftete Fläche zu vergrößern, ohne die physische Fläche auszudehnen, ist der Anbau von Zwischenfrüchten sowie die Mehrfachernte, bei der Pflanzen mehrfach geerntet werden können, indem sie nur teilweise geerntet und ein Nachwachsen zugelassen werden. In weiten Teilen der Welt können so mehrere Ernten im Jahr eingefahren werden. Durch den Klimawandel weitet sich die Potentialfläche dafür weiter in den Norden aus. Je nach klimatischer Bedingung muss die Mehrfachernte jedoch in der Trockenzeit bewässert werden.
- Auch eine **Senkung der Nachfrage** ist eine mögliche Strategie. Durch effizientere Haltung, Fütterung und Züchtung von Nutztieren konnte die Energieeffizienz der Tierproduktion bereits erheblich gesteigert werden (Smil 2000; Smil 2013). Gleichzeitig ging die Intensivierung der Tierhaltung mit einer Veränderung der Futterzusammensetzung einher, welche insbesondere Produkte mit höherer Nährstoffdichte und hoher Produkthomogenität benötigt (Herrero et al. 2013). Dies bedeutet, dass der Anteil an Weidegras und Reststoffen am globalen Futtermix ab- und der Anteil an Getreide und proteinreichem Ölkuchen (d. h. Pressrückstände aus der Speiseölproduktion) zunimmt (Weindl et al. 2017).

Die Senkung von Nahrungsmittelverlusten in der Produktionskette könnte durch bessere Lagerung und die Etablierung von Kühlketten erreicht werden. Nicht zuletzt haben auch Konsumierende die Möglichkeit, Produktion und Nachfrage besser in Einklang zu bringen, indem der Anteil von Haushalten verschwendeten

Nahrungsmitteln erheblich reduziert wird oder indem insbesondere der Anteil an tierischen Nahrungsmitteln reduziert und so die hohe Nachfrage nach Futtermitteln gesenkt wird.

Lange Zeit war die Steigerung der Agrarproduktion das Leitparadigma der Agrarpolitik (Feindt 2018). In den letzten Jahrzehnten zeichnete sich diesbezüglich ein **Paradigmenwechsel** ab:

- Neben der Steigerung der Produktion wird auch eine Senkung der Nachfrage in Betracht gezogen.
- Neben der Quantität der Nahrungsmittelproduktion rückt auch die Qualität mehr in den Mittelpunkt. Letztere betrifft die Nahrungsmittelsicherheit und den Nährwert von Lebensmitteln („nutrition security“ anstatt „food security“), insbesondere im Hinblick darauf, dass Fehl- und Mangelernährung in Industrieländern eine ähnlich verheerende Wirkung auf die menschliche Gesundheit haben können wie Unterernährung in Schwellen- und Entwicklungsländern.
- Eine Ausweitung der Produktion allein reicht nicht aus, um Hunger zu bekämpfen, da Nahrungsmittelunsicherheit oft mit niedrigem Einkommen einhergeht sowie mit einer Ernährungsumgebung, welche in einigen Ländern durch gewaltsame Konflikte oder Naturkatastrophen beeinflusst ist.
- Neben der Ernährungssicherung sind auch die Reduktion von Fehlernährung, die Reduktion der Umweltverschmutzung, das Tierwohl sowie die Wirtschafts- und Sozialpolitik essenziell.

## 1.2 Landwirtschaft und Umwelt

### 1.2.1 Produktivität

Sich in den letzten Jahrzehnten verstärkende Trends in der Landwirtschaft umfassen das Wachstum von Betriebsgrößen, den Rückgang der Anzahl an Betrieben und ein Anstieg der Produktivität („**Strukturwandel**“).

Durch Fortschritte in Produktion, Technik und Arbeitsorganisation durchlebte die Landwirtschaft im letzten Jahrhundert sehr große Veränderungen. Diese sind mit außerordentlichen Produktivitätssteigerungen der pflanzlichen und tierischen

Produktion eng verknüpft. So haben Technologiefortschritte beispielsweise in der Züchtung und verbesserter Pflanzenschutz zu erheblichen Ertragssteigerungen in der Pflanzenproduktion geführt. Ebenso sind enorme Steigerungen in der Tierproduktion zu verzeichnen. Beispielsweise lag die jährliche Milchleistung pro Kuh um 1900 bei ca. 2.000 kg. Heute liefert eine Kuh, vor allem als Ergebnis von Züchtung, durchschnittlich 8.000 kg (Aeikens 2023).

Intensiv diskutierte Fragen lauten: Was ist perspektivisch weiter möglich? Zahlen wir als Gesellschaft und/oder die Landwirt:innen einen Preis als Ausgleich für diese Steigerungen? Gibt es Grenzen dieser Entwicklung? Bei der Suche nach Antworten geht es, neben ökonomischen Kriterien, auch um eine Bewertung der Einflüsse auf die Umwelt, um Fragen des Tierwohls aber auch um Auswirkungen auf die Gestaltung der ländlichen Räume. Relevante Aspekte des engen Wechselverhältnisses von Landwirtschaft und Umwelt werden im Folgenden genauer betrachtet.

### 1.2.2 Bodenfunktionen und Bodendegradation

Böden sind eine wesentliche Grundlage für das Leben auf der Erde und erfüllen eine Vielzahl an ökologischen und gesellschaftlichen Funktionen. Sie regulieren Klima-, Wasser- und Nährstoffkreisläufe, sind Lebensraum für Flora, Fauna und Mensch, bewahren die Natur- und Kulturgeschichte, und ihre Qualität bestimmt die Produktivität der agrarischen Landnutzung (Adhikari & Hartemink 2016; Jónsson & Davíðsdóttir 2016; Jost et al. 2021). Dementsprechend unterscheidet in Deutschland das nationale Bundesbodenschutzgesetz<sup>13</sup> drei Bodenfunktionen: (i) die natürlichen Funktionen, (ii) die Funktionen als Archiv für Natur- und Kulturgeschichte und (iii) die Nutzungsfunktionen. Allerdings stehen Böden und ihre Funktionen zunehmend unter Druck, vor allem wegen des Anstiegs der globalen Nachfrage nach Lebensmitteln und Rohstoffen und aufgrund des Klimawandels (Kopittke et al. 2019). Weltweit gelten circa 33% der Böden als moderat bis stark degradiert – eine Folge insbesondere von Bodenerosion, -versalzung, -verdichtung, -versauerung und chemischer Verunreinigung.<sup>14</sup>

---

<sup>13</sup> BBodSchG §2. [https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/\\_2.html](https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/_2.html)

<sup>14</sup> FAO & ITPS. 2015. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content>

Die **Bodenerosion** auf landwirtschaftlichen Nutzflächen wird derzeit 10 bis 100 mal höher als die Bodenneubildungsrate geschätzt.<sup>15</sup> Dies wird durch den Klimawandel voraussichtlich noch verstärkt (Borrelli et al. 2020; Eekhout & de Vente 2022). Bodenkonservierende Maßnahmen und Politikinstrumente hingegen können dämpfend auf die Bodenerosion wirken (Mitter et al. 2014; Eekhout & de Vente 2022). Beispielsweise zeigen Panagos et al. (2015), dass die Standards für einen guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU und die thematische Strategie für den Bodenschutz<sup>16</sup> im Verlauf eines Jahrzehnts die Bodenverlustrate im Durchschnitt um knapp 10 % reduziert haben.

Bei der **Bodenversalzung** liegt das Hauptaugenmerk auf steigenden Salzgehalten im Boden als Folge von menschlichen Aktivitäten wie beispielsweise unsachgemäßer landwirtschaftlicher Bewässerung.<sup>17</sup> Als Auswirkung des Klimawandels können insbesondere steigende Temperaturen in Kombination mit Dürreereignissen zu erhöhten Salzkonzentrationen im Boden sowie der steigende Meeresspiegel zu erhöhten Salzkonzentrationen im Grundwasser führen. In Deutschland ist die Bodenversalzung in ausgewählten Regionen ein moderates bis schwerwiegendes Problem (Daliakopoulos et al. 2016).

**Bodenverdichtung** (die Abnahme von Hohlräumen zwischen Bodenpartikeln) erschwert die Durchwurzelung des Bodens, schränkt den Wasser- und Gasaustausch ein und verstärkt den Oberflächenabfluss. Sie kann insbesondere durch den Einsatz von Maschinen in der Land- und Forstwirtschaft, durch Viehtritt oder durch einseitige Fruchtfolgen entstehen (Raich et al. 2024). Die Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum, die Ernteerträge und die damit verbundene Ernährungssicherheit sind aktuell schwer zu beurteilen.<sup>18</sup>

**Bodenversauerung** durch menschliche Aktivität ist insbesondere auf die übermäßige oder ineffiziente Ausbringung von Düngemitteln auf Ammoniumbasis in intensiv bewirtschafteten agrarischen Produktionsgebieten zurückzuführen (siehe Kapitel 1.2.6). In Europa stellt die Bodenversauerung bisher nur in wenigen

---

15 IPCC. 2022. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_Full-Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Full-Report.pdf)

16 KOM(2006)231. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0231>

17 FAO & ITPS. 2015. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content>

18 FAO & ITPS. 2015. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content>

Gebieten ein Problem dar.<sup>19</sup> Dies könnte aber in den nächsten Jahrzehnten aufgrund des anhaltend hohen Düngemittleinsatzes deutlich problematischer werden (Zamanian et al. 2024).

**Bodenverunreinigungen** gehen im Allgemeinen von industriellen Aktivitäten, inadäquater Entsorgung von Abfällen, Bergbau, Unfällen oder Ähnlichem aus. In Europa beträgt die Zahl der Standorte, an denen potenziell umweltschädliche Aktivitäten stattgefunden haben, etwa 3 Mio.<sup>20</sup> Diese Zahl könnte sich durch Verbesserungen bei der Datenerfassung weiter erhöhen. Zudem wird bei der Bodenverunreinigung von einem weiterhin steigenden Trend ausgegangen, insbesondere wenn die aktuelle gesetzliche Ausgangslage unverändert bleibt (van Liederkerke et al. 2014).

### 1.2.3 Biodiversität und Landnutzung

Da die Gesellschaft, insbesondere in reichen Ländern, von der Landwirtschaft erwartet, neben der Bereitstellung von Nahrung und nachwachsenden Rohstoffen, auch zum Schutz der Biodiversität beizutragen, kann es auf den ersten Blick sinnvoll erscheinen, auf heimischen Ertrag zugunsten von Biodiversitätserhalt zu verzichten, wie dies unter anderem im Rahmen des Green Deals der EU<sup>21</sup> vorgesehen ist. Die in Tabelle 1 zusammengefassten Ergebnisse einer Modellrechnung für Deutschland zeigen beispielhaft, dass Maßnahmen, die vorgeblich darauf abzielen, die heimische Biodiversität zu fördern, letztlich auch das Gegenteil von dem bewirken können, was eigentlich damit erreicht werden sollte. Der Grund hierfür ist, dass ein Rückgang der heimischen Produktion zu einer zusätzlichen Ausdehnung der weltweiten Agrarflächen führt. Hierdurch können natürliche Lebensräume und deren Biodiversität in anderen Teilen der Welt verloren gehen und die dadurch verursachten Klimagasemissionen größer sein als die eingesparten heimischen Emissionen.

---

19 FAO & ITPS. 2015. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content>

20 FAO & ITPS. 2015. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content>

21 Der europäische Green Deal. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_de](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de)

**Tabelle 1:** Anteil der Biodiversität in Deutschland unter alternativen Politikszena-  
rien im Vergleich zu 100 % moderner Landwirtschaft (nach Noleppa 2017).

Politikalternative	100 % Ökolandbau	50 % Landbau, 50 % Stilllegung
Globaler Verlust natürlicher Lebensräume (Mio. ha)	6,5	6,5
Zusätzliche CO <sub>2</sub> e Emissionen (Mrd. t)	1,1	1,1
Veränderung der Biodiversität (Mio. Indexpunkte)	+228	+516

In Tabelle 1 sind zwei alternative Berechnungen dargestellt, die die moderne Landwirtschaft in Deutschland mit alternativen Landnutzungskonzepten vergleichen, welche sich durch eine geringere heimische Produktion auszeichnen. Die Vergleiche beziehen sich auf den globalen Verlust an natürlichen Lebensräumen, auf Klimagasemissionen und auf Biodiversität (Noleppa 2017). Laut dieser Studie halbiert ein Übergang zu 100 % Ökolandwirtschaft die Flächenenerträge und führt über den Mechanismus der indirekten Landnutzungsänderung zu einem weltweiten Verlust an natürlichen Lebensräumen in Höhe von 6,5 Mio. ha und zu Klimagasemissionen in Höhe von 1,1 Mrd. CO<sub>2</sub>e (Noleppa 2017). Dieselben Effekte könnten erzielt werden, wenn in Deutschland 50 % der Ackerfläche stillgelegt würde und auf der anderen Hälfte weiter nicht-ökologischer Landbau betrieben würde (Noleppa 2017). Der Gewinn an heimischer Biodiversität wäre mehr als doppelt so hoch (Tabelle 1). Dies zeigt, dass es Flächen gibt, die sich bevorzugt für den Erhalt von Biodiversität eignen und Flächen, auf denen bevorzugt Agrargüter erwirtschaftet werden sollten (Beyer et al. 2022). Bei dem Versuch, beides auf ein und derselben Fläche bereitzustellen, entstünden beiderseits Verluste. Landwirtschaft beinhaltet, dass die natürlich vorkommende Flora und Fauna zugunsten von Nutzpflanzen verändert wird. Je besser dies gelingt, desto mehr natürliche Lebensräume und Biodiversität können im Inland und weltweit erhalten werden.

## 1.2.4 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Landwirtschaft

Die Landwirtschaft und die mit ihr verbundenen Wirtschaftsbereiche repräsentieren nach wie vor einen weltweit bedeutsamen Wirtschaftskomplex. Nahezu ein Drittel der Arbeitskräfte in der Welt sind mit der Herstellung landwirtschaftlicher Rohstoffe beschäftigt. Gleichzeitig trägt die Landwirtschaft erheblich zum Klimawandel bei: Bei alleiniger Betrachtung des Sektors Landwirtschaft zeigt sich, dass dieser der größte Verursacher der Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) ist.<sup>22</sup> Drei Quellen landwirtschaftlicher Treibhausgasemissionen sind von besonderer Bedeutung:

- **Direkte Emissionen auf den bewirtschafteten Flächen:** Das Intergovernmental Panel on Climate Change berechnet, dass die mit landwirtschaftlicher Bodennutzung verbundenen weltweiten Treibhausgasemissionen bei  $6,2 \pm 1,4$  Mrd. t CO<sub>2</sub>e (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) liegen.<sup>23</sup>
- **Flächenausdehnungen:** Diese verursachen jährlich zusätzlich noch  $4,9 \pm 2,5$  Mrd. t CO<sub>2</sub>e. Damit betragen die gesamten jährlichen Emissionen der agrarischen Landnutzung jährlich 11,1 Mrd. t CO<sub>2</sub>e. Das entspricht 23 % der gesamten jährlichen anthropogenen (vom Menschen verursachten) Emissionen von CO<sub>2</sub>e. Je Hektar Ackerfläche entspricht dies knapp 4 t. Für Deutschland liegen die Schätzungen der direkten Emissionen in der gleichen Größenordnung. Insgesamt emittierte die deutsche Landwirtschaft im Jahr 2021 rund 55 Mio. t CO<sub>2</sub>e, was 7,4 % der nationalen Treibhausgase entspricht.<sup>24</sup> Weitere 43 Mio. t CO<sub>2</sub>e werden durch landwirtschaftlich genutzte trockengelegte Moore verursacht. Insgesamt werden so 98 Mio. t CO<sub>2</sub>e (13,1 %) durch die Landwirtschaft verursacht.<sup>25</sup> Die jährliche Ausdehnung der weltweiten Ackerfläche liegt derzeit bei etwa 6 Mio. ha. Dies entspricht der Hälfte der Ackerfläche Deutschlands. Jeder Hektar Ausdehnung der Ackerfläche führt zu Emissionen von durchschnittlich etwa 600 t CO<sub>2</sub>e im Jahr der Landnutzungsänderung plus danach 4 t CO<sub>2</sub>e auf

---

22 FAO. 2020. <http://www.fao.org/3/cb3808en/cb3808en.pdf>

23 IPCC. 2019. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>

24 UBA. 2023. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/28\\_2023\\_cc\\_berichterstattung\\_unter\\_der\\_klimarahmenkonvention.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/28_2023_cc_berichterstattung_unter_der_klimarahmenkonvention.pdf)

25 UBA. 2025. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/landwirtschaft/landwirtschaft-umweltfreundlich-gestalten/klimaschutz-in-der-landwirtschaft#weitere-emissionen-der-landwirtschaft>, Leopoldina. 2024. [https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale\\_Empfehlungen/2024-06-27\\_Leopoldina\\_Stellungnahme\\_Moore\\_und\\_Auen\\_Web.pdf](https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Nationale_Empfehlungen/2024-06-27_Leopoldina_Stellungnahme_Moore_und_Auen_Web.pdf)

den ausgedehnten Flächen. Die Kosten für die Weltgemeinschaft betragen circa 200 € je t CO<sub>2</sub>e.

- **Nutztierhaltung:** Sie steht häufig im Zentrum kontroverser öffentlicher Debatten. Einerseits liefern die Exkrementa der Nutztierhaltung sogenannte Wirtschaftsdünger, die entsprechend des Kreislaufkonzepts von Albrecht Thaer und dem derzeitigen Konzept des Ökologischen Landbaus zur Sicherung der Erträge von Nutzpflanzen beitragen können. Andererseits ist die Nutztierhaltung für einen erheblichen Teil der negativen Umweltwirkungen des Agrar- und Ernährungssystems verantwortlich, beispielsweise durch Verdauungsgase. Unter anderem hat die Konzentration der Nutztierhaltung in manchen Regionen der EU und Deutschlands zu einem unerwünscht hohen Eintrag von Pflanzennährstoffen in Oberflächen- und Grundwasser geführt. Die mehrmalige Verschärfung der EU-Düngeverordnung<sup>26</sup> und neue Methoden der Analyse des Nährstoffgehalts der Wirtschaftsdünger sollen dies eingedämmt haben. Allerdings wird sich aufgrund der langsamen Fließgeschwindigkeit der Grundwasserkörper diese Verschärfung erst mit einer Verzögerung von 10 bis 20 Jahren auf die Oberflächengewässer auswirken. Von großer Bedeutung für die Vermeidung von Überdüngung mit organischen Wirtschaftsdüngern ist die deutliche Verteuerung von Mineraldüngern. Wirtschaftsdünger besitzen einen wachsenden ökonomischen Wert für die Landwirtschaft in Ackerbaustandorten, sodass anfallende Überschüsse in Regionen mit ausgeprägter Nutztierhaltung nunmehr durch den sich entwickelnden Markt für Wirtschaftsdünger auch in Ackerbauregionen abfließen, die sich in größerer Entfernung der Zentren der Nutztierproduktion befinden.

---

26 Verordnung (EG) Nr. 2019/1009. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1009>

### 1.2.5 Agrochemie

Die Agrochemie ist ein intensiv bearbeiteter Forschungs- und Entwicklungszweig der Chemie, der eng und in großem Maßstab mit industrieller Produktion verknüpft ist. Wesentliche Bereiche der Agrochemie zielen auf Düngung, Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, Pflanzenschutz und Schädlingsabwehr, Tiergesundheit und Tierernährung ab. Hauptprodukte umfassen eine große Palette an mineralischen Düngemitteln sowie Herbizide, Insektizide, Molluskizide, Fungizide und auch Beizen.

Durch die wachsende Weltbevölkerung steigt global der Bedarf an Nahrungsmitteln. Weitgehend akzeptiert ist, dass aufgrund der parallel geringer werdenden Anbauflächen die erforderliche Nahrungsmittelproduktion ohne Agrochemikalien derzeit nicht sichergestellt werden kann. Allerdings sind gegenwärtig sowohl die Herstellung als auch der Einsatz agrochemischer Produkte in vielen Bereichen unvereinbar mit Nachhaltigkeit und ökologischer Landwirtschaft. Unbestritten ist jedoch, dass der gezielte und wohldosierte Einsatz moderner Agrochemikalien helfen kann, Ernteaufträge zu vermeiden und so grundsätzlich zur Ernährungssicherheit beizutragen.

Die Problematik der Bereitstellung von ausreichend Nahrungsmitteln wird durch die gegenwärtig angespannte politische Lage, beispielsweise durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine, nachdrücklich verdeutlicht. Zweifelsfrei ist eine schnelle Radikalabkehr von jetzigen Praktiken in der Herstellung von Agrochemikalien kurzfristig kaum realisierbar.

Aktuelle und positiv zu bewertende Trends im Bereich der Agrochemie sind ein zunehmender Einsatz von biotechnologischen Verfahren, die Entwicklung gentechnischer veränderter Pflanzen sowie eine langsam einziehende verbesserte Digitalisierung und die Nutzung von Künstlicher Intelligenz. Es muss unser Ziel sein, mit neu zu entwickelnden und zu implementierenden Konzepten die durch Agrochemikalien verursachten Schäden an Mensch, Natur und Umwelt zu vermeiden oder zumindest gering zu halten. Die Akzeptanz neuer Konzepte durch die Landwirt:innen spielt hier eine wesentliche Rolle.

### 1.2.6 Stickstoff

**Reaktiver Stickstoff** (d. h. alle Formen von Stickstoff außer unreaktivem  $N_2$ ) ist ein essenzieller Nährstoff für das Wachstum von Pflanzen und in Form von Protein auch lebenswichtig für die Ernährung von Tier und Mensch. Aufgrund der hohen Energiedichte war er in natürlichen Systemen und in der vorindustriellen Landwirtschaft stets knapp, weshalb Ökosysteme und landwirtschaftliche Systeme eine Vielzahl von Mechanismen entwickelt haben, um den wenigen Stickstoff effizient zu nutzen und wiederzuverwerten. Durch die industrielle Revolution, insbesondere die Entwicklung der Haber-Bosch-Synthese zur Fixierung von reaktivem Ammoniak ( $NH_3$ ) aus unreaktivem  $N_2$  der Atmosphäre, ist es der industriellen Landwirtschaft jedoch gelungen, diese Knappheit zu überwinden. Dadurch konnten in der „Grünen Revolution“ die Erträge im Pflanzenbau massiv gesteigert und eine Ernährung mit großen Mengen an tierischem Protein ermöglicht werden. Ein unerwünschter Nebeneffekt ist jedoch, dass nicht der gesamte eingesetzte Dünger von Pflanzen, sondern global nur circa 50 % des Düngers in die Pflanze aufgenommen werden (Lassaletta et al. 2014). In Deutschland sind es circa 65 %, bedingt durch eine überdurchschnittliche Düngemittelleffizienz (Häußermann et al. 2019). Darüber hinaus gehen auch große Mengen an Stickstoff im Stall und bei der Lagerung von Gülle verloren, und der Stickstoff, der konsumiert wurde, wird anschließend im Abwasser oder in Lebensmittelabfällen freigesetzt. So ist die Landwirtschaft heute zur größten terrestrischen Quelle von reaktivem Stickstoff im Erdsystem geworden – weit vor anderen Quellen wie die natürliche biologische Stickstofffixierung oder die Verbrennung fossiler Brennstoffe.

Der **natürliche terrestrische Stickstoffkreislauf** wurde damit vervielfacht. Dies verursacht eine ganze Reihe von Umweltproblemen im Wasser, in den Böden sowie in der Luft und der Atmosphäre (Sutton et al. 2011). Im Trinkwasser ist er gesundheitsgefährdend und verteuert erheblich die Gewinnung von sauberem Grundwasser (Oehlmann et al. 2017). In Kombination mit anderen Nährstoffen wie Phosphor (P) führt Stickstoff in Oberflächengewässern zur Eutrophierung (d. h. zu einer übermäßigen Anreicherung von Nährstoffen), was bis hin zum Kollaps der Ökosysteme (das „Umkippen“) führen kann. Besonders betroffen ist die Ostsee, welche aufgrund von geringem Wasseraustausch mit den Ozeanen die landwirtschaftlichen Nährstoffe der Anrainerstaaten akkumuliert. Sie weist bereits große anoxische (sauerstofffreie) Zonen auf. Derartig beeinträchtigt, können Ökosystemdienstleistungen für Fischfang und Tourismus entfallen und die Lebensqualität der Bürger:innen geschmälert werden.

Durch **atmosphärische Deposition** (d. h. Stoffablagerung aus der Atmosphäre auf der Erdoberfläche) von Stickstoff werden auch nicht landwirtschaftlich genutzte Böden indirekt gedüngt. Diese Düngung zieht negative Effekte nach sich, wie beispielsweise eine Versauerung der Böden und die Auswaschung von Schwermetallen oder der Abbau des Feinwurzelsystems von Ökosystemen. Auch terrestrische Ökosysteme mit Lebewesen, die auf eine geringe Verfügbarkeit von Stickstoff spezialisiert sind, werden durch die hohen Stickstoffeinträge massiv vereinfacht. Dies geht beispielsweise mit der Reduktion der Artenvielfalt in Wiesen einher. Als positiver Nebeneffekt steigt durch die indirekte Düngung die überirdische Biomasseproduktion in der Forstwirtschaft.

In der Landwirtschaft wird reaktiver Stickstoff vor allem als Ammoniak aus Düngung und Güllelagerung in die Luft emittiert, außerdem als klimaschädliches Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Bei der Düngung entstehen zudem Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ). Durch Ammoniak und Stickoxide wird die Entstehung von Feinstaub begünstigt, welcher hoch gesundheitsschädlich ist. Alleine für Deutschland liegen die geschätzten frühzeitigen Todesfälle durch verschmutzte Außenluft bei 34.000 Menschen pro Jahr, wobei circa 45 % der Fälle auf die Landwirtschaft zurückgehen (Lelieveld et al. 2015). In der Luft verursacht er auch die Korrosion von Materialien und damit erhöhte Abschreibungen und Instandhaltungskosten bei Bauwerken. Schließlich katalysieren Stickoxide die Bildung von bodennahem Ozon, welches sowohl Gesundheitsschäden als auch landwirtschaftliche Ertragseinbußen verursacht. Auch in der Atmosphäre verändert er das Klima und die Ozonschicht. Seit der erfolgreichen Reduktion der FCKW-Stoffe ist  $\text{N}_2\text{O}$  der wichtigste verbleibende Schadstoff (Ravishankara et al. 2009), der als Katalysator zur Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht beiträgt. Mit dem Klima hat der Stickstoffkreislauf verschiedene sowohl wärmende als auch kühlende Interaktionen (Butterbach-Bahl et al. 2011): Lachgas ist neben Kohlendioxyd ( $\text{CO}_2$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ) eines der drei wichtigsten Treibhausgase, welches eine  $\text{CO}_2$ -Äquivalenz von 273 über hundert Jahre sowie eine Lebensdauer von über 100 Jahren in der Atmosphäre hat.<sup>27</sup> Stickoxide und das von ihnen verursachte Ozon wiederum zerstören Methan in der Atmosphäre und wirken kühlend. Auch Feinstaub hat eine kühlende Wirkung. Schließlich führt der indirekte Düngungseffekt in der Biosphäre zur Bindung von  $\text{CO}_2$  und somit zur Abkühlung. Der Netto-Effekt ist aktuell kühlend (Erismann et al. 2011). Dieser dürfte jedoch durch die lange Lebensdauer von  $\text{N}_2\text{O}$  sowie die saturierenden Kohlenstoffsenker in Zukunft erwärmend wirken.

---

27 IPCC. 2021. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

Da reaktiver Stickstoff sowohl gasförmig in der Luft über hunderte von Kilometern transportiert werden kann, als auch wasserlöslich ist und über Flüsse bis in die Meere gelangt, sind von der Veränderung des Stickstoffkreislaufs alle Teile des Erdsystems betroffen. Durch das räumliche Auseinanderfallen von Emissionsquelle und Umweltverschmutzung gehört die Stickstoffverschmutzung zu externen Kosten, für welche die handelnden Akteur:innen nur geringe ökonomische Folgen tragen. Dies stellt ein klassisches Marktversagen dar.

Maßnahmen zur **Reduzierung der Stickstoffverschmutzung** setzen an verschiedenen Punkten des Stickstoffkreislaufs an: Der Erhöhung der Düngeeffizienz, der Reduktion der Verluste in den Ställen und der Güllelagerung, der Vermeidung und dem Recycling von Lebensmittelabfällen, der Reduktion des Konsums tierischer Lebensmittel, der verbesserten Tierfütterung sowie der verbesserten Klärung von Abwasser (Bodirsky et al. 2014). Die Grenzvermeidungskosten (d. h. die günstigsten verfügbaren Kosten zur Vermeidung) liegen oft um eine Größenordnung unterhalb des Grenzschadens (den gesellschaftlichen Kosten, die eine weitere Einheit Verschmutzung verursacht), was die Größenordnung des Marktversagens anzeigt (Gu et al. 2023). Ein nennenswerter Anteil der Todesfälle könnte so durch kostengünstige Maßnahmen im Agrarsektor reduziert werden (Giannadaki et al. 2018; Giannakis et al. 2019).

## 1.3 Krisenresilienz und Klimawandel

### 1.3.1 Globale Krisen

Die landwirtschaftlichen Märkte schwanken sehr stark. Die große Preisvolatilität dieser Märkte und damit auch die Sicherung von Nahrungszugang und -versorgung in der Welt werden in erheblichem Ausmaß durch wirtschaftliche und politische Krisen beeinflusst. Der Grad der Auswirkungen solcher Krisen auf die Märkte ist allerdings nicht immer offensichtlich und die Datenlage hierzu ist oft unzureichend.

Ein Beispiel ist das **Getreideembargo von 1980**, das von der USA gegen die damalige UdSSR infolge des Afghanistankrieges verhängt wurde und das für die damals schwierige wirtschaftliche Lage der Landwirtschaft verantwortlich gemacht wurde. Dies führte zu derart vielen Insolvenzen von Farmen, dass das US Farm Credit System durch erhebliche Steuergelder gestützt werden musste. Im Nachhinein stellte sich allerdings heraus, dass das Exportembargo nur einen recht geringen

Einfluss auf die US-Landwirtschaft gehabt hatte. Das internationale Agrarhandels-system hatte sich als sehr resilient erwiesen. Getreide aus anderen Weltregionen wurde in Richtung UdSSR umgeleitet, während US-Getreide die für andere Ziele vorgesehenen Exporte ersetzte. Tatsächlich war die damalige Agrarfinanz- und Einkommenskrise das Resultat steigender Zinsen in den USA, die die Kredite der Landwirtschaft verteuert und auch den Wert des US-Dollars gegenüber anderen Währungen erhöht hatten. Letzteres hatte die exportorientierte US-Agrarproduktion verteuert und deren Wettbewerbsfähigkeit verringert (Paarlberg 1980; Houck 1987). Zur Jahrtausendwende lag der Weizenpreis im Jahresdurchschnitt bei US\$ 2,50 je Bushel (ein US-amerikanisches Volumenmaß, welches circa 35,2 Litern entspricht). Im Dezember 2021 stieg der Preis von US\$ 5,00 je Bushel vor Beginn des Angriffs auf US\$ 8,50 je Bushel. Dieser starke Anstieg wurde in der öffentlichen Debatte in Europa zunächst auf den erwarteten kriegsbedingten Ausfall eines Großteils der ukrainischen Weizenproduktion und -exporte zugeschrieben. Jedoch zeigten von Witzke et al. (2008), dass selbst ein Totalausfall der Weizenexporte der Ukraine lediglich zu einem Preisanstieg von etwa 10 bis 15 % hätte führen können. Insofern müssen andere Variablen vorgeherrscht haben, die kriegsbedingt indirekt die globale Landwirtschaft betroffen hatten. Unter anderem wurde hierfür vorrangig der kriegsbedingt gestiegene Preis für Rohöl verantwortlich gemacht (Witzke et al. 2008). Ähnlich verhält es sich mit dem seit 2022 andauernden Angriffs-krieg Russlands auf die Ukraine, die nach dem Ende der Sowjetunion zu einem der bedeutendsten Weizenexportländer geworden war.

Oft werden in der weltweiten öffentlichen Debatte starke Preisausschläge auf den Agrarmärkten auf **Spekulation** zurückgeführt. Darauf folgen üblicherweise For-derungen nach staatlichen Interventionen zur Preisstabilität. Solche Interventio-nen erscheinen allerdings kontraproduktiv, denn Spekulationen auf den Termin-märkten dienen auch als Preisversicherung für das Angebot an Agrarrohstoffen (durch die Landwirt:innen) und die Nachfrage nach Agrarrohstoffen (durch die Nahrungsmittelwirtschaft). Dieser Preissicherungsmechanismus funktioniert nur, sofern Spekulanten in der Hoffnung auf Gewinn bereit sind, dieses Preisri-siko zu tragen. Sie folgen den Märkten: Manche verdienen Geld, andere verlieren es. Insofern erfüllen die Terminmärkte eine Funktion der Marktpreisfindung und wirken tendenziell preisstabilisierend.

Eine Analyse des sehr starken globalen Preisausschlags in den Jahren 2007 und 2008 ergab, dass dieser sehr gut durch lediglich zwei realwirtschaftliche Variablen erklärt werden kann: (i) durch den in jener Zeit weltweit stark gestiegenen Ölpreis und (ii) die gleichzeitig weltweit stark gestiegenen Frachtraten, die eben-falls – aber nicht ausschließlich – vom Ölpreises abhängen (von Witzke et al. 2008;

Tabelle 2). Die andere wichtige Variable, die die Frachtraten bestimmt, ist ein mittelfristiger Preiszyklus, ähnlich dem der erstmalig für den Markt für Schlachtschweine quantitativ ökonomisch modelliert worden ist, bei dem das Angebot erst mit einiger zeitlicher Verzögerung an sich ändernde Marktbedingungen angepasst werden kann (von Witzke et al. 2008; Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Bestimmungsfaktoren des weltweiten Preisausschlags von Januar 2007 bis Juni 2008 am Beispiel des Weizens (von Witzke et al. 2008).

Faktor	Änderung in %
Ölpreis	29,3
Frachtraten	29,6
Bevölkerungswachstum	2,3
Einkommen	2,0
Wechselkurs (US\$/SDR)	7,6
Exportbeschränkungen	6,1
Produktion	-10,7
Bioenergie	0,1
<b>Gesamt beobachtet</b>	<b>77,8</b>
<b>Gesamt erklärt</b>	<b>78,3</b>

### 1.3.2 Stressfaktoren, die von der unbelebten Umwelt ausgehen

Schädliche Einflüsse auf Pflanzen, die durch nicht-lebende Umweltfaktoren verursacht werden, werden als **abiotischer Stress** bezeichnet. Unter anderem zählt der **Klimawandel** – getrieben von Treibhausgasemissionen menschlicher Aktivitäten – dazu. Er ist ein globales Phänomen und äußert sich insbesondere in der Veränderung der mittleren Temperaturen und Niederschlagssummen, der Niederschlagsmuster, einer höheren Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Extremwetterereignissen (wie Hitzewellen, Trockenperioden und Starkniederschlagsereignisse) und höheren Schwankungen zwischen den Jahren.<sup>28</sup> Jede weitere Verstärkung des Klimawandels wird nicht nur zu einer Zunahme der globalen mittleren Oberflächentemperatur führen, sondern auch die Häufigkeit und

28 IPCC. 2021. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full-Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full-Report.pdf)

Intensität von Extremwetterereignissen, deren gemeinsames Auftreten (wie beispielsweise Hitze und Trockenheit) und die Interaktion von klimatischen und nicht-klimatischen Risiken mit hoher Wahrscheinlichkeit weiter erhöhen.<sup>29</sup>

In Bezug auf **Extremwetterereignisse** werden für Deutschland starke Veränderungen beschrieben.<sup>30</sup> Das betrifft die Zunahme (wie beispielsweise Hitzewellen, Trockenheit und Dürre), die Abnahme (wie beispielsweise strenge Fröste von -10 bis -15°C) und die regionale Verlagerung solcher Ereignisse. Temperaturveränderungen gelten als wissenschaftlich erwiesen, wohingegen Veränderungen im Bereich der Niederschläge und des Windes differenzierter zu betrachten sind: Beispielsweise kann bisher der Zusammenhang zwischen Klimawandel und der Zunahme an Starkniederschlägen für Deutschland nicht nachgewiesen werden, wohingegen die Häufigkeit und Intensität der überdurchschnittlich warmen und trockenen Sommer in den Jahren 2018, 2019, 2020 und 2022 nur durch den Klimawandel erklärt werden kann.<sup>31</sup>

Die bereits beobachteten und zukünftig zu erwartenden Veränderungen bei Wetter und Klima zeigen substanzielle Auswirkungen auf die agrarische Produktion, insbesondere auf die durchschnittlichen Erträge von Nutzpflanzen und Nutztieren, mit Folgen für die globale Ernährungssicherung (Seppelt et al. 2022). Das Ertragspotenzial von Nutzpflanzen wird (i) insbesondere durch die Sonnenstrahlung, das Temperaturregime, die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und die Sortenwahl definiert, (ii) durch die Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen begrenzt und (iii) durch Unkräuter, Schädlinge und Krankheiten reduziert (van Ittersum et al. 2013). Der Klimawandel kann sowohl auf die Quantität als auch auf die Qualität der Ernteerträge wirken, wobei die Richtung (d. h. positiv oder negativ) und das Ausmaß dieser Auswirkungen zwischen regionalen und betrieblichen Gegebenheiten sowie Kulturarten variiert (unter anderem Mitter et al. 2015; Balkovič et al. 2018).

Im Allgemeinen führt bei Nutzpflanzen ein **Temperaturanstieg** in den Stressbereich zu einer veränderten Phänologie (d. h. einer rascher ablaufenden zeitlichen Entwicklung der Nutzpflanzen von Austrieb über Blütenbildung bis hin

---

29 IPCC. 2021. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FullReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf)

30 Deutscher Wetterdienst/Extremwetterkongress. 2022. [https://www.dwd.de/DE/presse/ewk\\_hamburg/ewk\\_hamburg\\_2022\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/presse/ewk_hamburg/ewk_hamburg_2022_node.html)

31 Deutscher Wetterdienst: 12. Extremwetterkongress 2022. [https://www.dwd.de/DE/presse/ewk\\_hamburg/ewk\\_hamburg\\_2022\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/presse/ewk_hamburg/ewk_hamburg_2022_node.html)

zur Fruchtbildung), einer sinkenden Nettophotosynthese, einer höheren Verdunstungsrate und einer steigenden Anfälligkeit gegenüber Schädlingen (Porter & Semenov 2005). **Niederschlagsveränderungen** beeinflussen die Bodenfeuchte und damit verbundene Prozesse wie beispielsweise die Verfügbarkeit von Nährstoffen und die Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln.

Die Zunahme der **CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre** führt generell zu einer Verbesserung der Kohlenstoffversorgung und der Wassernutzungseffizienz in Nutzpflanzen (Leakey et al. 2009). Bei ausreichender Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit können insbesondere sogenannte C3-Pflanzen (wie beispielsweise Reis und Weizen) hinsichtlich ihres Ernteertrags vom sogenannten CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt profitieren. Umgekehrt kann sich eine höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre negativ auf die Qualität der Nahrungsmittel auswirken (Myers et al. 2014; Ekele et al. 2025). Der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt ist jedoch noch nicht abschließend erforscht (Reich et al. 2018; Toreti et al. 2021).

Modellstudien für Europa zeigen, dass die **Nutzpflanzenproduktion** in Südeuropa in den nächsten Jahrzehnten vom Klimawandel wahrscheinlich negativ betroffen sein wird, wohingegen in Nordeuropa die simulierten Erträge unter Berücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Düngungseffekts im Durchschnitt steigen können. Die Modellergebnisse variieren nach Klimaszenarien und unter (Nicht-)Berücksichtigung von Extremwetterereignissen wie beispielsweise Trockenperioden (Balkovič et al. 2018). Ohne Berücksichtigung von Extremwetterereignissen werden für Zentraleuropa im Durchschnitt Ertragszunahmen simuliert, allerdings mit großen regionalen und kulturartenspezifischen Unterschieden (Knox et al. 2016; Balkovič et al. 2018). Im Gegensatz zu C4-Pflanzen (wie beispielsweise Mais und Hirse) sind für C3-Pflanzen und insbesondere für C3-Winterkulturen (wie beispielsweise Wintergetreide) im Durchschnitt positive Auswirkungen möglich. Allerdings können sich die Ertragsgewinne aus dem CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt durch Extremwetterereignisse wie Hitze und Trockenheit auch in Ertragsverluste umkehren (Rezaei et al. 2023). Substanzielle Produktivitätsrückgänge erfolgten spätestens ab Mitte des 21. Jahrhunderts (Carozzi et al. 2021; Jägermeyr et al. 2021). Demensprechend benennt der sechste IPCC-Sachstandsbericht Hitze- und Trockenstress für Nutzpflanzen als eines von vier zentralen Risiken für Europa.<sup>32</sup>

Zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die **Nutztierhaltung** zählen vor allem Veränderungen in der Quantität und Qualität von Futterpflanzen, in der tierischen

---

32 IPCC. 2022. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

Produktion, der Tiergesundheit und Hitzestress (Rojas-Downing et al. 2017; Godde et al. 2021). Die oben für Nutzpflanzen beschriebenen Auswirkungen von Veränderungen der Temperatur, Niederschlägen und atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration wirken in ähnlicher Weise auf Futterpflanzen. Zudem kann sich im Grünland die Artenzusammensetzung verändern. Die damit verbundene veränderte Qualität der Futtermittel kann auf die Nährstoffverfügbarkeit für Nutztiere wirken. Die tierische Produktion und die Tiergesundheit können insbesondere durch steigende Temperaturen negativ beeinflusst werden (Godde et al. 2021). Des Weiteren kann sich die Ausbreitung von Krankheiten als Folge des Klimawandels verändern, und es können neue Krankheiten auftreten. Nutztiere leiden unter Hitzestress, wenn durch den Temperaturanstieg eine – für die jeweilige Tierart spezifische – kritische Höchsttemperatur erreicht beziehungsweise überschritten wird. Dies führt zu einer verringerten Aufnahme von Futtermitteln, einer erhöhten Aufnahme von Wasser und einer damit einhergehenden verringerten durchschnittlichen Gewichtszunahme pro Tag. Des Weiteren wirkt sich Hitzestress nachteilig auf die Produktivität (beispielsweise durch eine geringere Milchleistung, insbesondere bei Hochleistungskühen) und die Reproduktion aus, und er kann auch zu Todesfällen führen (Nardone et al. 2010; Rojas-Downing et al. 2017; Godde et al. 2021). Das Ausmaß der Effekte unterscheidet sich, ähnlich wie bei Nutzpflanzen, nach Tierart und -rasse sowie nach Region (Rojas-Downing et al. 2017; Godde et al. 2021).

Neben der Veränderung der Produktivität sind die **Landwirt:innen** auch direkt vom Klimawandel betroffen. Insbesondere erhöht dieser die Unsicherheit in Bezug auf die in der Zukunft zu erwartenden Veränderungen, erschwert die Wahl von effektiven Anpassungsmaßnahmen (Mitter et al. 2019; Kropf et al. 2025) und führt zu psychosozialen Belastungen (Wittmann et al. 2024). Des Weiteren führt der Klimawandel – auch bei möglichen positiven Produktivitätsveränderungen – zu einem Anpassungsdruck an die veränderten Rahmenbedingungen. Insbesondere gilt dies für langfristige Entscheidungen wie die Umstellung der Bewirtschaftungsweise (beispielsweise auf ökologische Bewirtschaftung), für Investitionen in den Maschinenpark, die beispielsweise bei Veränderungen in der Fruchtfolge oder der Bodenbewirtschaftung notwendig werden, beim Anbau von Dauerkulturen wie Obst oder Wein, bei der Erschließung neuer Absatzmärkte, die etwa durch Veränderungen in der Kulturartenzusammensetzung notwendig werden, oder auch in Bezug auf den individuellen Erfahrungsschatz beim Anbau bestimmter Sorten. Die durch den Klimawandel veränderten Rahmenbedingungen führen somit zu zusätzlichen Herausforderungen, die sich nicht zuletzt in einem bisher unzureichenden Anpassungsverhalten von Landwirt:innen zeigen (McCarl 2015; Mitter et al. 2018).

### 1.3.3 Stressfaktoren, die von der belebten Umwelt ausgehen

**Pflanzenkrankheiten**, verursacht durch Viren, Bakterien und Pilze und Schädlingsbefall von Pflanzen durch Insekten, Fadenwürmer und andere wirbellose Tiere (**biotischer Stress**), sind in erheblichem Umfang für Ernteaufschläge verantwortlich. Schätzungen zufolge liegen die Verluste durch Krankheiten und Schädlinge bei den weltweit wichtigsten Kulturpflanzenarten Weizen, Reis, Mais, Kartoffel und Sojabohne durchschnittlich zwischen 10 % und 40 % (Savary et al. 2019). Diese Werte schwanken jährlich stark, abhängig von Wetterbedingungen, lokalen und saisonalen epidemieartigen Ausbrüchen von Krankheiten oder regelmäßig auftretender explosionsartiger Vermehrung von Schädlingspopulationen. Durch Globalisierung, internationalen Lebensmittelhandel und Tourismus hat die Verbreitung von Krankheitserregern und Schädlingen stark zugenommen. Trotz intensiver Bemühungen und gewissen Erfolgen, die Verbreitung von Pflanzenkrankheiten und -schädlingen durch Kontroll-, Überwachungs- und Quarantänemaßnahmen<sup>33</sup> einzudämmen, lässt sich die Ausbreitung langfristig kaum verhindern. Der **Klimawandel** verschärft dieses Problem zusätzlich: So begünstigen beispielsweise milde Winter in unseren Breitengraden sowohl das Überdauern vieler Krankheitskeime (wie Pilzsporen) als auch das Überleben von Schadinsekten (Bebber et al. 2013; Deutsch et al. 2018). Höhere Temperaturen führen zudem bei vielen Schädlingen zu einer höheren Stoffwechselrate und somit zu schnellerem Wachstum und stärkerer Vermehrung (Deutsch et al. 2018). Je mehr Generationen an Nachkommen ein Schädling pro Jahr produziert, umso größer die Gefahr einer exponentiellen Vermehrung und somit von Schädlingsepidemien, die nahezu die gesamte Ernte vernichten und die Nahrungsmittelproduktion einer ganzen Region bedrohen können. Aktuelle Schätzungen zufolge können in den gemäßigten Breiten die Ernteverluste durch Schadinsekten pro Grad globaler Erwärmung um bis zu 25 % steigen (Deutsch et al. 2018). Erschwerend kommt hinzu, dass Insekten nicht nur durch den direkten Befall der Pflanze Schaden anrichten, sondern häufig auch als sogenannte „Vektoren“ von Pflanzenkrankheiten fungieren, indem sie Viren, Bakterien oder Pilzsporen über weite Entfernungen übertragen.

Die Züchtungsforschung ist intensiv bemüht, der Ausbreitung von Pflanzenkrankheiten und dem steigenden Schädlingsdruck durch neue **Resistenzen** sowie verbesserten chemischen Pflanzenschutz (beispielsweise Fungizide und Insektizide) zu begegnen. Die zunehmend striktere Regulierung des Chemikalieneinsatzes in der Landwirtschaft durch die Europäische Union (EU) stellt allerdings eine große

---

33 EASAC. 2014. <https://easac.eu/publications/details/risks-to-plant-health-european-union-priorities-for-tackling-emerging-plant-pests-and-diseases>

Herausforderung dar.<sup>34</sup> Resistenzen gegenüber Krankheitserregern und Schädlingen sind häufig im Laufe der Domestizierung (Domestikation) von Kulturpflanzen verlorengegangen, da hauptsächlich auf Ertrag, Geschmack und Verarbeitungseigenschaften selektiert wurde. Verwandte Wildarten sind daher eine ergiebige Quelle für Resistenzgene (unter anderem Song et al. 2003). Im Idealfall können solche Resistenzgene in moderne Hochleistungssorten eingekreuzt werden. Dies ist jedoch aufgrund der hohen Anzahl an Kreuzungsgenerationen ein sehr aufwändiger Prozess, der mitunter viele Jahre bis Jahrzehnte dauert. Die Resistenzzüchtung steht somit in einem Wettlauf gegen die Zeit, da Krankheitserreger und Schädlinge regelmäßig neue, aggressivere und an neue Sorten angepasste Stämme hervorbringen, die natürliche Resistenzen überwinden und/oder Toleranzen gegenüber chemischen Pflanzenschutzmitteln entwickeln können. Zudem gibt es nicht immer Wildarten, die die gesuchten Resistenzgene enthalten und die mit der Kulturpflanze kreuzbar sind. Die direkte Übertragung von Resistenzgenen mit den Methoden der Gentechnik bietet eine schnelle und effiziente Möglichkeit, Resistenzgene in moderne Hochleistungssorten einzubringen (siehe Kapitel 2.3.1). Der Einsatz dieser Technologien in der landwirtschaftlichen Praxis wird gegenwärtig aber in der Europäischen Union durch hohe Zulassungshürden eingeschränkt.<sup>35</sup> Eine begrenzte Zahl an Resistenzen lässt sich auch mit den neuen, präzisen Züchtungsverfahren der Genomedierung (beispielsweise mit der sogenannten „Genschere“ CRISPR/Cas) erzeugen (Molla et al. 2021; siehe Kapitel 2.3.2). Die mit diesen Techniken erzeugten neuen Sorten wurden inzwischen in vielen Ländern den konventionell gezüchteten Sorten gleichgestellt, und sie werden nicht (mehr) als Gentechnik reguliert.<sup>36</sup> Das EU-Parlament hat sich auf Vorschlag der EU-Kommission im Februar 2024 für eine ähnliche Regelung ausgesprochen – eine entsprechende endgültige Entscheidung auf EU-Ebene steht momentan noch aus.

Darüber hinaus wirkt sich der Klimawandel auch auf Ernteverluste durch mit den Nutzpflanzen konkurrierende Unkräuter aus. Ertragseinbußen durch **Unkrautwuchs** können sogar weit über Ernteverluste durch Schädlinge hinausgehen. So werden beispielsweise die durch Unkrautwuchs verursachten globalen Ernteaufälle beim Weizenanbau auf durchschnittlich 20 bis 30 % geschätzt, können

---

34 EASAC. 2014. <https://easac.eu/publications/details/risks-to-plant-health-european-union-priorities-for-tackling-emerging-plant-pests-and-diseases>

35 EASAC. 2013. <https://easac.eu/publications/details/planting-the-future-opportunities-and-challenges-for-using-crop-genetic-improvement-technologies-for-sustainable-agriculture>

36 Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften und Deutsche Forschungsgemeinschaft. 2019. <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/wege-zu-einer-wissenschaftlich-begründeten-differenzierten-regulierung-genomeditierter-pflanzen-in-der-eu-2019/>

aber bei starkem Befall der Ackerfläche und ausbleibenden wirksamen Bekämpfungsmaßnahmen bis zu 80 % erreichen (Chhokar et al. 2012). Ob der Klimawandel die durch Unkräuter verursachten Probleme in der Landwirtschaft weiter verschärfen wird, lässt sich momentan noch nicht sicher absehen. Die Auswirkungen können sowohl lokal als auch für verschiedene Kulturpflanzenarten sehr unterschiedlich ausfallen.

## 1.4 Ein vernetztes Agrar- und Ernährungssystem

### 1.4.1 Hauptfaktoren für die Sicherung der Welternährung

Die globale Landwirtschaft steht vor der Herausforderung, immer mehr Menschen auf immer weniger Fläche zu ernähren. Das Bevölkerungswachstum und der damit verbundene Bedarf an Nahrungsmitteln sowie die menschlichen, ökologischen, sozialen und ökonomischen Kosten müssen verringert werden.

Die steigende globale Nachfrage kann grundsätzlich entweder dadurch gedeckt werden, dass die weltweiten Agrarflächen ausgedehnt, oder dadurch, dass auf den bereits genutzten Flächen die Erträge gesteigert werden. Eine **Ausdehnung der Agrarflächen** ist jedoch nur sehr begrenzt möglich, da die tendenziell produktivsten Flächen bereits genutzt werden. In vielen Regionen, einschließlich der EU, sind kaum größere Flächenreserven vorhanden. Tropische Regenwälder sollten zum Schutz von Klima und weltweitem Naturkapital nicht zur Agrarproduktion genutzt werden. Eine **Steigerung der Erträge** auf den bereits genutzten Ackerflächen hat das Potenzial, die Welternährung zu sichern. Nach Schätzungen der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) werden bis 2050 90 % der notwendigen Produktionssteigerungen durch Steigerungen der Erträge auf den bereits genutzten Flächen erfolgen müssen und nur noch 10 % zu Lasten der Flächenausdehnung gehen können.<sup>37</sup> Zur Erreichung dieses Ziels sind Innovationen notwendig, die die Effizienz der bisher in der Landwirtschaft eingesetzten Produktionsfaktoren erhöhen und gleichzeitig Klima und Naturkapital schonen. Dieses Ziel verlangt eine global abgestimmte Agrar- und Forschungspolitik.

---

37 FAO. 2009. <https://fao.org/3/i0876e/i0876e00.htm>

Als Alternative zu Ertragssteigerungen wird in Industrieländern häufig eine **Ernährungswende und eine Verringerung der Nahrungsmittelverluste** entlang der Wertschöpfungskette gefordert. Beides sind sinnvolle Ansätze, die eine Kombination verschiedener Maßnahmen erfordern (Grune et al. 2025). Bisher blieben Fortschritte bei Ernährungsumstellungen und Verlustreduktionen begrenzt. Bei Fortsetzung aktueller Trends wird die weltweite Nachfrage insbesondere nach tierischen Produkten weiter steigen. In einigen Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen können sich viele Menschen keinen oder einen geringen Konsum tierischer Lebensmittel leisten.

### 1.4.2 Produktion und Handel

Der OECD-FAO erwartet, dass das Bevölkerungswachstum sich bis 2034 bzw. 2050 abschwächt, wodurch auch das Wachstum der Nachfrage geringer ausfallen könnte.<sup>38</sup> Dennoch wird die weltweite Nachfrage nach Nahrungsmitteln in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts um 120 % steigen.<sup>39</sup> Nur 20 % der Weltbevölkerung wohnen in Industrieländern, während 80 % in den Entwicklungs- und Schwellenländern leben. In letzteren dominieren Hungerzustände, und gleichzeitig steigt der **Importbedarf**. Die meisten dieser Länder sind weiterhin in der Malthusianischen Falle gefangen: Ihr Bedarf wächst schneller als ihr heimischer Agrarsektor ihn befriedigen können. Folglich vergrößert sich die Importlücke rapide. Die FAO hat prognostiziert, dass sich der Importbedarf in Entwicklungs- und Schwellenländern in den ersten drei Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts verfünffachen und bis 2050 weiter stark zunehmen wird. Die Lage der meisten dieser Länder in agroklimatischen Regionen, die erheblich vom Klimawandel betroffen sind, verschärft die Ernährungssituation zunehmend und lässt deren Importlücke zusätzlich wachsen. Die rasch wachsende Nahrungslücke in Entwicklungs- und Schwellenländern kann nur verringert werden, wenn auch Industrieländer vermehrt in diese Regionen exportieren.

Große Teile der EU sind ausgesprochene Gunststandorte für die Agrarproduktion, woraus sich eine **moralische Verpflichtung** für den Kampf gegen den Hunger ergibt. Auch Deutschland ist ein ausgesprochener Gunststandort für die Herstellung agrarischer Rohstoffe und verarbeiteter Nahrungsmittel. Insbesondere für

---

38 OECD-FAO. 2025. Agricultural Outlook 2025-2034. [https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034\\_601276cd-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034_601276cd-en.html)

39 UNCTAD. 2022. Population Handbook. <https://unctad.org/publication/handbook-statistics-2022>

pflanzliche Produkte wie Weizen ist es ein international bedeutendes Nettoexportland (Tabelle 3). Die Nettoexporte von Gerste und Kartoffeln gehen überwiegend auf innereuropäische Exporte zurück. Aktuell versorgen Deutschland und die EU die Welt mit Weizen als einem der wichtigsten Nahrungsgetreide. Nach Berechnungen des Landwirtschaftsministeriums der USA (USDA) würde allein der Europäische Green Deal dazu führen, dass sich die EU von einer der bedeutendsten Nettoexportländer von Weizen zu einem Nettoimportland von Weizen wandeln würde (Beckman et al. 2020).

**Tabelle 3:** Internationale Handelsströme Deutschlands von Agrargütern im Jahr 2020 (in 1.000 t). Quelle:<sup>40</sup> und eigene Berechnungen.

Markt	Export	Import	Nettoexport
Weizen	10.810	4.418	6.392
Roggen	300	888	-588
Gerste	2.553	1.378	1.175
Kartoffeln	2.640	1.106	2.534
Zucker	1.238	623	515
Butter	148	184	-36
Rindfleisch	229	296	-67
Schweinefleisch	1.748	952	794
Geflügelfleisch	625	713	-88
Eier (Schalenwert)	123	133	-10

Werden die agrarischen Handelsströme um die Wertschöpfung der Ernährungswirtschaft und der **Nutztierproduktion** bereinigt, zeigt sich, dass sich die EU hier zu einem der weltgrößten Nettoimportländer entwickelt hat. Weil die EU das Produktionswachstum vernachlässigt hat, nutzt sie per Saldo – je nach Ausfall der Ernten im In- und Ausland – zwischen 17 und 34 Mio. ha jährlich außerhalb ihrer Grenzen zur Befriedigung ihrer eigenen Bedürfnisse im Agrarbereich. Deutschland trägt mit 5 bis 6 Mio. ha überproportional zu diesem Defizit bei.<sup>41</sup>

40 Destatis. 2020. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/landwirtschaft-wald/Tabellen/flaechenbelegung.html>

41 USDA.2020. <https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details?pubid=99740>

Dieses Defizit wird in der öffentlichen Debatte häufig der agrarischen Handelsbilanz der Nutztierproduktion in Deutschland bzw. der EU zugemessen, weil diese auch importierte Futtermittel, wie Soja(schrot) aus Lateinamerika oder Mais aus der Ukraine einsetzen. Deshalb wird bisweilen gefordert, die heimische Nutztierproduktion einzuschränken. Eine Verringerung der heimischen Nutztierproduktion würde allerdings den Bedarf bzw. die Nachfrage der Welt nach Produkten der Nutztierhaltung nicht verändern. Deutschland ebenso wie die EU sind sehr effizient in der Nutztierproduktion, sodass ein Rückgang der heimischen Produktion zu einer Verlagerung in weniger effiziente Weltregionen führen würde. Dies würde die weltweiten Agrarflächen erweitern, natürliche Lebensräumen und deren Biodiversität weiter schrumpfen lassen und klimaschädliche Emissionen sowie Wasserverbrauch erhöhen. Gleichzeitig würden die Fußabdrücke Deutschlands und der EU in Form der weltweiten per Saldo Nutzung agrarischer Flächen zur Befriedigung ihrer eigenen Bedürfnisse im Agrarbereich noch weiter verstärkt. Deutschland ist lediglich bei Schweinefleisch ein Nettoexportland.

Die **EU-Agrarpolitik** hat das Potential, den Fußabdruck Deutschlands und der EU in Bezug auf die Nettoflächennutzung außerhalb ihrer Grenzen weiter zu verstärken (Beckman et al. 2020). Der Green Deal der EU birgt das Risiko, die heimische Produktion durch Einschränkungen von Pflanzenschutz- und Düngemiteleinsatz sowie durch die Ausweitung der Ökolandwirtschaft zu reduzieren. Letztere halbiert die Flächenenerträge über alle Feldfrüchte hinweg. Dieser Effekt wird durch das EU-Gesetz zur Wiederherstellung der Natur<sup>42</sup> noch verstärkt, das zusätzlich zu einem Rückgang der landwirtschaftlich genutzten Flächen führen kann, da auf mindestens 20 % der Gesamtflächen Renaturierungsmaßnahmen vorzusehen sind. Zusammengeführt könnten diese Maßnahmen sowohl die Produktion je Hektar stark senken als auch die Agrarflächen verkleinern.

### 1.4.3 Herausforderungen der globalen Vernetzung

Agrar- und Ernährungssysteme sind komplex, weltweit vernetzt und unterliegen ständigen Veränderungen. Global gestalten mehr als 570 Mio. Landwirt:innen (Lowder et al. 2016) sowie Vertreter:innen aus Lebensmittelverarbeitung, Verteilung, Vermarktung und Politik die Systeme. Gleichzeitig dominieren wenige, für die Ernährungssicherung zentrale Ackerkulturen – Weizen, Mais, Reis und Sojabohne – und Düngemittel den internationalen Handel (Bailey & Wellesley 2017;

---

42 European Commission. 2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0304>

Puma 2019). Diese Komplexität und die Konzentration auf wenige Ackerkulturen ist mit mindestens drei zentralen Herausforderungen verbunden:

- Die weltweite Vernetzung und der internationale Handel mit Agrargütern führt dazu, dass **Extremwetterereignisse** (siehe Kapitel 1.3.2) und weitere regional eingegrenzte Schockereignisse in den unmittelbar betroffenen Gebieten zu Ertragsreduktionen oder -verlusten führen und zugleich überregionale Auswirkungen nach sich ziehen (Wenz & Willner 2022). Regionale Schocks können sich so schneller verbreiten, werden aber auch durch den Handel mit anderen Regionen abgefedert.
- Kritische Knotenpunkte auf **Transportrouten** im internationalen Agrarhandel sind Seekorridore (beispielsweise Kanäle und Meerengen), Häfen und Küsteninfrastrukturen sowie Transportinfrastrukturen im Binnenland in den bedeutenden Exportregionen von Agrargütern (insbesondere Getreide). Eine Unterbrechung an einem oder mehreren dieser Knotenpunkte kann zu schwerwiegenden Versorgungsengpässen und zu Preissteigerungen führen (Bailey & Wellesley 2017). Ein aktuelles Beispiel ist der eingeschränkte Zugang zu Häfen am Schwarzen Meer aufgrund des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine.
- Wenige Länder dominieren die Exportmärkte der für die Ernährungssicherung zentralen Ackerkulturen – das sind insbesondere Russland für Weizen, Brasilien und die USA für Mais, Indien für Reis und Brasilien für Sojabohnen.<sup>43</sup> Demgegenüber stehen – teilweise sehr arme – Länder und Regionen, die von Agrarimporten abhängig und von potenziellen Angebotsschocks betroffen sind. Die Agrarhandelsbilanz der EU ist zwar positiv, und Verfügbarkeit und Zugang zu Lebensmitteln gelten im Allgemeinen als nicht gefährdet. Allerdings ist die EU von bestimmten **Vorleistungen** abhängig, die von wenigen Lieferanten aus Drittländern importiert werden (Loi et al. 2024). Dazu zählen Vorleistungen für die tierische und die pflanzliche Produktion: Sojabohnen und Sojamehl kommen hauptsächlich aus Brasilien, Argentinien und den USA, nitrathaltige Düngemittel aus Russland, Ägypten und Algerien, Phosphate aus Marokko und Russland sowie Kali aus Russland und Weißrussland (Loi et al. 2024). Die Abhängigkeitsquote für importierte Vorleistungen liegt unter 10 %, ist bei einzelnen Vorleistungen aber wesentlich höher (bis zu über 65 %). Auch die geografische Konzentration der Importe ist im Agrarsektor insgesamt niedrig, aber für diese Vorleistungen vergleichsweise hoch (Loi et al. 2024).

---

43 STATISTA. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/262309/umfrage/groesste-weizen-exporteure-weltweit/>

**Zusammenfassung:** Die Welternährung steht aktuell vor großen Herausforderungen. Die historische Entwicklung der Landwirtschaft und die Auswirkungen von beispielsweise CO<sub>2</sub>-Ausstoß, Bodendegradation, abiotischen und biotischen Stressfaktoren, dem Klimawandel und Krisen, und dem Einsatz von Agrochemikalien spielen eine zentrale Rolle in der Nahrungsmittelproduktion. Die Agrar- und Ernährungssysteme der Welt sind eng vernetzt und umfassen neben der Produktion auch den Import und Export von Nahrungsmitteln. Diese globale Vernetzung beeinflusst sowohl die Preise als auch die Verfügbarkeit von Lebensmitteln auf Konsumseite als auch Kosten und Nutzen auf Produktionsseite.

## 2 Lösungen für eine nachhaltige Nahrungsmittelproduktion

### 2.1 Landnutzungskonzepte

#### 2.1.1 Innovation und Produktivität versus Extensivierung

Für das notwendige Produktivitätswachstum, um ausgeprägte Hungerkrisen zu verhindern und gleichzeitig globales Naturkapital und Klima zu schonen, gibt es drei wesentliche Quellen: (i) Umstellungen im Konsum, (ii) Steigerung der Produktivität der Flächennutzung und (iii) Innovationen, die die Produktivität der eingesetzten Produktionsfaktoren je Flächeneinheit erhöhen. Untersuchungen aus den USA zeigen, dass dort steigende Flächenerträge bei gleichzeitig abnehmender Intensität der Bodennutzung erreicht wurden (Fuglie 2012). Eine vergleichbare Studie für die deutsche Landwirtschaft bestätigt ähnliche Effekte bei wichtigen Feldfrüchten (Noleppa 2016; Tabelle 4).

**Tabelle 4:** Quellen des Wachstums der Flächenerträge in Deutschland: Innovation und Produktivität statt Intensivierung, EU von 2003 bis 2013 (nach Noleppa 2016).

Feldfrucht	Ertragssteigerung (% dt je ha & Jahr)	Innovationen (% TFP je ha & Jahr)
Weizen	0,86	1,44
Mais	1,26	1,86
Raps	0,98	1,58
Zuckerrüben	2,46	3,06
Kartoffeln	1,85	2,45

Noleppa (2016) analysierte im Zeitraum 2003 bis 2013 durchschnittliche jährliche Wachstumsraten der Flächenerträge in Dezitonnen (dt) je Hektar (ha) und Jahr (Tabelle 4). Diese hätten nun das Resultat einer Steigerung der Intensität der Bodennutzung sein können, wie beispielsweise erhöhter Einsatz von Dünge- oder Pflanzenschutzmittel je Hektar Fläche oder aber von Innovationen, die dazu führen, dass sich die eingesetzten Produktionsfaktoren in höheren Flächenerträgen niederschlagen. Die Wirkungen solcher Innovationen werden in der Veränderung der Totalen Faktorproduktivität (TFP) gemessen. Diese hat durchgängig schneller zugenommen als die Flächenerträge (Tabelle 4). Das bedeutet, dass in den letzten Jahren in Deutschland Ertragssteigerungen bei gleichzeitig sinkender Flächennutzung erzielt wurden. Dies ist unter anderem auf die Innovation des pfluglosen Ackerbaus zurückzuführen, die Arbeit und Energie spart und Bodenerosion vermindert (Noleppa 2016). Desweiteren gewinnt die Präzisionslandwirtschaft weiter an Bedeutung, welche den punktgenauen und bedarfsgerechten Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln ermöglicht (Noleppa 2016). Derzeit halten Elemente der künstlichen Intelligenz Einzug in die Produktionsvorgänge, wodurch weitere Steigerungen der Effizienz des Faktoreinsatzes zu erwarten sind (siehe Kapitel 2.2.3). Zudem können in Zukunft mit Nutzpflanzen, die durch Gentechnik und Züchtungsforschung erzeugt werden, steigende Flächenerträge bei sinkender Intensität der Flächennutzung ermöglicht werden (siehe Kapitel 2.3). Bereits die traditionelle Gentechnik hat mit dem Transfer genetischer Information in die Praxis erhebliche Vorteile ergeben. Qaim (2020) und Kümper & Qaim (2019) haben gezeigt, dass hierdurch bereits die Erträge und die landwirtschaftlichen Einkommen deutlich gesteigert werden konnten, wohingegen die Menge der eingesetzten Pflanzenschutzmittel signifikant abnahm (Tabelle 5). Fortschritte in den molekularen Züchtungsmethoden werden diese Entwicklung noch verstärken.

**Tabelle 5:** Ergebnisse einer Metaanalyse der durchschnittlichen Veränderung von Flächenerträgen, Menge der Pflanzenschutzmittel und landwirtschaftlicher Einkommen durch traditionelle Gentechnik (nach Kümper & Qaim 2020).

	Flächenertrag (%)	Einsatz von Pflanzenschutz (%)	Einkommen (%)
Industrieländer	+ 8	- 18	+ 34
Entwicklungsländer	+ 29	- 42	+ 78
Alle Länder	+ 22	- 37	+ 68

Zur **Bewertung der Nachhaltigkeit der Agrarproduktion** sind drei ökonomische Konzepte zentral: (i) das Konzept der Allmende, (ii) das Konzept der indirekten Landnutzungsänderung und (iii) das Konzept der externen Produktionskosten:

- Die Atmosphäre, in der das Klima der Erde gebildet wird, ist eine **globale Allmende** – eine von allen Lebewesen gemeinsam genutzte Ressource, die durch Übernutzung gefährdet ist. Unsere Klimaallmende ist mit Klimagasen übersättigt. Internationale Bemühungen zur Gegensteuerung sind im Gange. Dabei muss beachtet werden, dass heimische Politikentscheidungen zu Klimaeffekten immer auch die Reaktionen der Anderen in der Allmende berücksichtigen sollten. Andernfalls kann das Gegenteil von dem bewirkt werden, was vorgeblich damit erreicht werden sollte.
- Das Konzept der **indirekten Landnutzungsänderung** verbindet die Landnutzungsänderungen in einer Region mit denen, die dadurch indirekt in anderen Teilen der Welt ausgelöst werden (Wicke 2012; Hertel 2018): Wenn in einer Region (wie beispielsweise Deutschland oder der EU) eine direkte Landnutzungsänderung durch Verringerung der heimischen Agrarproduktion stattfindet, ändert sich dadurch der globale Nahrungsbedarf nicht. Stattdessen wird Nahrung knapper und somit teurer. Beides erhöht die Anreize zu einer beschleunigten Ausdehnung der weltweiten Agrarflächen, typischerweise durch Brandrodung oder die Umwandlung von Gras- in Ackerland, was natürliche oder naturnahe Lebensräume und deren Biodiversität zerstört und in erheblichem Umfang Klimagase freisetzt. Umgekehrt können Ertragssteigerungen den Flächenbedarf reduzieren, Lebensräume erhalten und Klimagasemissionen mindern. Diese Effekte einer Verringerung der Produktion, sei es durch Verringerung des Flächeneinsatzes oder der -erträge, sind auf der Basis methodischer Standardinstrumente der ökonomischen Analyse quantifiziert worden. Für Deutschland ergibt sich dabei, dass jeder Prozentpunkt Verringerung der Flächenenerträge zu einer zusätzlichen Ausdehnung der weltweiten Ackerflächen um 130.000 ha führt (Noleppa 2016). Bei dadurch ausgelösten zusätzlichen Klimagasemissionen in Höhe von durchschnittlich 600 t CO<sub>2</sub>e je ha ergeben sich für die gesamten zusätzlichen Emissionen je Prozentpunkt Minderproduktion in Höhe von 78 Mio. t CO<sub>2</sub>e, was sich auf Klimakosten für die Welt insgesamt in Höhe von 15,6 Mrd. € beläuft. Dies entspricht globalen Klimakosten von 1.325 € je ha Ackerfläche und Prozentpunkt Minderertrag in Deutschland. Umgekehrt ergibt sich je Prozentpunkt Steigerung der Flächenenerträge in Deutschland ein globaler Klimanutzen von 1.325 € je ha Ackerfläche. Nicht monetär bewertet sind dabei die Verluste bzw. Gewinne an natürlichen oder naturnahen Lebensräumen und deren Biodiversität.

- **Externe Produktionskosten:** Ähnlich negative Konsequenzen wie bei der Produktion von Nutzpflanzen hat auch der Wechsel in eine weniger produktive Wirtschaftsweise in der Nutztierproduktion. Dies sei hier am Beispiel der Hähnchenfleischproduktion in der EU gezeigt: Die Effizienz der Futterverwertung in der EU gehört zu der höchsten der Welt. Ein Übergang zur Produktion nach der EU-Ökoverordnung<sup>44</sup> würde die Futtereffizienz reduzieren und die heimische Produktion verteuern. Dies könnte eine Verlagerung der Produktion in weniger effiziente Regionen bewirken, deren Produktion bei geringerer Futtereffizienz erfolgt. Der Bedarf an Futterflächen würde steigen, was die Ausdehnung der weltweiten Agrarflächen und den Verlust an natürlichen Lebensräumen beschleunigt und in erheblichem Umfang die Emissionen von Klimagasen steigert. Zusätzlich drohten Arbeitsplatz- und Einkommensverluste in der heimischen Nutztierproduktion und den zugehörigen Wirtschaftsbereichen. Ein Umstieg in der EU zu 100 % von modernen Produktionsmethoden auf Ökoproduktion in der Hähnchenfleischproduktion würde zu einer zusätzlichen Ausdehnung der weltweiten Agrarflächen und damit den Verlust an natürlichen Lebensräumen von 900.000 ha führen (von Witzke et al. 2017). Die damit verbundenen Klimagasemissionen würden sich auf 540 Mio. t CO<sub>2</sub>e belaufen, mit globalen Klimakosten in Höhe von 108 Mrd. € (von Witzke et al. 2017). Damit einher ginge ein Verlust an Biodiversität in Höhe von etwa 300.000 bis 400.000 ha Regenwald (von Witzke et al. 2017). Der zusätzliche jährliche Wasserverbrauch läge bei 1,5 km<sup>3</sup> – vergleichbar mit dem durchschnittlichen monatlichen Wasserfluss der Donau ins Schwarze Meer.

## 2.1.2 Agrarforstsysteme

In der EU werden sogenannte Agrarforstsysteme gefördert. Darunter wird der Anbau von Feldfrüchten, Büschen und Bäumen auf derselben Fläche verstanden, oft in Kombination mit Nutztierhaltung. Von diesen Systemen erhofft man sich positive Wechselwirkungen zur Steigerung der Flächenerträge und einer Stärkung des Ökosystems.

Früher waren Agrarforstsysteme in Deutschland weit verbreitet, beispielsweise in Form von Hutewäldern oder Streuobstwiesen. Weltweit spielen Agrarforstsystem vor allem in Entwicklungsländern auch heute noch eine wichtige Rolle (Stappler & Nair 1997). Mit Beginn der von Norman Borlaug in der Mitte des letzten Jahrhunderts

---

44 EU-Verordnung 2018/848. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0848>

ausgelöst „Grünen Revolution“ und der damit zeitgleichen Verfügbarkeit an preiswertem synthetischem Stickstoffdünger durch die industrielle Anwendung des Haber-Bosch Verfahrens, begann in vielen Ländern der Rückzug der Agrarforstsysteme.

Die potentiellen Vorteile dieser Systeme sind unbestritten (Stappler & Nair 1997), allerdings gibt es auch eine Reihe von Nachteilen.<sup>45</sup> Dazu zählen vor allem die höheren Kosten einer maschinellen Bewirtschaftung sowie die Tatsache, dass sich die erhofften Synergieeffekte nicht immer einstellen können, weil diese Systeme auch zu einer starken Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe zwischen Feldfrüchten einerseits sowie Büschen und Bäumen andererseits führen können. Auch Verbissschäden durch Nutztiere können auftreten und Schutzmaßnahmen durch beispielsweise Zäune können die Erträge verringern und die Produktionskosten signifikant erhöhen. Deshalb sind Agrarforstsysteme in Deutschland trotz EU-Subventionierung nach wie vor selten verbreitet. Agrarforstsysteme in anderen agroklimatischen Regionen als hierzulande können jedoch gewisse Vorteile bieten.

### 2.1.3 Urbane Landwirtschaft

Das Konzept, Kulturpflanzen in Städten anzubauen und platzsparend mehrere Gebäudeetagen zu nutzen, wird seit einigen Jahren als „urbane Landwirtschaft“ (engl. „urban farming“) beworben. Es geht über traditionelle städtische Lebensmittelherzeugung (wie beispielsweise in Kleingärten) hinaus, indem auch Gebäudeflächen in Ballungsgebieten einbezogen werden (Ampim et al. 2022). Die Vorteile liegen unter anderem in der lokalen Lebensmittelproduktion, die Transportwege und -kosten reduziert und theoretisch auch den CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der produzierten Nahrungsmittel senkt (Viering 2019). Die direkte Verwendung von kommunalem Abwasser (Niederschlagswasser oder entsprechend vorgereinigtes Abwasser) zu Bewässerungs- oder Dünge Zwecken erscheint ebenfalls ressourcenschonend (Schneider et al. 2021). Weitere positive Effekte liegen beispielsweise im pädagogischen und sozialen Wert des städtischen Gärtnerns sowie in der Verbesserung des Mikroklimas, insbesondere hinsichtlich Temperatur und Luftfeuchtigkeit in Großstädten. Als Kultivierungsflächen kommen Dächer, Balkone und Terrassen, geschlossene Räume (beispielsweise Keller) sowie Fassaden in Betracht. Ideen und Modellprojekte reichen bis zu „gläsernen Hochhäusern“, in denen auf allen Etagen Pflanzen unter weitgehender Nutzung von Sonnenlicht angezogen werden

---

45 DeFAF. <https://agroforst-info.de/chancen/>

können (Rembold 2013). Die effiziente Nutzung mehrstöckiger Gebäude und Hochhäuser wird auch als vertikale Landwirtschaft (engl. „vertical farming“) bezeichnet (Rathor et al. 2024).

Allerdings haben sich die hohen Erwartungen bislang nicht erfüllt. Die Umsetzung der Konzepte in der Praxis stößt auf beträchtliche **Herausforderungen**, die sowohl deren Wirtschaftlichkeit als auch Nachhaltigkeit infrage stellen (Rembold 2023). Kultivierungsmethoden, bei denen Erde bewegt werden muss (beispielsweise um sie in größerem Maßstab auf Dachflächen zu transportieren), können kaum wirtschaftlich betrieben werden: Die hohen Kosten für den Transport und den regelmäßigen Austausch der Erdsubstrate lassen sich bei dem aktuell nicht kompensieren. Hydrokulturen und künstliche Substrate können sinnvolle Alternativen bilden, insbesondere, wenn kommunale Abwässer für Bewässerung und Düngung genutzt werden können (Bunge et al. 2022).

Pilotprojekte haben zudem gezeigt, dass für eine effiziente Pflanzenproduktion kaum auf künstliche Beleuchtung verzichtet werden kann: Das Sonnenlicht, das beispielsweise die unteren Etagen von Gebäuden in großstädtischen Straßenschluchten erreicht, ist bei weitem nicht ausreichend, um eine ausreichende Photosyntheseleistung und damit ein effizientes Pflanzenwachstum zu gewährleisten. Zwar kann durch ein kegelförmiges Gebäudedesign die Lichtausbeute verbessert werden (Rembold 2013), dies reduziert die Nutzfläche der Gebäude jedoch deutlich. Zudem erfordert eine intensive Gebäudenutzung für die urbane Landwirtschaft auch Kompromisse bei Wohn- oder Büroflächen. Dies ist eine Herausforderung an die Architektur der Zukunft. Zudem können Aufwand und Kosten zur Regulierung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit beträchtlich sein (Rembold 2023). Die hohen mit Beleuchtung und Klimatisierung verbundenen Energiekosten stellen somit momentan ein Haupthindernis bei der Umsetzung urbaner Landwirtschaftskonzepte im größeren Maßstab dar. Zwar haben Fortschritte bei der LED-Technologie sowohl zur Senkung des Strombedarfs als auch zur Verbesserung der spektralen Qualität des künstlichen Lichts geführt (durch Mischung von LEDs verschiedenen Farben kann heute das natürliche Sonnenlicht weitgehend imitiert und die pflanzliche Photosyntheseleistung optimiert werden), jedoch nicht genug, um hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit konkurrenzfähig zu sein.

Aufgrund des Flächenbedarfs und des hohen Kostendrucks wird urbane Landwirtschaft kaum Grundnahrungsmittel wie Getreide oder Kartoffeln produzieren und somit in absehbarer Zeit keinen substanziellen Beitrag zur Sicherung der Welternährung leisten können. Für einige Gemüsepflanzen (wie beispielsweise

Blatssalat oder Tomate) und Gewürzkräuter ist in gewissem Umfang eine lokale Erzeugung im städtischen Raum mittelfristig denkbar. Voraussetzung für eine wirtschaftliche und nachhaltige Produktion sind vor allem sinkende Strompreise und eine weitgehende Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen.

#### 2.1.4 Aquaponik

Aquaponik ist ein Kofferwort durch eine Fusion der Begriffe „Aquakultur“ (Fischzucht) und „Hydroponik“ (Kultivierung von Pflanzen in wässrigen Nährlösungen). Das Konzept lässt sich bis ins frühe 15. Jahrhundert zurückverfolgen (Deer et al. 2021). Es werden Kreislaufsysteme konstruiert, in denen Nutzpflanzen wie Blattsalate oder Küchenkräuter ihre Nährstoffe aus dem Wasser der Fischzucht (d. h. aus den Ausscheidungen der Fische) beziehen. Technisch umgesetzt werden kann dies beispielsweise durch Floßsysteme, in denen die Pflanzen direkt auf der Wasseroberfläche des Fischbeckens schwimmen, oder durch die sogenannte Nährstoff-Film-Technik (NFT), bei der die Pflanzen über einen dünnen Nährstofffilm mit Wasser und Nährstoffen versorgt werden, welcher die Wurzeln in der Hydrokultur kontinuierlich umspült. Derzeit werden in den meisten Pilotanlagen Tilapien, eine Gattung afrikanischer Süßwasser-Buntbarsche (*Tilapia*, Cichlidae), kultiviert, da sie relativ effizient in geschlossenen Anlagen gezüchtet werden können.

Mit dem steigenden Bedarf an Fischprodukten und der einsetzenden Überfischung der Meere hat das Interesse an Aquaponik in den letzten Jahren stark zugenommen. Bereits 2012 existierten 71 registrierte Aquaponik-Farmen in den USA (Engle & Beem 2017), von denen die meisten jedoch klein und überwiegend experimentell bzw. als Freizeitbeschäftigung oder Nebenerwerb betrieben wurden. Die Einrichtung von stabilen Systemen im großtechnischen Maßstab ist nach wie vor schwierig und kostenaufwendig, denn Fischzucht in geschlossenen Anlagen ist circa zwei- bis dreimal teurer als in herkömmlicher Teichwirtschaft (Engle & Beem 2017). Obwohl der Wasserverbrauch gesenkt werden und eine weitgehende Unabhängigkeit von Umwelteinflüssen erreicht werden kann, führen insbesondere die aufwändige Wasseraufbereitung, die schwierig zu erhaltende Stabilität aquaponischer Systeme sowie deren hoher Energieverbrauch bislang zu beträchtlichen Mehrkosten gegenüber konventionellen Verfahren der Pflanzen- und Fischzucht. Die zugrundeliegenden Technologien werden zwar kontinuierlich weiterentwickelt (Rakocy et al. 2006; Rakocy 2012; Baganz et al. 2022), jedoch bleibt unklar, ob in absehbarer Zeit eine ökonomisch tragfähige Produktionsweise erreicht werden kann.

Die größte technische Herausforderung liegt im Erhalt eines stabilen biologischen Gleichgewichts, welches sowohl ein gesundes Fischwachstum als auch ein ausreichendes Pflanzenwachstum gewährleistet. Aquaponikkulturen sind komplexe integrierte Systeme, die kontinuierlich überwacht werden müssen, um einen Zusammenbruch des biologischen Gleichgewichts (das „Umkippen“) zu verhindern. Neben den Zuchtorganismen sind weitere Organismen an der Erhaltung des ökologischen Gleichgewichts beteiligt: Fische scheiden Stickstoff (N) aus, der als Düngemittel das Pflanzenwachstum fördert, jedoch überwiegend in Form von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), der von ammoniakoxidierenden Bakterien zu Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) oxidiert, das Nitrit von nitritoxidierenden Bakterien zu Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), das dann von den Pflanzenwurzeln aufgenommen werden kann. Die sorgfältige Kontrolle des Bakterienwachstums in aquaponischen Systemen ist daher von großer Wichtigkeit. Die nitrifizierenden (ammoniak- bzw. nitritoxidierenden) Bakterien benötigen eine gute Versorgung mit Sauerstoff und große biologische Oberflächen, um sich in ausreichender Zahl ansiedeln zu können (Deer et al. 2021). Parallel zur Förderung erwünschter Mikroorganismen, wie beispielsweise den nitrifizierenden Bakterien, muss das Wachstum unerwünschter Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Algen) kontrolliert werden. Die beteiligten Organismen (Pflanzen, Bakterien, Fische) haben teils unterschiedliche Ansprüche wie beispielsweise unterschiedliche Optima bei wichtigen Umweltfaktoren (wie beispielsweise Temperatur) sowie im pH-Wert des Kultivierungsmediums. Es müssen Kompromisse gefunden werden, um das benötigte ökologische Gleichgewicht stabil zu erhalten und ein gutes Fischwachstum als auch akzeptables Pflanzenwachstum zu erreichen.

Auch die Kontrolle und Entnahme von Abfall- bzw. Stoffwechselendprodukten aus solchen integrierten Systemen kann mit hohem Aufwand verbunden sein. Neben der regelmäßigen Entfernung von Schwebstoffen und Sedimenten ist auch zu beachten, dass nicht alle Stoffwechselprodukte von Fischen für Pflanzen verwertbar sind und auch Pflanzenwurzeln eine Vielzahl an Substanzen in das Kulturmedium abgeben, sodass über die Zeit eine Anreicherung von nicht oder schwer abbaubaren Substanzen eintreten kann. Diese können unerwünschte Auswirkungen auf das Wachstum von Fischen oder Pflanzen haben und zum Zusammenbruch des biologischen Gleichgewichts und/oder zu toxischen Effekten auf einen oder mehrere der Partnerorganismen im System führen.

Gegenwärtig wird intensiv an robusten Aquaponiksystemen geforscht. Auch in Deutschland und Europa sind in den letzten Jahren eine Reihe an (aktuell noch überwiegend kleineren) Firmen gegründet worden, die mithilfe verschiedener technischer Konzepte neue Kombinationen aus hydroponisch kultivierbaren Nutzpflanzenarten und geeigneten Fischarten testen. Ob die bestehenden technischen

Hürden zukünftig überwunden und Fische und Pflanzen nachhaltig, erschwinglich und in ausreichend großem Maßstab aquaponisch produziert werden können, bleibt gegenwärtig offen.

### 2.1.5 Fleisch aus dem Labor

Im Labor gezüchtetes Fleisch (Laborfleisch) wird seit einigen Jahren als nachhaltige und tierwohlfreundliche Alternative zur herkömmlichen Fleischproduktion diskutiert, die auch den Flächenverbrauch der Landwirtschaft reduzieren könnte. Laborfleisch stammt aus tierischen Zellkulturen, die aus dem Muskelgewebe von Nutztieren gewonnen werden. Aus dem Muskelgewebe werden im Labor teilungsfähige Zellen (sogenannte Stammzellen) isoliert, die dann in komplexen Nährmedien vermehrt werden (Schlieker et al. 2025). Anschließend werden die Zellen in Bioreaktoren („Fermentern“) weiter kultiviert und unter geeigneten Bedingungen zu Muskelgewebe herangezogen.

Aus **gesundheitlicher Sicht** wird diskutiert, dass Laborfleisch Vorteile gegenüber Fleisch aus konventioneller Tierhaltung bieten könnte: Vor allem der Verzehr von verarbeitetem und rotem (Rind-)Fleisch wird heute mit Entzündungskrankheiten und einem potenziell erhöhten Krebsrisiko<sup>46</sup> in Verbindung gebracht (Jakszyn et al. 2012; Bouvard et al. 2015). Als dafür maßgeblich verantwortliche zellschädigende Substanz wurde, neben einem hohen Gehalt an Fett, Salz und Nitraten in verarbeitetem Fleisch, das Häm identifiziert, eine eisenhaltige zelluläre Substanz (Ishikawa et al. 2010). Laborfleisch aus kultivierten Muskelzellen von Rindern könnte aufgrund fehlender Durchblutung weniger Häm enthalten als das stark durchblutete Muskelgewebe aus geschlachteten Rindern. Solche möglichen gesundheitlichen Vorteile sind momentan weitgehend hypothetisch und müssen in wissenschaftlichen Studien überprüft werden.

Weltweit arbeiten zahlreiche Unternehmen an der Entwicklung neuer Technologien, um Laborfleisch im größeren Maßstab und kostengünstiger zu produzieren (Gu et al. 2025). Momentan sind die Produktionskosten noch extrem hoch.<sup>47</sup> Trotz gewisser Kostensenkungen erscheint eine Reduzierung der Kosten auf ein konkurrenzfähiges Niveau gegenwärtig unrealistisch. Schlüssel zu einer substanziellen Reduzierung der Produktionskosten wären zum einen die Entwicklung neuer

---

46 IARC. 2015. [https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr240\\_E.pdf](https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr240_E.pdf)

47 Verbraucherzentrale NRW e.V. 2023. <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/lebensmittel/lebensmittelproduktion/clean-meat-ist-laborfleisch-die-zukunft-65071>

Technologien, die die Effizienz der Zellvermehrung und des Gewebewachstums steigern, und zum anderen die Entwicklung preiswerter Nährmedien und Kulturverfahren. Trotz jahrzehntelanger Forschung ist es bislang nicht gelungen, die komplexen und kostenintensiven Nährmedien zu vereinfachen und damit eine großtechnische Produktion tierischer Zellen zu ermöglichen (Choi et al. 2025). Insbesondere das sogenannte fötale Kälberserum, das aus dem Blut der Herzen noch ungeborener Kälber gewonnen wird, die dafür in großer Zahl getötet werden müssen, bleibt eine nahezu unverzichtbare Komponente vieler Medien. Aus tierethischer Sicht führt daher die Produktion von Laborfleisch gegenwärtig kaum zu einer Reduzierung des Tierleids.

Zur **Umweltbilanz** von Laborfleisch existieren aktuell keine verlässlichen Zahlen. Die komplexen Nährmedien, die neben dem fötalen Kälberserum zahlreiche Chemikalien (unter anderem Aminosäuren, Vitamine, Mineralsalze und Zucker) in zum Teil hohen Reinheitsgraden benötigen, lassen sich voraussichtlich nicht so preiswert und klimaschonend erzeugen, dass die Gesamtbilanz günstiger ausfallen kann als die der konventionellen Fleischproduktion (Nunes et al. 2025). Hinzu kommt der erhebliche Energiebedarf; nicht zuletzt durch die hohen Anforderungen an die Sterilität der Kulturen im gesamten Herstellungsprozess, um Kontaminationen mit Bakterien und Viren zu verhindern.

Vor dem Hintergrund dieser Faktoren ist eine ressourcenschonende, nachhaltige und tierwohlfreundliche Produktion von Laborfleisch gegenwärtig nicht möglich. Trotz technischer Verbesserungen in den Erzeugungsprozessen und weiterer Kostensenkungen, wird Laborfleisch in absehbarer Zukunft wohl bestenfalls ein Luxusprodukt in einem Nischenmarkt sein und voraussichtlich keinen substanziellen Beitrag zur globalen Lebensmittelproduktion leisten können. Aussichtsreicher erscheint die großtechnische Produktion einzelner Komponenten tierischer Nahrungsmittel, wie beispielsweise von Muskelproteinen, Fetten, Eier- bzw. Milchbestandteilen oder vollsynthetischen Milchprodukten (Lelis et al. 2025). Dies kann durch teilweise bereits etablierte mikrobielle Fermentationstechniken (engl. „precision fermentation“ oder auch „food fermentation“) in Kombination mit Technologien der synthetischen Biologie (siehe Kapitel 2.3.3) erreicht werden.<sup>48</sup> Die Produktion solcher Ersatzprodukte durch geeignete gentechnisch optimierte Mikroorganismen (Bakterien, Pilze) in großen Bioreaktoren ist wesentlich kostengünstiger als die Herstellung von Laborfleisch, da sie deutlich geringere Anforderungen an Nährmedien und Überwachung möglicher Kontaminationen durch Pathogene stellt.

---

48 <https://www.biocompounding.com/can-precision-fermentation-together-with-synthetic-biology-help-to-secure-our-food-systems/>

## 2.2 Innovative Technologien

### 2.2.1 Kreislaufwirtschaft

Eine Erhöhung der Kreislaufwirtschaft (Zirkularität) im aktuellen Agrar- und Ernährungssystem bringt zahlreiche Vorteile. Die Wiederverwendung von Rohstoffen senkt den Bedarf an benötigten Ressourcen und kann – muss aber nicht – mit verringerten Kosten einhergehen. Zudem minimiert sie die geopolitische Abhängigkeit von anderen Weltregionen, beispielsweise bei Phosphordünger (mit wenigen konzentrierten Vorkommen in Marokko und China) oder bei Stickstoffdünger (hauptproduzierende Länder sind beispielsweise Russland, China und Indien). Nicht-geschlossene Kreisläufe führen hingegen dazu, dass die Umwelt als Entsorgungsort für Reststoffe und Verschmutzung genutzt wird. So steht der gesamten Menge an neu fixiertem Stickstoff eine ebenso große Menge an Stickstoffverlusten gegenüber, welche auf dem Feld, in Ställen und Güllelagern, im Abwasser oder auf Mülldeponien landet. Ähnlich entstehen aus nicht-wiederverwertetem Kohlenstoff auf Mülldeponien Methanemissionen. Diese Verluste können zu erheblichen Umweltfolgen oder Entsorgungskosten führen, die nicht vollständig internalisiert (d. h. eingepreist) sind (Sutton et al. 2011).

Zirkularität bedeutet nicht nur, dass Stoffe wiederverwendet werden, sondern auch, dass sie zu einer möglichst hohen Wertschöpfung beitragen. So ergibt sich eine Rangordnung in der **Qualität der Wiederverwertung**: Diese reicht von der konsumtiven stofflichen Nutzung (beispielsweise als Nahrungsmittel) hin zur Nutzung als Zwischenprodukt (beispielsweise als Futtermittel oder Bodennährstoff), zur energetischen Nutzung (beispielsweise in der Müllverbrennungsanlage) bis hin zur Deponie oder gar der unkontrollierten Vermüllung. Mit sinkender Rangordnung nimmt auch der Grad der Zirkularität ab, da bei der Verbrennung beispielsweise nur ein Teil der Energie, nicht aber die Nährstoffe zurückgeführt werden. Eine Nutzung, die zu einer höheren Rangstufe führt, wird als Upcycling bezeichnet (beispielsweise die Aufwertung eines Nährstoffs zu einem Nahrungsmittel), während ein Übergang in eine niedrigere als Downcycling bezeichnet wird (beispielsweise die Verwertung von Lebensmittelresten in einer Biogasanlage). Oftmals verbindet ein Produktionsprozess Elemente von Up- und Downcycling: So werden in der Tierfütterung meist sowohl Getreide, welche für den menschlichen Verzehr geeignet wären, als auch Gras, Stroh oder Reststoffe aus der Lebensmittelverarbeitung verfüttert. Daraus entstehen Fleisch oder Milch sowie auch Gülle und Schlachtabfälle. Je besser Betriebe oder Gemeinschaften von Betrieben integriert ist, desto besser können Stoffe der jeweils höchsten Nutzungsklasse dem Kreislauf zugeführt werden.

Traditionelle Produktionssysteme waren häufig besser integriert als moderne, unter anderem aufgrund von Nährstoffknappheit, die wiederum die Betriebe zwang, Nährstoffverluste zu minimieren. Mit der Industrialisierung und Urbanisierung wurden die Produktionsketten zunehmend linearer. Nährstoffe im Abwasser der Städte gelangten nicht mehr zurück aufs Feld. In der Tierproduktion führten Skaleneffekte dazu, dass die Konzentration der Tierhaltung mit importiertem Futter so zunahm, dass die umliegende Agrarfläche die Nährstoffüberschüsse nicht mehr aufnehmen konnte. Die Verluste wurden wiederum mit günstigem Kunstdünger ausgeglichen. Ebenso erfordern die modernen Produktions- und Vermarktungsketten eine Homogenität des Ausgangsmaterials, wodurch viele Produkte und insbesondere Reststoffe vom Produktionsprozess ausgeschlossen werden. So kann Getreide mit niedrigem Proteingehalt zwar von klassischen Bäckereien verwendet werden, nicht aber von industriellen Backstraßen, die für eine kurze Teigführung mehr Klebeeiweiß benötigen, sodass dieses Getreide nur noch als Futtergetreide genutzt wird. Diese negativen externen Kosten der linearen Produktionsketten und das Potenzial an Kosteneinsparungen durch die Vermeidung von Verlusten, fördern aktuell das öffentliche Interesse an zirkulären Systemen.

Eine Vielzahl an **Praktiken** steht hier zur Verfügung und wird aktuell erforscht: Biogasanlagen ermöglichen die energetische Nutzung von Reststoffen unter Vermeidung der Emission von Methan und Ammoniak. Dies ermöglicht es, einen Großteil der Nährstoffe im Substrat zurück aufs Feld zu bringen. Bioreaktoren gehen noch einen Schritt weiter, indem sie Stoffe wie Alkohole oder Proteine aus den Reststoffen extrahieren. Weitere Ansätze sind vertikale Gemüsefabriken (siehe Kapitel 2.1.3) und Aquaponik-Systeme (siehe Kapitel 2.1.4). Insektenfarmen ermöglichen das Upcycling von Reststoffen in wertvolleres Protein, welches dann beispielsweise als Tierfutter genutzt werden kann. Moderne Kompostklos erlauben die Rückführung der Nährstoffe in den Exkrementen. Die meisten dieser Systeme sind nicht in sich zirkulär, da sie aufgrund von Reststoffproduktion nicht vollständig geschlossen sind. Durch die Kombination mehrerer Verfahren („Reihenschaltung“) kann jedoch ein hoher Grad an Zirkularität erreicht werden. Je nach Nutzungsart können einige der aktuellen Praktiken auch als ein Downcycling gelten, beispielsweise der Einsatz von Mais in Biogasanlagen. Die genaue Ausgestaltung der Zirkularität ist daher entscheidend für die Bewertung von Ökonomie und Ökologie.

## 2.2.2 Chemischer Pflanzenschutz

Pflanzenschutzmittel sind chemische oder biologische Wirkstoffe und typischerweise Gemische aus mehreren Stoffen. Aufgaben des Pflanzenschutzes und der dafür eingesetzten Wirkstoffe sind laut EU-Pflanzenschutzmittelverordnung:<sup>49</sup>

- Schutz von Nutzpflanzen und deren Erzeugnisse vor Schadorganismen, beispielsweise durch Insektizide, Fungizide, Rodentizide (Mittel zur Bekämpfung von Nagetieren),
- Beeinflussung von Wachstum und Physiologie von Pflanzen, beispielsweise durch Wachstumsregulatoren,
- Konservierung von Pflanzenerzeugnissen, beispielsweise durch Beizmittel für Saatgut und Vorratsschutzmittel oder
- Vernichtung unerwünschter Pflanzen oder Pflanzenteile, Hemmung des Wachstums oder Vorbeugung eines solchen Wachstum (Herbizide).

Als **Wirkstoffe** kommen in den verschiedenen Bereichen unterschiedliche Substanzen zum Einsatz. Es handelt sich dabei aus chemischer Sicht sowohl um rein organische Moleküle (beispielsweise Amide, Anilide, Carbamate, Pyrethroide, Benzimidazole) als auch um organische Zinn- und Phosphorverbindungen sowie rein anorganische Substanzen (beispielsweise Kupfersulfat). Eine große Herausforderung stellt die erforderliche Produktformulierung von mehreren Wirkstoffen, Emulgatoren, Stabilisatoren und weiteren Nichtwirkstoffkomponenten dar. Lediglich nach erfolgreicher Formulierung ist der gezielte Einsatz von Pflanzenschutzmitteln möglich. Von wesentlicher Bedeutung für die Herstellung von Schädlingsbekämpfungsmitteln sind die unvermeidlichen und mehr oder weniger schnell auftretenden Resistenzen (vergleichbar mit den Resistenzen gegen Antibiotika oder Anti-Malaria-Medikamente in der Humanmedizin). Somit besteht ein ständiger Bedarf an der Identifikation und Bereitstellung neuer Wirkstoffe. Diese Nachfrage wird durch den Klimawandel verstärkt.

---

49 Verordnung (EG) Nr. 1107/2009. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:309:0001:0050:de:PDF>

Im Bereich der **Agrochemie** liegt ein großes Potential in der effizienteren Dosierung der eingesetzten, in der Regel aufwändig synthetisierten Wirkstoffe. Häufig erfolgt eine Überdosierung aufgrund unzureichender Kenntnisse über die zur Erzielung der gewünschten Wirkung tatsächlich erforderlichen Mengen und einer ungleichmäßigen flächenbezogenen Verteilung. Ein zukünftiges Ziel muss es sein, geringere, optimal dosierte Wirkstoffmengen einzusetzen. Robotik und künstliche Intelligenz bieten hier bislang ungenutzte Möglichkeiten.

Die Problematik der Überdosierung wird im Bereich der Agrochemie durch den umfangreichen Einsatz von organischen Wirkstoffmolekülen verstärkt, die in zwei spiegelbildlich zueinander aufgebauten und als **Enantiomere** bezeichneten Formen existieren (Eliel et al. 2001). Die industriell eingesetzten klassischen nichtselektiven Synthesemethoden führen in der Regel zu 50:50-Gemischen aus beiden Molekülen (sogenannte Racemate). Seit der Contergan-Katastrophe wird in der pharmazeutischen Industrie der Tatsache außerordentliche Aufmerksamkeit geschenkt, dass in der Regel nur ein Enantiomer zur gewünschten Wirkung führt (Großbölting & Lenhard-Schramm 2017). Das Gegen-Enantiomer kann unerwünschte Nebeneffekte hervorrufen, wie im Fall des Contergan-Wirkstoffmoleküls Thalidomid. Die Ursache der Spezifität der Wirkung der Enantiomere beruht unter anderem darin, dass die Proteine der lebenden Materie hochselektiv nur aus einer Form von Aminosäuren aufgebaut sind, den sogenannten L-Aminosäuren (Meierhenrich 2008; Lin et al. 2011). In den letzten Jahrzehnten führten umfassende Anstrengungen zu zahlreichen im Pharmabereich intensiv genutzten Fortschritten auf dem Gebiet der asymmetrischen Synthese (Noyori 1994; Mikami & Lautens 2010). Zudem stehen zunehmend hocheffiziente Methoden der Chromatographie und Kristallisation bereit, um nicht-selektiv hergestellte Substanzgemische in die beiden Enantiomeren aufzutrennen (Lorenz & Seidel-Morgenstern 2014; Kort et al. 2016; Kort et al. 2017; Gänsch et al. 2021). Durch diese Fortschritte ist es der pharmazeutischen Industrie inzwischen möglich, reine Enantiomere von Wirkstoffmolekülen bereitzustellen und die entsprechenden strengen Auflagen der Regulierungsbehörden zu erfüllen (Collins et al. 1995).

Verglichen mit der pharmazeutischen Industrie setzt die Agrochemie einen weit größeren Anteil der für diesen Bereich relevanten chiralen Wirkstoffe als racemische Mischungen ein. Systematische und aufwändige Untersuchungen zur Bewertung der spezifischen Wirkung beider Enantiomere werden nicht durchgeführt. Von im Jahr 2013 eingesetzten 1.184 Wirkstoffmolekülen wiesen circa 300 Symmetriezentren und somit Enantiomerenpaare auf. Für lediglich 70 dieser Moleküle wurde die Bereitstellung eines als wirksam identifizierten Enantiomers ausgearbeitet (Meister Pro Crop Protection Handbook 2013). Die Tatsache, dass

außerordentlich große Mengen an unwirksamen Enantiomeren chiraler Agrochemikalien aufwändig synthetisiert und unnötigerweise ausgebracht werden, hat sich in den letzten Jahren nicht signifikant verändert. Hier besteht dringender Forschungs- und Handlungsbedarf (siehe Kapitel 5.4, Empfehlung 7).

### 2.2.3 Künstliche Intelligenz (KI) und Informationstechnologie (IT)

Der Einsatz von **KI-basierten Ansätzen in der Landwirtschaft** wird eine massive Veränderung bewirken. Diese Entwicklungen werden unter den Begriffen „Precision Agriculture“ oder „Smart Farming“ („Präzisionslandwirtschaft“) zusammengefasst (Wolfert et al. 2017).

- **KI und Diagnostik:** Der Einsatz von KI zur Analyse von Daten, die mittels Drohnen, Satelliten, automatisierten Landmaschinen und Robotern erhoben wurden, erlaubt deutlich präzisere Diagnosen über den Zustand des Feldes bzw. der Nutzpflanzen als bisher (Ghatrehsamani et al. 2023). Dies wiederum erlaubt unter (oder auch ohne) Beteiligung von Landwirt:innen eine deutlich gezieltere Intervention auf dem Feld, um optimales Wachstum und Ertrag der Nutzpflanzen sicherzustellen. Als ein Beispiel sei hier die KI-gestützte Diagnose von Pflanzenschädlingen genannt. KI-gestützte Diagnostik ist eine Echtzeit-Diagnostik. Beispielsweise erlaubt maschinelles Lernen auf mittels Drohnen erhaltenen multispektralen Daten schon heute die Unterscheidung von Pflanzenschädlingen, die sehr ähnliche Schadbilder verursachen, wie beispielsweise von verschiedenen Viren (Zhang et al. 2019; Li et al. 2021). Früher war dies nur nach Probennahme und Laboranalyse möglich.
- **KI und automatisierte Landmaschinen:** KI-gesteuerte Fahrzeuge und Maschinen, die mit Sensoren und Kameras ausgestattet sind, können verschiedene Aufgaben wie das Pflanzen, Ernten und Unkrautjäten ohne menschliche Beteiligung durchführen.
- **KI und Züchtung:** Die Einbeziehung genomischer und historischer Daten (beispielsweise Umweltbedingungen wie Wetter oder Bodenbedingungen sowie Ertrag) und der Vergleich mit aktuellen und prognostizierten Umweltdaten wird eine zügigere Entwicklung von angepassten Sorten erlauben (Xu et al. 2022).

Eine Kombination dieser Technologien bildet die Grundlage der Präzisionslandwirtschaft. Sie wird den Landwirt:innen ermöglichen, ihre Arbeitsabläufe zu optimieren, Ressourcen zu sparen und die Gesamtproduktivität zu steigern. Die kontinuierliche Entwicklung und Integration dieser Technologien trägt zur nachhaltigen und effizienten Zukunft der Landwirtschaft bei. Dabei ist jedoch davon auszugehen, dass aufgrund der hohen Investitionskosten zunächst die Großbetriebe von diesen Entwicklungen profitieren werden (John et al. 2023). Zudem müssen Aspekte der Datenhoheit geklärt werden.

Die Integration von **Robotersystemen, Drohnen und Satelliten in der Landwirtschaft** hat eine neue Ära der Präzisionslandwirtschaft eingeläutet, die es den Landwirt:innen ermöglicht, basierend auf fundierten Entscheidungen verschiedene Aspekte des Pflanzenmanagements zu optimieren (Phang et al. 2023). Einige Anwendungen und Einsatzbereiche werden im Folgenden kurz beschrieben.

- **Drohnen:** Mit Kameras und Sensoren ausgestattete Drohnen liefern Luftaufnahmen von landwirtschaftlichen Feldern. Aufgrund der relativ geringen Entfernung zu den Pflanzen entstehen hochauflösende Bilder, die auch innerhalb eines Feldes Bereiche mit hohem Schädlingsdruck, Mangel an Nährstoffen oder Wasser oder hohem Unkrautdruck zeigen (Kim et al. 2019; Chin et al. 2023). Folglich können Landwirt:innen bestimmte Gefahrensituationen (durch Schädlinge, Wachsen konkurrierender Wildkräuter) oder Mangelzustände (von Wasser, Mineralien) mit hoher räumlicher Auflösung behandeln, was mit einem geringeren Ressourcenverbrauch verbunden und daher ökonomisch und ökologisch vorteilhaft ist.
- **Robotik:** In der konventionellen Landwirtschaft übernehmen zunehmend autonome/selbstlernende Roboter eine Reihe von Arbeiten, die zuvor mit durch Menschen geführte Landmaschinen ausgeführt wurden. In der Nutztierhaltung ist der Melkroboter ein prominentes Beispiel. Für die Ackerflächen seien beispielhaft das Ausbringen von Saatgut, das Ernten der Pflanzen und, insbesondere interessant angesichts der potenziellen negativen Auswirkungen von Herbiziden auf die Umwelt, das Entfernen von konkurrierenden Wildkräutern genannt (Gerhards et al. 2022). Entscheidend wird dabei sein, dass es sich um selbstlernende Systeme handelt. Der Einsatz von Robotik, insbesondere in Kombination mit hochauflösenden Analysen der Situation auf den Feldern durch Drohnen, führt in der Regel zu geringeren Arbeitskosten und einer präziseren Durchführung der Arbeiten (Cheng et al. 2023).

- **Satellitengestützte Bildgebung:** Satellitenbeobachtungen zum großflächigen Monitoring der landwirtschaftlichen Felder sind bereits Realität, insbesondere in den durch riesige agrarische Betriebe geprägten Landwirtschaften, wie beispielsweise in Brasilien oder den USA. Ausgestattet mit verschiedenen Sensoren erfassen Satelliten Bilder und Daten über Ackerflächen und erfassen beispielsweise Daten über Bodenfeuchtigkeit, Nährstoffgehalt und anderer Umweltparameter (Sishodia et al. 2020). Diese Daten helfen unter anderem bei der Bewässerung und Düngung. Die räumliche Auflösung ist naturgemäß deutlich geringer als beim Einsatz von Drohnen, jedoch können, insbesondere durch den Einsatz von KI, präzise Aussagen zu den auf dem Feld vorherrschenden Bedingungen gemacht werden.
- **Automatisierte Traktoren und Maschinen:** Traktoren und andere landwirtschaftliche Maschinen werden zunehmend mit Automatisierungstechnologien ausgestattet. Dazu gehören GPS-Leitsysteme sowie automatische Lenkung und Steuerungssysteme, die Routen optimieren und mit hoher Präzision Arbeiten durchführen. Darüber hinaus werden vermehrt an den Maschinen anzubringende Sensoren entwickelt, die online Daten zum Zustand des Feldes und der Nutzpflanzen (wie beispielsweise Bodenbedingungen, Wetter, Schädlingsbefall) übermitteln und so eine rasche Reaktion von Landwirt:innen auf die jeweilige Situation erlauben (Bock et al. 2020; Shin et al. 2023).

## 2.3 Moderne Züchtungstechniken

### 2.3.1 Gentechnik

Gentechnisch veränderte Nutzpflanzensorten leisten seit mehr als 20 Jahren einen bedeutenden Beitrag zur globalen Nahrungsmittelproduktion. Bereits im Jahr 2013 wurden auf mehr als 10 % der weltweiten Agrarfläche transgene Pflanzen angebaut (Nature 2013). Die Verbreitung variiert stark nach Nutzpflanzenart und ist dort am höchsten, wo die Vorteile der transgenen Sorten gegenüber den konventionell gezüchteten Sorten überwiegen. Während der gentechnisch veränderte Anteil bei Sojabohnen (>80 %), Baumwolle, Mais und Raps sehr hoch ist, ist er momentan bei anderen wichtigen Kulturpflanzen wie Reis oder Weizen noch niedrig (Nature 2013; Bock 2015; News in Brief 2021).

Gentechnisch veränderte Nutzpflanzen der ersten Generation zielten in erster Linie darauf ab, **Ernteverluste durch Schädlinge, Unkräuter und Pflanzenkrankheiten** einzudämmen (siehe Kapitel 1.3.3). Da die Verluste im Durchschnitt etwa ein Drittel der theoretisch möglichen Ernte ausmachen, sind sie eine zunehmende Bedrohung der weltweiten Nahrungsmittelversorgung (Savary et al. 2019 und <sup>50</sup>). Die Eindämmung von verheerenden Pandemien in der Landwirtschaft zählte folglich zu den ersten Erfolgen der Gentechnik. So ist beispielsweise die Produktion von Papaya (*Carica papaya*) massiv von sogenannten „Papaya Ringspot“-Viren (PRV), insbesondere auf Hawaii, betroffen, die Ertragsverluste von über 50 % hervorrufen können. In den 1990er Jahren drohte der gesamte Anbau zum Erliegen zu kommen. Innerhalb kürzester Zeit gelang es jedoch, virusresistente Papayasorten mit einem gentechnischen Verfahren zu entwickeln (Liu et al. 2004; Yue et al. 2022), indem eine PRV-Gensequenz in das Papayagenom eingefügt wurde, welche gewissermaßen zu einer Immunisierung gegen das Virus führte. Seit der Zulassung der ersten transgenen virusresistenten Papayasorte in den USA im Jahr 1996 stammt der Großteil der Papayaproduktion auf Hawaii aus solchen transgenen Sorten – eine konventionelle Züchtung von PRV-resistenten Papayas ist bis heute nicht möglich.

Eine vergleichbare Bedrohung betrifft aktuell den globalen Bananenanbau. Kommerziell angebaute Bananen (*Musa* sp.) produzieren samenlose Früchte und können nicht durch herkömmliche Kreuzungszüchtung optimiert werden. Die heute weltweit dominierende Bananensorte Cavendish stammt aus einem Gewächshaus von William Cavendish, Duke of Devonshire, der im frühen 19. Jahrhundert Bananen aus China auf seinem Landgut kultivierte. Alle Cavendish-Bananen sind Abkömmlinge („Klone“) einer einzigen Bananenstaude und werden aufgrund der samenlosen Früchte ausschließlich vegetativ (d. h. durch Ableger, auch Schösslinge oder Absenker genannt) vermehrt (Dale et al. 2017). Die Cavendish-Sorte erzielt hohe Erträge, ist industriell gut verarbeitbar und hat eine kompakte Wuchsstatur, die einen effizienten, platzsparenden und wenig gegen Starkwind- und Sturmschäden anfälligen Anbau ermöglicht. Anfänglich schien die Cavendish-Sorte auch robuster gegen Pilzerkrankungen zu sein, die den bis dahin angebauten Bananensorten schwer zu schaffen machten. Seit einigen Jahren wird der Cavendish-Anbau allerdings massiv von neuen Pilzkrankheiten bedroht, insbesondere durch die sich immer weiter ausbreitende Panamakrankheit, verursacht von einem Stamm des Pilzes *Fusarium oxysporum*, der als TR4 (engl. „Tropical Race 4“). Durch Befall der Wurzeln vernichtet er innerhalb kürzester Zeit ganze Plantagen. Eine effektive

---

50 EASAC. 2013. <https://easac.eu/publications/details/planting-the-future-opportunities-and-challenges-for-using-crop-genetic-improvement-technologies-for-sustainable-agriculture>

chemische Bekämpfung durch sogenannte Fungizide ist nicht möglich, sodass sich die weitere Ausbreitung des Erregers schwer aufhalten lässt. Die vegetative Vermehrung der Bananenpflanzen macht die Suche nach natürlichen Resistenzen gegen die Panamakrankheiten nahezu aussichtslos. Geeignete Resistenzgene existieren zwar in Wildarten von Bananen; diese sind jedoch für den kommerziellen Anbau nicht geeignet (Dale et al. 2017). Eine Übertragung dieser Resistenzgene auf die Cavendish oder andere kommerziell angebaute Sorten durch Kreuzungszüchtung ist aufgrund der fehlenden Samenbildung nicht möglich. Vor 20 Jahren wurden geeignete Resistenzgene in das Genom der Cavendish-Banane mittels Gentechnik eingebaut und so Pflanzen erzeugt, die resistent gegen TR4 sind (Dale et al. 2017), und man hat so eine drohende weltweite Pandemie durch die Panama-Krankheit noch rechtzeitig abwenden können.

Auch die Herausforderungen des Klimawandels stehen im Mittelpunkt gentechnischer Forschung. Eine Reihe vielversprechender gentechnischer Strategien zielen darauf ab, neue Pflanzensorten zu erzeugen, die toleranter gegen extreme Temperaturen sind, weniger Wasser benötigen, mit weniger Düngemitteln auskommen und gleichzeitig hohe Ernteerträge liefern (unter anderem Bailey-Serres et al. 2019; Mega et al. 2019; News in Brief 2021; Wei et al. 2022). Auch neue gentechnisch erzeugte Nutzpflanzensorten mit verbessertem Nährwert und gesundheitsförderlichen Inhaltsstoffen werden entwickelt. Eines der ersten Produkte dieser Art war der sogenannte **Goldene Reis** – eine gentechnisch veränderte Reissorte, mit der eine der schlimmsten und am weitesten verbreiteten Mangelkrankungen bekämpft werden kann: Laut Statistiken der Weltgesundheitsorganisation (WHO)<sup>51</sup> erblinden insbesondere in Afrika und Asien jährlich bis zu eine halbe Million Kleinkinder aufgrund einer Mangelversorgung mit Vitamin A, wovon etwa die Hälfte innerhalb eines Jahres sterben, oft bevor sie das 5. Lebensjahr erreichen (Roberts 2018). Das menschliche Auge benötigt für ein funktionierendes Sehpigment, das Rhodopsin, Vitamin A, welches in seiner Vorstufe Provitamin A über die Nahrung aufgenommen werden kann. Provitamin A ist in Reis, dem Hauptnahrungsmittel in vielen Entwicklungsländern in Afrika und Südostasien, nahezu nicht enthalten. Im Goldenen Reis wurde mit gentechnischen Methoden der Stoffwechselweg für die Provitamin A-Biosynthese eingebracht, sodass in den Reiskörnern ausreichend Provitamin A hergestellt wird, was Erblindung und Tod verhindert (Al-Babili & Beyer 2005; Paine et al. 2005). Trotz offensichtlichen Nutzens, nachgewiesener Überprüfung der biologischen Sicherheit und langer Erprobung wurde die Zulassung in Asien und Afrika über zwei Jahrzehnte von Aktivist:innen

---

51 WHO. <https://www.who.int/data/nutrition/nlis/info/vitamin-a-deficiency>

und juristischen Verfahren blockiert. Im Jahr 2023 konnten erstmalig 70 Tonnen Goldener Reis auf den Philippinen geerntet werden.<sup>52</sup> Der weitere Anbau wurde jedoch vorerst durch eine Entscheidung des obersten Gerichts des Landes (unter Berufung auf eine spezielle Klausel im nationalen Recht) untersagt – eine endgültige Entscheidung über die Zukunft steht noch aus. Dass durch die Verhinderung der Einführung des Goldenen Reis der Tod hunderttausender Kinder in den ärmsten Ländern der Welt von überwiegend westlich geprägten Gruppierungen von Aktivist:innen billigend in Kauf genommen wird, hat zu einem eindringlichen Appell von über einhundert Nobelpreisträger:innen geführt (Roberts 2018). Darin wird die Vorgehensweise von Greenpeace angeprangert und dazu aufgefordert, zügig zu einem rationalen Umgang mit der Gentechnik in der Pflanzenzüchtung zu kommen und das große Potenzial der Technik für die Lösung der dringenden Probleme auf unserem Planeten nicht weiter ungenutzt zu lassen.

Deutschland und die meisten anderen Länder der EU pflegen seit Jahren einen **irrationalen Umgang mit der Gentechnik** (Bock 2015). Während der Anbau gentechnisch veränderter Pflanzensorten weitestgehend eingeschränkt bzw. durch hohe Zulassungshürden behindert wird, werden gleichzeitig in riesigem Umfang gentechnisch veränderte Nahrungs- und Futtermittel importiert (Nature 2013; Bock 2015). Ohne Soja als proteinreichem Futtermittel kann die Produktion von Fleisch, Milch und Eiern nicht annähernd den hohen Bedarf in der EU decken und so werden jährlich etwa 35 Millionen Tonnen (überwiegend transgene) Sojabohnen in die EU eingeführt – das entspricht ungefähr 65 kg pro EU-Bürger:in (Nature 2013; Bock 2015). Ausnahmen vom De-facto-Anbauverbot auf EU-Territorium gibt es momentan nur in den Regionen, in denen der Wechsel zu transgenen Sorten aufgrund der Notlage von Landwirt:innen unumgänglich ist: Beispielsweise sind in Spanien die Ernteverluste durch Insektenfraß im Maisanbau so massiv, dass sich die Ernten in Teilen des Landes nur noch durch den Anbau transgener insektenresistenter Sorten retten lassen.

Als **Argumente gegen die Nutzung der Gentechnik** in der Landwirtschaft werden üblicherweise mögliche Risiken für Mensch oder Umwelt angeführt (Ellstrand 2001; Dale et al. 2002; Ammann 2005; Raven 2014; Sánchez & Parrott 2017). Inzwischen liegen jedoch umfangreiche Erfahrungen aus mehr als 30 Jahren Anbau, Verfütterung und Verzehr von transgenen Nutzpflanzen im großen Maßstab sowie Ergebnisse einer äußerst umfangreichen Sicherheitsforschung vor und es ist bisher kein Mensch zu Schaden gekommen. In über 10.000 wissenschaftlichen

---

52 Transparenz Gentechnik. <https://www.transgen.de/forschung/428.goldener-reis-vitamin-augenerkrankungen.html>

Tier- und Humanstudien wurden keine negativen Auswirkungen auf Gesundheit oder Umwelt nachgewiesen. Einige wenige Studien behaupteten zwar – oft begleitet von großem Medienecho – das Gegenteil, jedoch stellten sich diese später als wissenschaftlich grob fehlerhaft und nicht reproduzierbar heraus (Sánchez & Parrott 2017). Sofern überhaupt Unterschiede zu konventionellen Sorten festgestellt wurden, dann hatten diese ausschließlich positive Effekte: höhere Erträge und geringere Schadstoffbelastung der gentechnisch erzeugten Lebensmittel, beispielsweise mit Pestiziden, Pilzgiften und anderen Schadstoffen (Huang et al. 2005). Auch technologiespezifische negative Umweltauswirkungen lassen sich nicht feststellen (Pimentel & Raven 2000; Shelton & Sears 2001). Fälschlicherweise werden in der öffentlichen Diskussion generelle Probleme der landwirtschaftlichen Praxis (wie beispielsweise Monokulturen, Saatgutmonopole, Entwicklung von Resistenzen von Schädlingen und Krankheitserregern gegen chemische oder biologische Pflanzenschutzmittel) als Probleme der Gentechnik dargestellt.

Nach Jahrzehnten intensiver Sicherheitsforschung gilt die Gentechnik als sicher und gesundheitlich unbedenklich (Raven 2014; Sánchez & Parrott 2017). Viele Länder sind daher von einer ursprünglich technologiebasierten zu einer produktbasierten Bewertung neuer Pflanzensorten übergegangen.<sup>53</sup> Dabei wird untersucht, welche neuen Eigenschaften (unter anderem Inhaltsstoffe) die neue Sorte gegenüber geeigneten Vergleichssorten aufweist (Einzelfallbewertung, engl. „case-by-case assessment“). Während dieser Ansatz seit vielen Jahren beispielsweise in den USA und Kanada gängige Praxis ist, hält die EU momentan noch am technologiebasierten Bewertungsansatz fest. Seit vielen Jahren fordern Akademien und Wissenschaftsorganisationen eine zeitgemäße, dem Stand der Wissenschaft entsprechende Regulierungspraxis, die internationalen Standards angepasst ist.<sup>54</sup> Momentan ist diese jedoch nicht in Sicht. Die Bedeutung gentechnischer Verfahren für die Landwirtschaft wird weiter wachsen. Dafür sprechen mehrere Gründe:

---

53 EASAC. 2014. <https://easac.eu/publications/details/risks-to-plant-health-european-union-priorities-for-tackling-emerging-plant-pests-and-diseases>, EFSA. 2013. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3200>

54 Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften und Deutsche Forschungsgemeinschaft. 2019. <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/wege-zu-einer-wissenschaftlich-begrundeten-differenzierten-regulierung-genomeditierter-pflanzen-in-der-eu-2019/>

- Das weltweite Bevölkerungswachstum und die Bekämpfung von Hunger und Unterernährung erfordern eine beschleunigte Züchtungsforschung mit deutlichen jährlichen Ertrags- und Nährstoffsteigerungen.
- Viele Züchtungsziele können mit klassischer Züchtungsforschung nicht erreicht werden.
- Die Herausforderungen des voranschreitenden Klimawandels und anderer globaler Krisen stellen eine ernsthafte zusätzliche Bedrohung für die Nahrungsmittelproduktion der Zukunft dar. Gentechnische Lösungen bieten großes Potenzial, widerstandsfähigere Pflanzensorten zu züchten, die den Bedingungen des Klimawandels trotzen können (wie beispielsweise eine kürzlich für den kommerziellen Anbau in Südamerika zugelassene trockenresistente transgene Weizensorte; News in Brief 2021).
- Mit den neuen Möglichkeiten der synthetischen Biologie wird sich das Anwendungsspektrum transgener Technologien noch einmal deutlich verbreitern (siehe Kapitel 2.3.3).
- Eine nachhaltige, pflanzenbasierte Bioökonomie, die zusätzlich zu Lebensmitteln auch erneuerbare Rohstoffe, Treibstoffe und Ausgangsstoffe für eine neue, „grüne“ Chemie liefert, ist ohne gentechnische und synthetisch biologische Verfahren nicht realisierbar.

Im Gegensatz zur „grünen“ Gentechnik ist der Einsatz der **Gentechnik in der Tierzucht** momentan noch sehr überschaubar und in der EU sind derzeit keine gentechnisch veränderten Nutztiere für die Nahrungsmittelproduktion zugelassen.<sup>55</sup> In Nordamerika erreichten schnell wachsende Lachse (Salmoninae) als erste gentechnisch veränderte Tiere den Markt.<sup>56</sup> Hier wurden vor circa 25 Jahren Lachsen Fremdgene aus einer anderen Fischart eingesetzt, die zu einer verstärkten Synthese eines Wachstumshormons führten. Dadurch wurde zum einen ein kontinuierlicheres Wachstum über den gesamten Jahresverlauf und zum anderen ein insgesamt schnelleres Wachstum erreicht, sodass die Fische deutlich früher ihr Schlachtgewicht von etwa 6 kg erreichen. Das Zulassungsverfahren war ausgesprochen langwierig: Der erste Zulassungsantrag wurde 1995 gestellt, die Zulassung als

---

55 EFSA. 2025. <https://www.efsa.europa.eu/de/topics/topic/genetically-modified-animals>

56 Transparenz Gentechnik. <https://www.transgen.de/tiere/392.gentechnisch-veraenderter-lachs.html>

Lebensmittel erfolgte (nach intensiver Prüfung und Sicherheitsbewertung) in Kanada im Jahr 2017 (Waltz 2017), gefolgt von der Zulassung für Import und Produktion in den USA und Brasilien. Gesundheitliche Risiken für die Konsument:innen wurden nicht identifiziert. Aufzucht und Vermehrung der Fische sind nur in abgeschlossenen Anlagen erlaubt, um eine unbeabsichtigte Freisetzung in die Umwelt zu verhindern. Es ist zu erwarten, dass zukünftig weitere gentechnische Anwendungen in der Tierzucht Marktreife erreichen und Zulassungsanträge für Import bzw. Produktion auch in der EU gestellt werden.

### **2.3.2 Neue Züchtungstechniken (Genomedierung)**

Die neuen Züchtungstechniken nutzen insbesondere die Werkzeuge der sogenannten Genomedierung (umgangssprachlich irrtümlich aus dem Englischen als „Genomeditierung“ übersetzt). Die 2020 mit dem Nobelpreis gewürdigte CRISPR/Cas-Technik („Genschere“) ist das bei weitem bekannteste und derzeit effizienteste Verfahren (Gaj et al. 2013; Wright et al. 2016; Komor et al. 2017; Zhu & Gao 2020; Gao 2021). Neben „Scheren“, mit denen im Regelfall Gene inaktiviert werden, indem sie den DNA-Doppelstrang an einer definierten Stelle durchschneiden, ist in den letzten Jahren eine ganze Reihe an noch präziseren CRISPR/Cas-Werkzeugen entwickelt worden, die beispielsweise gezielt einzelne Nukleotidbasen im Genom verändern (mutieren). Diese sogenannten Baseneditoren verursachen keine DNA-Strangbrüche, sodass die damit erzielten Veränderungen im Genom wesentlich kleiner (und oft auf ein einziges Nukleotid beschränkt) sind und gleichzeitig viel exakter vorhergesagt werden können (Kim 2018; Rees & Liu 2018; Molla et al. 2021; Tan et al. 2022).

In ihrem Ergebnis – der Einbringung von Mutationen in ein Genom – entspricht die Genomedierung der klassischen Mutationszüchtung. Sie stellt somit lediglich eine weitere Mutagenesetechnik dar, vergleichbar mit der seit vielen Jahrzehnten sehr erfolgreich in der Pflanzenzüchtung eingesetzten strahleninduzierten Mutagenese, bei der die Mutationen durch radioaktive Bestrahlung von Saatgut ausgelöst werden. Im Gegensatz dazu werden mit den Methoden der Gentechnik transgene Organismen erzeugt, die auch als gentechnisch veränderte Organismen (GVOs) bezeichnet werden und rekombinante, d.h. künstliche (und häufig artfremde) DNA enthalten. Dies ist bei der Genomedierung nicht der Fall, auch wenn im Einzelfall Gentechnik für technische Zwischenschritte in der Genomedierung verwendet werden kann (was aber nicht zwingend notwendig ist). Davon unabhängig kann Genomedierung nahezu immer so ausgeführt werden, dass das Endprodukt (beispielsweise die neue Pflanzensorte) keine Fremd-DNA enthält

(<sup>57</sup> und Bock & Dederer 2022; Bock et al. 2023). Eine durch Genomedierung erzeugte neue Sorte ist daher im Normalfall frei von rekombinanter DNA und erfüllt nicht die wissenschaftliche Definition eines transgenen Organismus (Arnold 2023). Die Ununterscheidbarkeit einer durch Genomedierung ausgelösten Mutation von einer spontan und natürlich aufgetretenen Mutation in der DNA macht zudem Nachweisverfahren für den Einsatz von Genomedierung technisch unmöglich. Da Mutageneseverfahren in der EU nicht gesondert reguliert sind, hat der Europäische Gerichtshof sie in einem Urteil von 2018 so eingestuft, dass ihre Produkte nach aktuellem EU-Recht prinzipiell in den Geltungsbereich des Gentechnikgesetzes fallen.<sup>58</sup> Es wurde klargestellt, dass dies sowohl für die konventionellen als auch für die neuen (auf Genomedierung basierenden) Mutageneseverfahren gilt. Dabei steht es dem Gesetzgeber frei, Ausnahmen zu beschließen – für die strahleninduzierte Mutagenese ist dies bereits geschehen. Die EU-Kommission hat im Jahr 2023 einen ähnlichen Vorschlag für genomedierte Pflanzensorten gemacht, der 2024 vom Europäischen Parlament angenommen wurde und der Zustimmung der Mitgliedstaaten bedarf. Wird dies bestätigt, werden bestimmte genomedierte Pflanzensorten, die keine fremde Erbinformation tragen, Pflanzen aus konventionellen Züchtungsverfahren weitgehend gleichgestellt. Damit würde die EU internationalen Standards folgen und einen wissenschaftlich und juristisch äußerst problematischen Sonderweg vermeiden (<sup>59</sup> und Bock & Dederer 2022; Bock et al. 2023).

Die Genomedierung und verwandte neue Züchtungstechniken werden auch unter dem Begriff der **Präzisionslandwirtschaft** erfasst, da sie Mutationen zielgerichtet an der benötigten Stelle im Genom einfügen können. Im Unterschied dazu treten Mutationen, die spontan und natürlich entstehen oder durch herkömmliche Mutagenesetechniken induziert werden, an zufälligen Stellen auf. Um die

---

57 Ständige Senatskommission für Grundsatzfragen der Gentechnik der Deutschen Forschungsgemeinschaft. 2023. <https://www.dfg.de/resource/blob/176056/position-genomeditierte-pflanzen-de.pdf>, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften und Deutsche Forschungsgemeinschaft. 2019. <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/wege-zu-einer-wissenschaftlich-begrundeten-differenzierten-regulierung-genomeditierter-pflanzen-in-der-eu-2019/>

58 Europäische Kommission. <https://curia.europa.eu/juris/documents.jsf?num=C-528/16>

59 Ständige Senatskommission für Grundsatzfragen der Gentechnik der Deutschen Forschungsgemeinschaft. 2023. <https://www.dfg.de/resource/blob/176056/position-genomeditierte-pflanzen-de.pdf>, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften und Deutsche Forschungsgemeinschaft. 2019. <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/wege-zu-einer-wissenschaftlich-begrundeten-differenzierten-regulierung-genomeditierter-pflanzen-in-der-eu-2019/>

gewünschte Mutation zu finden und von den vielen anderen unerwünschten (und möglicherweise nachteiligen) zu trennen, sind aufwändige und langwierige Verfahren notwendig (Arnold 2023). Genomedierung bietet zwei entscheidende Vorteile gegenüber der konventionellen Züchtung: Sie ist wesentlich präziser und schneller. Bei Pflanzenarten, die viele Kopien eines Gens haben, die alle verändert werden müssen, um die gewünschte Eigenschaft zu erhalten (sogenannte polyploide Pflanzen; Stokstad 2022), können sogar Jahrzehnte eingespart werden. Insbesondere die Weizenzüchtung kann nur sehr langsam und mit hohem Aufwand durch klassische Mutationszüchtung vorangebracht werden kann, da das Weizen-genom eine außerordentlich komplexe Struktur aufweist und von fast jedem Gen sechs Kopien enthält. Um ein Merkmal in gewünschter Weise verändern zu können, müsste man also geeignete Mutationen in allen sechs Genkopien finden. Dies ist extrem schwierig und trotz jahrzehntelanger Bemühungen noch nicht wirklich gelungen. Ein großer Vorzug der Genomedierungstechniken ist, dass sie relativ leicht die gleichzeitige Veränderung aller sechs Genkopien bewirken können (Stokstad 2022). So wurde beispielsweise innerhalb kürzester Zeit eine neue Weizensorte erzeugt, die gegen Mehltau, eine der verheerendsten Pilzkrankheiten im Getreideanbau, resistent ist und den Einsatz von Pestiziden überflüssig macht (Stokstad 2022).

Das große Potenzial der Genomedierung für die Landwirtschaft ist inzwischen auch von vielen ursprünglich kritischen Parteien und Gruppierungen erkannt worden. Das Grüne Netzwerk Evidenzbasierte Politik, ein Kompetenznetzwerk innerhalb der Partei BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, veröffentlichte beispielsweise eine ausgewogene, wissenschaftlich fundierte Darstellung unter dem Titel „Faktencheck: Neue Gentechniken in der Landwirtschaft“.<sup>60</sup>

Die technisch einfache Umsetzung der Genomedierungsverfahren in Pflanzen hat in kürzester Zeit zu einer **Vielzahl praktischer Anwendungen** geführt. Eine Reihe an Anwendungen hat bereits in Ländern Asiens sowie Nord- und Südamerikas die Zulassung für den kommerziellen Anbau erhalten. Eine aktuelle Übersicht über genomedierte Nutzpflanzen und ihre neuen Eigenschaften bietet das Netzwerk „European Sustainable Agriculture Through Genome Editing“.<sup>61</sup> Die Anwendungen umfassen alle Bereiche der Pflanzenzüchtung, wie beispielsweise Resistenzen gegen Schädlinge und Pflanzenkrankheiten, Toleranzen gegen widrige Umweltbedingungen (Trockenheit, Hitze, Nährstoffmangel), Verbesserung von

---

60 Roth & Kaufmann. 2024. <https://evidenzbasierte-politik.de/2024/01/23/faktencheck-neue-gentechniken-in-der-landwirtschaft/>

61 EU-SAGE. <https://www.eu-sage.eu/genome-search>

Wachstum, Ertrag, Lebensmittelqualität sowie der Verarbeitung und Lagerfähigkeit von Nahrungsmitteln. Zu den ersten kommerziell vermarkteten Produkten gehörten in den USA Champignons, die länger haltbar sind (und weniger schnell braun werden) (Waltz 2016) sowie eine neue Tomatensorte mit erhöhtem Gehalt eines gesundheitsförderlichen Inhaltsstoffes in Japan.<sup>62</sup>

Die Genomedierung markiert einen Paradigmenwechsel in der Pflanzenzüchtung. Aufgrund ihrer Präzision und Schnelligkeit werden die Genomedierungstechniken in absehbarer Zeit die klassischen Verfahren der Mutationszüchtung (wie beispielsweise die strahleninduzierte Mutagenese) weitgehend ablösen. Dies wird die Züchtungsforschung erheblich beschleunigen und entscheidend zu den dringend benötigten Ertragssteigerungen in der weltweiten Nahrungsmittelproduktion beitragen.

Auch in der **Tierzucht** werden die neuen Züchtungstechniken zunehmend angewandt, trotz der hohen Zulassungshürden für gentechnisch veränderte Nutztiere:

- In Japan wurden im Jahr 2021 genomedierte Rote Meerbrassen und Kugelfische zugelassen. In diesen wurde das Gen für einen Hormonrezeptor, der an der Appetitkontrolle beteiligt ist, mit der CRISPR/Cas-Technik ausgeschaltet, so dass die Fische mehr Futter aufnehmen, dadurch deutlich schneller wachsen und mehr Fleisch ansetzen (News in Brief 2022), vergleichbar den gentechnischen Verfahren in transgenen Lachsen, die bereits seit 2017 vermarktet werden (Waltz 2017; siehe Kapitel 2.3.1).
- Im Jahr 2022 wurden in den USA erstmals eine genomedierte Rinderrasse zugelassen, die durch ein kürzeres und glattes Fell weniger hitzeanfällig ist und weniger unter den Folgen des Klimawandels leidet. Die höhere Stresstoleranz trägt zu einer höheren Fleisch- und Milchproduktion bei.

Da die Genomedierung keine Fremd-DNA einbringt, dürfen sowohl das Fleisch als auch das für die Zucht verwendete Sperma ohne Auflagen und ohne Kennzeichnung vermarktet werden.<sup>63</sup> In der EU sind derzeit noch keine genomedierte Nutztiere für die Nahrungsmittelproduktion zugelassen, doch mit der erwarteten Deregulierung der Genomedierungstechniken ist künftig mit Zulassungsanträgen in der EU zu rechnen.

---

62 <https://www.isaaa.org/kc/cropbiotechupdate/article/default.asp?ID=18668>

63 Transparenz Gentechnik. <https://www.transgen.de/tiere/996.gentechnisch-veraenderte-tiere-fragen-antworten.html>

### 2.3.3 Synthetische Biologie

Unter „synthetischer Biologie“ werden verschiedene Forschungsansätze zusammengefasst, die die Entwicklung von biologischen Systemen mit neuen Funktionalitäten beinhalten. Die Abgrenzung zu traditionellen Verfahren der Biotechnologie und Gentechnik ist dabei unscharf, und komplexe oder sehr umfangreiche gentechnische Modifikationen werden häufig ebenfalls als „synthetische Biologie“ bezeichnet.<sup>64</sup> Neben der Größenordnung der genetischen Veränderungen gelten eine deutlich erkennbare Designkomponente sowie ein hoher Grad an Verschiedenheit von natürlich existierenden biologischen Systemen gewöhnlich als charakteristische Merkmale. Synthetische Biologie ist somit eher eine strategische Herangehensweise als eine klar abgegrenzte Forschungsdisziplin mit eigenem Methodenspektrum.<sup>65</sup> Synthetisch-biologische Ansätze verbinden gentechnische Verfahren mit Konzepten, Prinzipien und Methoden aus Informatik, Kybernetik und anderen Bereichen der Ingenieurwissenschaften. Besonders **radikale Konzepte** umfassen:

- die vollständige chemische Synthese von Genomen nach neuen Konstruktionsprinzipien (Cambray et al. 2011; Scharff & Bock 2014; Casini et al. 2015),
- das Entwerfen von künstlichen Zellen und Zellorganellen (Roodbeen & van Hest 2009; Delaye & Moya 2010) und
- die Synthese neuartiger Biomoleküle in lebenden Zellen, wie beispielsweise Nukleinsäuren mit verändertem oder erweitertem genetischen Alphabet (gegenüber dem Standardsatz der vier Nukleobasen A, C, G und T) oder Proteine mit mehr als den natürlich vorkommenden 20 Aminosäuren durch einen erweiterten genetischen Code (Appella 2009; Young & Schultz 2010; Neumann 2012; O'Donoghue et al. 2013; Des Soye et al. 2015; Chin 2017; de la Torre & Chin 2021).

---

64 Ständige Senatskommission für Grundsatzfragen der Gentechnik der DFG. 2018. <https://www.dfg.de/resource/blob/173396/3e279ebf0539b9bcc25138b7ffb458eb/181008-synthetische-biologie-standortbestimmung-data.pdf>

65 European Plant Science Organisation. 2017. [https://epsoweb.org/wp-content/uploads/2018/11/17\\_08\\_30\\_EPSO\\_Synthetic-Biology\\_updated-Statement.pdf](https://epsoweb.org/wp-content/uploads/2018/11/17_08_30_EPSO_Synthetic-Biology_updated-Statement.pdf)

**Ansätze im Grenzbereich zwischen Gentechnik und synthetischer Biologie** sind etwa:

- die Synthese neuartiger Stoffwechselprodukte („Metabolite“; Facchini et al. 2012; Fuentes et al. 2016; Long et al. 2016; Nielsen et al. 2016),
- das Design neuer Regelkreise bzw. Schaltkreise zur Kontrolle der Genexpression (Liu & Stewart Jr. 2015; Boehm & Bock 2019; Wurtzel et al. 2019) und
- die Konstruktion von künstlichen Chromosomen (Puchta & Houben 2024).

Gewaltige Fortschritte bei den Technologien zur Synthese und Assemblierung sehr großer DNA-Abschnitte (Ma et al. 2012; Patron 2014) und die rasante Entwicklung neuer Methoden der Genomedierung (siehe Kapitel 2.3.2) haben die Möglichkeiten der synthetischen Biologie erheblich erweitert und zu intensiver Forschungsaktivität geführt.

**Zentrale Konzepte** in der synthetischen Biologie sind beispielsweise der Aufbau von großen Sammlungen („Banken“) an synthetischen DNA-Elementen (wie Gene und regulatorische Sequenzen), die sich frei kombinieren lassen, um effizient komplexe neue Funktionalitäten aufzubauen, und die Ausführung von Zyklen aus Entwerfen, Bauen, Testen und Lernen (engl. „design – build – test – learn cycles“). Dabei wird eine neue Funktionalität zunächst nach gewissen Konstruktionsprinzipien am Reißbrett entworfen („design“), dann als DNA-Konstrukt synthetisiert („build“) und in den Zielorganismus eingebracht, um sie dort auf Funktionsfähigkeit zu prüfen („test“) und notwendige Optimierungen zu identifizieren („learn“), die anschließend in einem neuen Zyklus nach dem gleichen Prinzip analysiert werden können.

Pflanzen sind aus mehreren Gründen für die synthetische Biologie besonders attraktiv (Fesenko & Edwards 2014; Bailey-Serres et al. 2019; Zhu et al. 2020a). Ihre Genome lassen sich relativ einfach genetisch verändern (Bock 2015; Chen et al. 2022), und sie tolerieren selbst große Veränderungen, einschließlich des Hinzufügens ganzer Chromosomen oder sogar ganzer Chromosomensätze (Fuentes et al. 2014). Darüber hinaus spielen sie eine Schlüsselrolle bei der Bewältigung der Herausforderungen des Klimawandels und der wachsenden Weltbevölkerung. Auch die hohen gesellschaftlichen Erwartungen an den künftigen Beitrag der Landwirtschaft zur Produktion von erneuerbaren Energieträgern und Rohstoffen für die Industrie („grüne Chemikalien“) verlangen innovative Technologien und

grundlegend neue Ansätze, um Ernteerträge und die Widerstandsfähigkeit gegenüber extremeren Wachstumsbedingungen deutlich zu verbessern, aber auch um eine effizientere Verwertung von pflanzlicher Biomasse und landwirtschaftlichen Abfällen („grüner Abfall“) zu ermöglichen.

Langfristig eröffnet die synthetische Biologie der Pflanzenzüchtung nahezu unbegrenzte Möglichkeiten. Visionen der Biotechnologie, wie beispielsweise die Verbesserung der Photosynthese oder das Installieren der Stickstofffixierung in Pflanzen, rücken allmählich in greifbare Nähe. Sowohl die Effizienz der photosynthetischen Energiekonversion (von Lichtenergie in chemische Energie) als auch die Effizienz der Kohlendioxidfixierung durch die biochemischen Reaktionswege der Photosynthese lassen sich theoretisch deutlich steigern. Diese erfordern eine radikale Umgestaltung (engl. „refactoring“) oder ein komplettes Neudesign des Photosyntheseapparates (Ort et al. 2015; Erb & Zarzycki 2016; Rae et al. 2017; Zhu et al. 2020b). Dazu müssen voraussichtlich sehr viele Gene und ganze Netzwerke von Genen und Enzymen (und die entsprechenden Regelkreise) gezielt verändert oder gar neu konstruiert werden. Dies wurde aufgrund der hohen Komplexität dieser Aufgabe lange Zeit für ein unrealistisches Unterfangen gehalten, erscheint jedoch aufgrund technischer Innovationen und rasanter Fortschritte in der Systembiologie und Modellierung biologischer Systeme zunehmend realisierbar. So auch die Erzeugung von Nutzpflanzen, die ihren Stickstoffbedarf eigenständig aus dem Luftstickstoff decken können und somit nicht mehr auf eine chemische Düngung mit Stickstoffsalzen angewiesen sind. Der zugrundeliegende biochemische Prozess existiert in der Natur in einigen Bakterien, wie beispielsweise den Knöllchenbakterien der Schmetterlingsblütengewächse (Fabaceae) sowie einigen Gruppen der Cyanobakterien. Die Einbringung in eine Pflanze erschien aufgrund der genetischen und biochemischen Komplexität und der Vielzahl der beteiligten Komponenten lange als aussichtslos. Dies ändert sich allmählich und weckt neuen Enthusiasmus in der internationalen Forschungsgemeinschaft (Gutiérrez 2012; Oldroyd & Dixon 2014; Rogers & Oldroyd 2014; Bailey-Serres et al. 2019).

Eine langfristige Vision der synthetischen Biologie und ihrer Anwendung auf landwirtschaftliche Nutzpflanzen besteht darin, Nutzpflanzen künftig nicht mehr klassisch zu züchten, sondern stattdessen durch eine Kombination aus hochpräziser Genomedierung, synthetischer Genomik und künstlicher Intelligenz rational zu konzipieren. Dies setzt voraus, dass das Wissen über die genetischen Grundlagen komplexer Merkmale vollständig verstanden ist, sodass neue Pflanzensorten nach dem „Plug-and-Play“-Prinzip entworfen werden können. Dabei könnten Gensätze („Module“) für bestimmte erwünschte Merkmale in einer Pflanze frei miteinander kombiniert werden, wie beispielsweise Merkmale wie mehrjähriges Wachstum,

Ausbildung von Speicherknollen, Frosttoleranz und leistungsfähige Photosynthese (vom sogenannten C4-Typ). Dafür werden verbesserte Verfahren zur genetischen Veränderung von Pflanzen im großen Umfang benötigt werden, wie beispielsweise effiziente Techniken zum Aufbau von synthetischen Chromosomen (Puchta & Houben 2024).

Aus heutiger Sicht ergeben sich aus solchen Anwendungen keine grundsätzlich neuen Risiken für Mensch oder Umwelt.<sup>66</sup> Die zugrundeliegenden Methoden sind nicht neu und könnten durch existierende Regelungen, wie das Gentechnikgesetz<sup>67</sup> und das Cartagena-Protokoll<sup>68</sup>, adäquat behandelt werden. Lediglich der Umfang der genetischen Veränderungen bzw. die Menge an eingebrachter Fremd-DNA übersteigen den Rahmen der konventionellen Gentechnik. Zugleich bietet die synthetische Biologie innovative Möglichkeiten, beispielsweise um durch geeignete Veränderungen des genetischen Codes in synthetischen Organismen, für eine komplette genetische Isolation von existierenden Lebensformen zu sorgen und somit eine unerwünschte Weitergabe von synthetischem Erbmateriale von vornherein auszuschließen (Cambray et al. 2011; Mandell et al. 2015; Rovner et al. 2015). Auch ethische Fragen lassen sich weitestgehend in das bisher betrachtete Spektrum ethischer Fragen im Bereich der Gentechnologie und der Stammzellforschung einordnen.<sup>69</sup>

### 2.3.4 Ökonomische Aspekte

Die quantitative ökonomische Analyse des Werts von **Investitionen in die Forschung** für die Gesellschaft ist ein international etabliertes Feld der Agrarökonomie (Ruttan 1982; Alston et al. 2010). Hier wird in der Regel eine sogenannte Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt, die die Vorteile von Forschung für Produzierende und Konsumierende den eingesetzten ökonomischen Ressourcen in der Forschung gegenüberstellt und so die jährliche Verzinsung berechnet.

---

66 Ständige Senatskommission für Grundsatzfragen der Gentechnik der DFG. 2018. <https://www.dfg.de/resource/blob/173396/181008-synthetische-biologie-standortbestimmung.pdf>

67 GenTG. <https://www.gesetze-im-internet.de/gentg/BJNR110800990.html>

68 <https://bch.cbd.int/protocol/text/>

69 Ständige Senatskommission für Grundsatzfragen der Gentechnik der DFG. 2018. <https://www.dfg.de/resource/blob/173396/181008-synthetische-biologie-standortbestimmung.pdf>

Für Investitionen in die Agrarforschung werden in der Literatur meist Verzinsungen von 20 bis 40 % jährlich angegeben und liegt somit höher als die Opportunitätskosten der eingesetzten ökonomischen Ressourcen, die typischerweise dem langfristigen Kapitalmarktzins von 5 bis 5,5 % entsprechen. Dies stellt aus Sicht der Gesellschaft eine erhebliche Unterinvestition in die Agrarforschung dar. Erscheinen solche Investitionen außerordentlich profitabel, sollte eigentlich mehr in diesen Bereich investiert werden. Eine Untersuchung der gesamtwirtschaftlichen Verzinsung von Investitionen in die öffentliche und private Pflanzenzüchtungsforschung in Deutschland ergab, dass diese in ähnlicher Größenordnung wie in anderen Ländern im Bereich von 20 bis 40 % jährlich liegt (von Witzke & Noleppa 2009; von Witzke & Noleppa 2016). Eine Erweiterung der Analyse von 2016 berücksichtigt auch die positiven Effekte von Pflanzenzüchtungsinvestitionen auf die globale Landnutzung und damit die verminderten globalen Klimagasemissionen. Dies resultiert in deutlich höheren Verzinsungen (Tabelle 6). Dabei dürften auch die dort ausgewiesenen Verzinsungen noch eine erhebliche Unterschätzung des tatsächlichen Werts für die Gesellschaft darstellen, da die Kosten für die Gesellschaft von CO<sub>2</sub>-Emissionen inzwischen mit 200 € je t weit höher angesetzt werden als in der Analyse von von Witzke & Noleppa (2016).

**Tabelle 6:** Verzinsung für die Bevölkerung von Investitionen in der Pflanzenzüchtung in Deutschland bei alternativen CO<sub>2</sub>-Kosten (1991 – 2010).

<b>Kosten von CO<sub>2</sub> (€/t)</b>	0	25	50	75
<b>Verzinsung (%)</b>	21	76	132	186

Ein Grund für die erhebliche Unterinvestition im Bereich Pflanzenzüchtung ist unter anderem der unzureichende Schutz der **Eigentumsrechte** derjenigen öffentlichen und privaten Einrichtungen, die in die Agrarforschung investieren. Diese sind in Deutschland und der EU zwar geregelt, jedoch sind sie wenig ausgeprägt und oft schwer durchsetzbar. Eine Ausnahme bilden technologisch bedingte Eigentumsrechte bei der Züchtung von Hybridsorten. Hybridsaaten basieren auf der Ausnutzung des sogenannten „**Heterosis-Effekts**“. Dabei werden Inzuchtlinien mit unterschiedlicher genetischer Information gekreuzt, wodurch Nachkommen in den gewünschten Merkmalen vorteilhafter sein können als die Elterngeneration. Werden die Nachkommen allerdings wieder ausgesät, geht dieser Effekt verloren. Produzierende, die von diesem Effekt profitieren möchten, müssen dann für jede Produktionsperiode immer wieder das von Pflanzenzüchtern generierte Saatgut

kaufen. Produzierende überall auf der Welt, inklusive derer in Entwicklungs- und Schwellenländern, sind natürlich frei, das Saatgut zu wählen, das am besten zu ihren Bedingungen passt. Ist geeignetes Hybridsaatgut verfügbar, entscheiden sie sich üblicherweise schnell für dessen Nutzung. Dies zeigte sich bereits bei der Einführung von neu gezüchteten Sorten der zweiten Grünen Revolution ab Mitte des letzten Jahrhunderts. Landwirt:innen, auch in den armen Ländern der Welt, testeten die ertragreichen Sorten und stellten bei Eignung bei ihren klimatischen und individuellen Umständen um. Von 1920 bis 1950 beispielsweise stiegen in den USA die durchschnittlichen Flächenerträge von Weizen und Mais in ähnlichen Größenordnungen. Nach dem Beginn der Verfügbarkeit von Hybridsaatgut stiegen die Flächenerträge von Mais deutlich stärker an als die von Weizen. Während sich der Maisertrag je Hektar in diesem Zeitraum versechsfachte, verdoppelte sich der Ertrag von Weizen.

## 2.4 Politische Rahmenbedingungen

Umweltschäden, die durch Treibhausgase, Stickstoffverschmutzung oder Pflanzenschutzmittel verursacht wurden, werden in der ökonomischen Theorie als klarer Fall von Marktversagen betrachtet. Das geschieht, weil Landwirt:innen, Produzierende und Konsumierende nicht die gesamten ökonomischen Kosten ihres Handelns tragen, stattdessen muss ein Teil der Kosten als sogenannter externer Effekt von anderen Wirtschaftsakteuren übernommen werden. Wirtschaftsakteure, die umweltfreundlich agieren, haben somit einen Wettbewerbsnachteil: Reduzierte externe Kosten bekommen sie nicht vergütet und sie müssen die Vermeidungskosten in voller Höhe selbst tragen. Zur Behebung dieses Marktversagens existieren verschiedene Politikinstrumente.

Die **Bepreisung von externen Kosten**, beispielsweise durch sogenannte **Lenkungssteuern**<sup>70</sup> oder durch **Emissionszertifikatehandel**<sup>71</sup>, gilt gewöhnlich als besonders effizient. Durch die Steuer oder die Kosten für den Zertifikatekauf werden die Kosten auf die Höhe der tatsächlichen gesellschaftlichen Kosten angehoben und das Marktversagen korrigiert. Alternativ können **Subventionen** für die Reduktion bzw. Vermeidung von negativen Umwelteffekten gewährt werden. Jedoch erzeugen Steuern und Zertifikate im Gegensatz zu Subventionen Einnahmen für den

---

70 Deutscher Bundestag. 2007. <https://www.bundestag.de/resource/blob/411810/041b2cc14f57e59b196a5706a8e3c981/WD-4-048-07-pdf-data.pdf>

71 UBA. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel>

Staatshaushalt, die etwa zur Abmilderung sozialer Ungleichheiten bei Konsumierenden oder zur Unterstützung des Wandels bei Landwirt:innen verwendet werden können. Subventionen hingegen müssen gegenfinanziert werden und bergen Risiken für andere Marktverzerrungen und soziale Belastungen.

Steuern haben gegenüber **Geboten und Verboten** den Vorteil, dass mit diesen nuancierter zwischen dem Nutzen für die Wirtschaft und dem Nutzen für die Gemeinschaft abgewogen werden kann. Insbesondere in der Landwirtschaft, in der Residualemissionen (d.h. unvermeidbare Restemissionen wie beispielsweise Lachgas in Düngemitteln) unvermeidbar sind, muss abgewogen werden, wie hoch die akzeptablen Residualemissionen pro Wertschöpfungseinheit sind. Diese können bei einer Steuer von der Wirtschaft selbst bestimmt werden. Die nuancierte Ausarbeitung von Geboten und Verboten würde im Falle der Landwirtschaft mit einem enormen Bürokratieaufwand und damit verbundenen Kosten einhergehen. Übersteigt der Schaden jedoch robust den Nutzen, sind auch Gebote und Verbote effizient. So ist beispielsweise ein Verbot der Ausbringung von Gülle in unmittelbarer Umgebung von Gewässern sinnvoll. Auch bei der landwirtschaftlichen Nutzung von trockengelegten Moorböden sind die Emissionen so unverhältnismäßig hoch, dass ein Verbot der Trockenlegung denselben Effekt hätte wie eine Besteuerung.

Bei Steuern und Emissionszertifikatehandel ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen der theoretisch effizientesten Bemessungsgrundlage (Steuergegenstand) und dem bürokratischen Aufwand, die entsprechende Bemessungsgrundlage zu ermitteln und zu kontrollieren (Transaktionskosten). Ohne Transaktionskosten wäre die theoretisch effizienteste Bemessungsgrundlage die durch die Emissionen entstehenden Schadenskosten. Gegenwärtig können jedoch weder die Emissionen für jeden landwirtschaftlichen Standort mit unterschiedlichen Bedingungen für Klima, Böden und Management mit angemessenen Kosten ermittelt werden (beispielsweise weil eine satellitengestützte Messung noch nicht verfügbar ist), noch die durch diese Emissionen an anderen Orten entstehenden Schäden für jeden Einzelfall beziffert werden. Daher muss der Steuergegenstand so angepasst werden, dass anhand von leicht ermittelbaren Kenngrößen die Emissionen und die daraus entstehenden Schäden in der Umwelt in der Größenordnung robust geschätzt werden können.

Im Falle von Stickstoffverschmutzung bietet sich beispielsweise der Stickstoffüberschuss als Steuergegenstand an (Hermann et al. 2020). Dieser kann über die Massenbilanzrechnung, die in der „Verordnung über den Umgang mit Nährstoffen

im Betrieb und betriebliche Stoffstrombilanzen<sup>72</sup> berechnet wird, robust ermittelt werden. Für jeden Betrieb kann so die Differenz zwischen Stickstoffimporten in Form von gekauftem Dünger und Futtermitteln sowie durch Leguminosen (Hülsenfrüchtler, Fabaceae) aus der Luft fixiertem Stickstoff und Stickstoffexporten in verkauften Nahrungs- und Futtermitteln ermittelt werden. Diese Differenz, der sogenannte Stickstoffüberschuss, geht an die Umwelt verloren, wobei nicht eindeutig ist, in welcher Form. Eine Stickstoffüberschussabgabe wäre somit eine undifferenzierte Steuer auf Lachgas, Ammoniak, Nitratauswaschung und Erosion. Ein präziserer Steuergegenstand, der beispielsweise die verschiedenen Emissionsarten (Nitrat, Ammoniak, Lachgas) isoliert oder anhand der lokalen Bodenbeschaffenheit, Niederschlagsmengen und Gesamtstickstoffmengen die Umweltschäden präziser ermittelt, ginge jedoch mit einem ungleich höheren bürokratischen Aufwand einher. Kunstdünger ist beispielsweise ein einfach zu ermittelnder Steuergegenstand, der zwar leicht umgesetzt werden, aber zu Fehlanreizen führen könnte, die beispielsweise zu einem höheren Import von Futtermitteln und Gülle aus dem Ausland ohne entsprechende Besteuerung führen würden. Oder es könnte zu einem übermäßigen Anbau von Leguminosen kommen, deren Stickstoff ebenfalls zu Umweltschäden führt.

Idealerweise sollte der Steuergegenstand nah am tatsächlichen Umweltschaden liegen (beispielsweise bei den Emissionen). Tatsächlich würde die Steuer einen Anreiz für effizientere Düngung schaffen und auch für eine nährstoffeffiziente Tierfütterung und Güllelagerung. Sie würde auch eine Dekonzentration der Tierhaltung in der Fläche bewirken, da sonst die Nährstoffe in der Gülle nicht effizient genug genutzt werden könnten. Ebenso würden sich auch die Folgeprodukte in der Produktionskette entsprechend des Stickstoff-Fußabdrucks verteuern, bis hin zum Nahrungsmittelpreis für die Konsumierenden, welcher insbesondere für tierische Produkte steigen würde.

Das Beispiel der Stickstoffüberschussabgabe verdeutlicht, dass ein klug gewählter Steuergegenstand für die Wirksamkeit eines Politikuments zentral ist. Ebenso sollte dieser individuell an die natürlichen Gegebenheiten und technischen Möglichkeiten der Erfassung angepasst sein. Für den durch Aufbau oder Abbau von im Bodenhumus gebundenen oder freigesetztem organischen Kohlenstoff im Boden wäre ebenfalls eine Massenbilanz geeignet, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen oder die CO<sub>2</sub>-Bindung zu bemessen. In dieser Bilanz würde regelmäßig, beispielsweise alle fünf Jahre, der Bodenhumusgehalt gemessen, und die Emissionen würden aus der

---

72 <https://www.bmleh.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/ackerbau/stoffstrombilanz.html>

Differenz dieser Messungen berechnet. Der Abbau von Bodenkohlenstoff könnte besteuert und der Aufbau subventioniert werden.

Bisher herrscht insbesondere bei der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU die Praxis vor, die Maßnahmen (zum Beispiel der Anbau von Zwischenfrüchten) und nicht das Ergebnis zu subventionieren. Dies beinhaltet verschiedene Schwachstellen: (i) die Wirksamkeit der subventionierten Maßnahmen ist nicht garantiert, (ii) nicht kategorisierte aber effektive Maßnahmen werden nicht erfasst und (iii) die Permanenz der CO<sub>2</sub>-Speicherung ist nicht abgesichert, da das CO<sub>2</sub> wieder frei wird sobald die Maßnahme endet (Bodirsky et al. 2024). Für die Besteuerung von Methan von Wiederkäuern ist eine Massenbilanz aktuell nicht verfügbar, da Kohlenstoff und Wasserstoff nicht nur als Methan, sondern auch in anderen Formen wie CO<sub>2</sub> von diesen emittiert werden. Die direkte Messung der Emissionen ist aktuell nicht kostengünstig möglich. Leicht zu erhebende Kennzahlen umfassen nur die Anzahl der Tiere, das Schlachtgewicht, die Milchmenge sowie die Menge des verfütterten Kraftfutters. Hieraus ließe sich als Energiebilanz die Menge an verfüttertem Raufutter (wie Gras, Heu und Stroh) sowie die Emissionsfaktoren basierend auf Einzelstudien schätzen. Als Steuergegenstand hätte dies den Nachteil, dass innovative Maßnahmen zur Senkung der Methanemissionen, wie beispielsweise die Verfütterung der emissionssenkenden Alge *Asparagopsis* (Rhodophyta) nur als Sonderfall nach dem Nachweis von Einzelstudien erfasst werden können. Für eine Besteuerung von Pflanzenschutzmitteln könnte das Produkt aus angewandter Menge und einem produktspezifischen Umweltschadensindex wie dem Environmental Impact Quotient („EIQ“; Kovach et al. 1992) genommen werden.

Analog zur Steuer bietet auch die Ausschüttung von handelbaren Emissionszertifikaten eine Möglichkeit, Umweltschäden zu bepreisen. Theoretisch sind Steuern und Emissionshandel in Bezug auf Emissionen und Kosteneffizienz vergleichbar. Im Hinblick auf eine Unsicherheit bezüglich des Vermeidungspotentials und der Vermeidungskosten kann durch den Emissionshandel die Unsicherheit bezüglich des Emissionsziels vermieden werden. Es bleibt unsicher, wie hoch der Zertifikatspreis in der Zukunft sein wird, während bei einer Steuer die Unsicherheit bezüglich der wirtschaftlichen Belastung vermieden werden kann, aber die Unsicherheit bezüglich der Zielerreichung für die Emissionsreduktion bleibt (Stavins 2022).

Regulierungen wie Steuern, Emissionshandel, Subventionen, Gebote und Verbote können zu Wettbewerbsverzerrungen führen zwischen dem Land, in dem die Regulierung gilt, und den Ländern, die nicht regulieren. Langfristig sind jedoch auch Wettbewerbsvorteile möglich.

So war und ist der übermäßige Einsatz von Düngern und Pflanzenschutzmitteln oft darauf zurückzuführen, dass (i) einzelne Landwirt:innen in festgefahrenen Strukturen schwierig von bisherigen Praktiken ablassen können, (ii) Landwirt:innen für eine Reduktion des Ertragsrisikos durchschnittliche finanzielle Einbußen in Kauf nehmen oder (iii) dass biologische Schädlingsbekämpfung oft komplex und bisher wenig in die Ausbildung integriert ist (Pergner & Lippert 2023). Die vorgeschriebene Einhaltung einer guten fachlichen Praxis, wie beispielsweise die Erstellung einer Nährstoffbilanz und das Messen des Nährstoffgehalts in Böden, kann Kosten senken und die Wettbewerbsfähigkeit steigern. Eine Regulierung kann auch die Entwicklung effizienter und innovativer Technologien fördern, welche langfristig zu Kostensenkungen führen können. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass landwirtschaftliche Umweltschäden (beispielsweise Luftverschmutzung oder Gewässerverunreinigung) ebenfalls Kosten verursachen, die die gesamt-volkswirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit eines Landes senken können, beispielsweise durch höhere Krankenzeiten oder höhere Gesundheitskosten der Gesamtbevölkerung. Die Wettbewerbsfähigkeit der Landwirtschaft führt so zu einer Senkung der allgemeinen Wettbewerbsfähigkeit. Dies gilt in erster Linie für lokale Verschmutzung wie Nährstoffverschmutzung und Pestizide, nicht aber für globale externe Kosten wie Treibhausgase.

Eine **Emissionsbepreisung** wäre sowohl auf Ebene der EU als auch auf national-staatlicher Ebene denkbar. Erstere hätte den Vorteil, dass es nicht zu Wettbewerbsverzerrungen im EU-Binnenmarkt kommt. Da die EU jedoch keine Steuern erheben darf, bleibt die Möglichkeit des Zertifikatehandels, was aktuell in Bezug auf die landwirtschaftlichen Treibhausgase im Rahmen der Ausweitung des EU-Emissionshandelssystems ETS3 (engl. „EU Emission Trading Systems“) diskutiert wird. Alternativ zum Zertifikatehandel könnte die EU auch ein Minderungsziel vorschreiben und die Wahl des geeigneten Instruments den Nationalstaaten überlassen, wie dies beispielsweise bei der Nitratrichtlinie<sup>73</sup> geschieht. Sofern keine Einigung auf EU-Ebene erzielt wird, ist auch eine nationale Umsetzung möglich. Eine Besteuerung auf EU-Ebene und insbesondere auf nationaler Ebene kann zu Wettbewerbsverzerrungen im internationalen Handel führen, da heimische Landwirt:innen im Vergleich teurer produzieren würden. Insbesondere bei der Tierproduktion könnte dies zu einer Reduktion der heimischen Produktion führen oder zu einer Verschiebung derselben, auch in Teilen, ins Ausland. Da der Ackerbau an den immobilen Faktor Boden gebunden ist, käme es hier zu einer erheblich geringeren Produktionssenkung. Angesichts der hohen Pachtpreise würde

---

73 Europäischer Rat. 1991. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0676>

aktuell ein erhöhter Wettbewerb nicht zur Stilllegung von Flächen führen, sondern lediglich zu einer Senkung des Bodenwertes, der Pachtpreise und der Profite von Landbesitzer:innen.

Zur Abminderung von Wettbewerbsnachteilen könnte über ausgleichende Maßnahmen wie **Grenzausgleichszölle** nachgedacht werden. Damit könnten Produzierende die Vermeidungskosten an Konsumierende weiterreichen, und die Landwirt:innen wären weiterhin im Exportmarkt wettbewerbsfähig. Derartige Grenzausgleichszölle werden auf EU-Ebene aktuell bereits im Rahmen des Europäischen CO<sub>2</sub>-Grenzausgleichssystems (engl. „Carbon Border Adjustment Mechanism“, CBAM<sup>74</sup>) für die CO<sub>2</sub>-Bepreisung beschlossen, jedoch bisher lediglich für CO<sub>2</sub>-intensive industrielle Produkte wie Stahl, Aluminium oder Zement. Innerhalb der EU gibt es auf nationaler Ebene bereits Beispiele für Grenzausgleichszölle: Dänemark hat 2011 im Rahmen der – inzwischen wieder abgeschafften – Besteuerung von gesättigten Fettsäuren auch Zölle auf importierte Produkte mit diesen eingeführt. Die dänische Regierung hat ebenfalls kürzlich eine Besteuerung auf landwirtschaftliche Treibhausgase mit Grenzausgleichszöllen ab 2030 angekündigt.<sup>75</sup> Eine Herausforderung sind hier die großen Unterschiede bei den Emissionen bei verschiedenen Landwirt:innen. Eine Schätzung der Emissionen auf Betriebsebene für ausländische Betriebe würde zu hohe Kosten und damit wiederum Wettbewerbsverzerrungen verursachen. Möglich ist die Nutzung vereinfachter Emissionsfaktoren, welche niedrig angesetzt sind und die so den Druck auf inländische Unternehmen leicht mindern, ohne ausländische Unternehmen zu benachteiligen. Alternativ könnte den Unternehmen ermöglicht werden, von vereinfachten Emissionsfaktoren abzuweichen, sofern sie niedrigere Emissionsfaktoren nachweisen können. Die Einführung derartiger Zölle auf EU statt auf nationaler Ebene wäre deutlich effizienter, würde jedoch auch einen Zertifikatehandel auf EU-Ebene erfordern.

Die Einführung von Grenzausgleichszöllen kann wahrscheinlich konform mit den Regeln der Welthandelsorganisation (WTO) gestaltet werden, solange beispielsweise sichergestellt wird, dass bei gleichem Umwelt-Fußabdruck ausländische Produkte nicht schlechter gestellt werden als heimische Produkte (Durel 2024). Angesichts der aktuellen Schwäche der WTO und der Nutzung von Zöllen als geopolitischem Mittel besteht dennoch ein Risiko für die Eskalierung von Handelskonflikten.

---

74 CBAM. [https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism\\_en](https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en)

75 <https://www.euractiv.de/section/europa-kompakt/news/daenemark-haelt-trotz-guten-emissionswerten-an-co2-steuer-fuer-landwirtschaft-fest/>

## 2.5 Ernährungspolitik in Deutschland

Lebensmittel unterscheiden sich erheblich in ihrem durchschnittlichen ökologischen Fußabdruck. Im Allgemeinen sind der Flächenverbrauch, die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die meisten anderen Umweltauswirkungen von tierischen Lebensmitteln deutlich höher als die von Lebensmitteln pflanzlicher Herkunft (Poore & Nemecek 2018). In den meisten Ländern mit hohem Einkommen – darunter auch Deutschland – liegt der Konsum tierischer Lebensmittel (insbesondere der von Fleisch) deutlich über den Mengen, die unter gesundheitlichen Gesichtspunkten als empfehlenswert gelten (Willett et al. 2019; Lemken & von Philipsborn 2023). Aus diesem Grund kann eine Änderung der Ernährungsmuster in Industrieländern nicht nur einen wichtigen Beitrag zur Vermeidung ernährungsmitbedingter Krankheiten leisten, sondern auch zur ökologischen Nachhaltigkeit des globalen Agrar- und Ernährungssystems beitragen. Entsprechend wird die Ernährungsumstellung auf Bevölkerungsebene (Ernährungswende, engl. „dietary change“) als zentrales Handlungsfeld der Ernährungssystemtransformation angesehen (<sup>76</sup> und World Resources Institute et al. 2018; Willett et al. 2019).

Für eine wirksame **Förderung gesunder und nachhaltiger Ernährungsweisen** auf Bevölkerungsebene braucht es konsumseitige ernährungspolitische Maßnahmen (Mozaffarian et al. 2018). Die wissenschaftliche Evidenz für die Wirksamkeit solcher Maßnahmen hat zuletzt deutlich zugenommen (von Philipsborn 2022). Eine Möglichkeit, konsumseitige Maßnahmen für die Förderung gesunder und nachhaltiger Ernährungsweisen zu klassifizieren ist das sogenannte NOURISHING-Rahmenwerk des World Cancer Research Funds, welches zehn Handlungsbereiche für die Förderung einer gesunden und nachhaltigen Ernährung auf Bevölkerungsebene unterscheidet (Tabelle 7).

---

76 FSEC. 2024. <https://foodsystemeconomics.org/>

**Tabelle 7:** Das NOURISHING-Rahmenwerk.<sup>77</sup> Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Hawkes et al. 2013 und Vlad et al. 2023; übernommen aus von Philipsborn 2024.

Maßnahmenbereich	Beispiele
Lebensmittelkennzeichnung (Labelling)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ampel-Kennzeichnungen (wie beispielsweise der Nutri-Score) und Warnhinweise auf der Verpackungsvorderseite</li><li>• Regulierung von gesundheits- und nährstoffbezogenen Aussagen (sogenannte „Health claims“)</li><li>• Zutatenlisten und Nährwertdeklarationen</li><li>• Kalorien- und Nährwertkennzeichnung auf Speisekarten</li></ul>
Lebensmittelangebot in öffentlichen Einrichtungen	<ul style="list-style-type: none"><li>• Qualitätsstandards für die Gemeinschaftsverpflegung in verschiedenen Umgebungen (wie beispielsweise Kitas, Schulen, Hochschulen, Kliniken, Seniorenheime, Betriebe)</li><li>• Obst- und Gemüseprogramme in Schulen</li></ul>
Preisgestaltung durch Steuern und Subventionen	<ul style="list-style-type: none"><li>• Höhere Besteuerung von ernährungsphysiologisch unausgewogenen Lebensmitteln (beispielsweise „Softdrinksteuer“, Süßwarensteuern)</li><li>• Geringere Besteuerung bzw. Steuerbefreiung für gesunde Lebensmittel (beispielsweise Obst und Gemüse)</li><li>• Kombinierte Modelle (beispielsweise gesundheitsförderliche Mehrwertsteuerreform)</li></ul>
Regulierung von Werbung und Marketing	<ul style="list-style-type: none"><li>• Schutz von Kindern vor Werbung für ernährungsphysiologisch unausgewogene Lebensmittel durch nationale Gesetzgebung</li><li>• Begrenzung von Werbung für solche Lebensmittel in bestimmten Umgebungen (beispielsweise im öffentlichen Personennahverkehr)</li></ul>

<sup>77</sup> WCRF. <https://policydatabase.wcrf.org/>

Maßnahmenbereich	Beispiele
Reformulierung (Rezepturanpassungen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbindliche gesetzliche Grenzwerte für bestimmte Inhaltsstoffe (beispielsweise Transfettsäuren, Salz und Zucker in bestimmten Lebensmittelkategorien)</li> <li>• Verbindliche gesetzliche Vorgaben für die Nährstoffzusammensetzung von Beikost und Muttermilchersatzprodukten</li> <li>• Öffentliche Unterstützung für unverbindliche privatwirtschaftliche Reformulierungsinitiativen</li> </ul>
Änderungen des Lebensmittelangebots in Einzelhandel und Gastronomie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrenzung des Angebots ernährungsphysiologisch unausgewogener Lebensmittel im Kassensbereich von Supermärkten</li> <li>• Förderung von Bauernmärkten/landwirtschaftlicher Direktvermarktung von Obst und Gemüse und anderen frischen und gering verarbeiteten Lebensmitteln</li> <li>• Stadtplanerische Maßnahmen zur Begrenzung von Fastfood-Restaurants in der Nähe von Schulen</li> </ul>
Sektorübergreifende und systemische Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agrarpolitische Maßnahmen zur Förderung des Obst- und Gemüseanbaus</li> <li>• Sozialpolitische Maßnahmen zum Adressieren von Ernährungsarmut</li> <li>• Schutz ernährungspolitischer regulatorischer Kapazität in internationalen Handels- und Investitionsabkommen</li> </ul>
Information der Öffentlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufklärungskampagnen in Massenmedien</li> <li>• Begleitende Informationskampagnen bei Einführung anderer Maßnahmen (wie beispielsweise einer Nährwertkennzeichnung)</li> </ul>
Ernährungsberatung im Gesundheitswesen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Individuelle oder App-gestützte Ernährungsberatungsangebote</li> <li>• Multimodale Lebensstilmodifikationsprogramme</li> </ul>
Ernährungsunterricht im Bildungssystem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integration von Ernährungsinhalten in die Lehrpläne relevanter Fächer</li> <li>• Schulgärten und andere Aktivitäten mit Ernährungsbezug</li> <li>• Kochunterricht, Schulfach Ernährung</li> </ul>

Um relevante Effekte auf Bevölkerungsebene zu erzielen, ist die **Kombination verschiedener Maßnahmen** nötig, also eine umfassende Strategie bzw. ein „Policy Mix“ (Mozaffarian et al. 2018; von Philipsborn et al. 2021). In seinem Gutachten „Politik für eine nachhaltigere Ernährung“ stellte der Wissenschaftliche Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (WBAE) fest, dass die Nutzung derartiger konsumseitiger Maßnahmen in der deutschen Agrar- und Ernährungspolitik bislang vernachlässigt wurde.<sup>78</sup> Um die ökologischen, ethischen, sozialen und gesundheitlichen Herausforderungen des deutschen, europäischen und globalen Agrar- und Ernährungssystems wirksam zu adressieren, ist eine verstärkte Nutzung dieser Ansätze unabdingbar. Eine kluge Kombination von angebots- und nachfrageseitigen Maßnahmen gilt dabei als besonders vielversprechend (Fesenfeld et al. 2022).

#### **Zusammenfassung:**

Um die Nahrungsmittelproduktion der Zukunft widerstandsfähig, nachhaltig, effizient und ressourcenschonend zu gestalten, sind moderne Landnutzungskonzepte sowie innovative Technologien wie beispielsweise Zirkularität und neue Züchtungsmethoden sowie der Einsatz von Robotik und KI vielversprechende Lösungen. In Deutschland kann durch eine zielgerichtete Ernährungspolitik auf Konsum- und Produktionsseite eine gesunde und nachhaltige Ernährung wirkungsvoll gefördert werden.

---

78 WBAE. 2020. <https://www.bmel.de/DE/ministerium/organisation/beiraete/agr-veroeffentlichungen.html>

# 3 Zur Qualität unserer Nahrungsmittel

## 3.1 Inhaltsstoffe von Pflanzen

Pflanzen und Tiere versorgen uns mit Eiweiß als Hauptquelle für Aminosäuren, Kohlenhydraten (in Form von Stärke oder Zuckern) und Fetten (Triacylglyceride als klassische Fette bzw. Öle). Diese Stoffklassen bilden mengen- und energiemäßig den größten Anteil unserer verwertbaren Nahrung. Rein mengenmäßig spielen auch die sogenannten Ballaststoffe, überwiegend aus pflanzlichen Lebensmitteln, eine wichtige Rolle, da sie eine positive Wirkung auf unser Mikrobiom (Darmflora) haben. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Teile der pflanzlichen Zellwand. Neben diesen Substanzklassen enthalten unsere Nahrungsmittel eine Vielzahl an Substanzen, die in deutlich geringeren Mengen vorkommen. Dazu zählen Vitamine, mineralische Substanzen und insbesondere die sogenannten **Sekundärmetabolite** (sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe), die in Pflanzen gebildet werden. Sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe sind organische Verbindungen, die im Gegensatz zu Primärmetaboliten (wie Zucker, organische Säuren, Aminosäuren und Lipide, die für die grundlegenden Pflanzenfunktionen wie Wachstum und Entwicklung notwendig sind), oft eine besondere Rolle bei den Interaktionen der Pflanze mit ihrer biotischen und abiotischen Umwelt spielen. Beispielhaft genannt seien die Abwehr von Pflanzenfressern (beispielsweise Insekten) und Krankheitserregern (wie Pilzen und Bakterien) oder die Anpassung an abiotische Stressbedingungen wie Hitze, Kälte, Trockenheit, toxische Mineralien oder auch zu hohe Lichtintensitäten (Pusztahelyi et al. 2015; Erb & Kliebenstein 2020; siehe Kapitel 1.3.2 und 1.3.3).

Pflanzen sind neben den Pilzen wahrscheinlich die besten Syntheschemikerinnen auf diesem Planeten. Bis heute wurden über 50.000 verschiedene Verbindungen identifiziert; Schätzungen gehen aber von mindestens einer Million chemisch unterschiedlicher Verbindungen aus (Afendi et al. 2012). Die Vielfalt beruht auf unterschiedlichen Biosynthesewegen und chemischen Modifikationen, die die Pflanzen zur Herstellung von Sekundärmetaboliten nutzen.

Wichtige Klassen von Sekundärmetaboliten sind:

- **Alkaloide:** Stickstoffhaltige Verbindungen mit unterschiedlichen Strukturen und Funktionen, beispielsweise Koffein, Nikotin, Morphin, Chinin und Strychnin. Viele wirken pharmakologisch auf Tiere.
- **Terpenoide:** Von Isopren-Einheiten ableitende Verbindungen wie ätherische Öle und bestimmte Pigmente (beispielsweise Carotinoide). Sie dienen der Pflanzenabwehr, wirken als Signalmoleküle und locken Bestäuber an.
- **Phenole:** Zu dieser Klasse gehören Phenolsäuren, Flavonoide und Lignine. Sie haben antioxidative Eigenschaften, tragen zur Abwehr von Pflanzenfressern und Krankheitserregern bei und spielen eine wichtige Rolle beim Schutz vor UV-Strahlung.
- **Glucosinolate:** Dies sind schwefelhaltige Verbindungen, die in Kreuzblütengewürzen (Brassicaceae wie Kohl, Rettich oder Senf) vorkommen. Sie sind an Abwehrmechanismen beteiligt und können auch gesundheitliche Vorteile für den Menschen bieten.

Unser Wissen über die Diversität pflanzlicher Sekundärmetabolite ist begrenzt. Einerseits fehlen chemisch-analytische Technologien, die eine systematische Identifizierung und Strukturaufklärung der großen Zahl an unterschiedlichen Sekundärmetaboliten erlauben. Zwar ermöglichen moderne, meist auf Massenspektroskopie basierende Technologien grundsätzlich das Erfassen einer Vielzahl von Substanzen, dabei ist aber der wesentliche Identifikator der Masse/Ladungsverhältnis-Wert ( $m/z$ ). Dieser erlaubt bei hochauflösenden Massenspektrometern die Berechnung der Summenformel. Jedoch gibt es für jede Summenformel eine Vielzahl an Strukturen, sodass die Bestimmung der chemischen Struktur in der Regel nicht möglich ist (Rai et al. 2017; Fang et al. 2019; Dixon & Dickinson 2024). Zweitens produzieren Pflanzen viele sekundäre Metabolite nur unter bestimmten Umwelt- oder Entwicklungsbedingungen. Deshalb sind in einer unter Standardbedingungen im Gewächshaus gewonnenen Probe diese Substanzen unter Umständen gar nicht vorhanden. Zusätzlich wurden die komplexen chemisch-analytischen Methoden bislang aus Kostengründen nur bei wenigen Pflanzenarten angewendet; insbesondere Heilpflanzen sind auf molekularer Ebene noch unzureichend erforscht. Dementsprechend ist es nicht überraschend, dass aktuell nur für wenige Sekundärmetabolite überzeugende Erkenntnisse in Bezug auf ihre Wirkung als Nahrungsbestandteil gibt. So werden beispielsweise Flavonoiden

antioxidative Aktivitäten, positive Auswirkungen auf die kardiovaskulären Parameter sowie neuroprotektive Eigenschaften zugeschrieben. Carotinoide wirken ebenfalls antioxidativ und können entzündungshemmende Eigenschaften haben. Tannine können die Verdauungsgesundheit fördern. Eine in den letzten Jahren besonders bekannt gewordene Einzelsubstanz ist das Resveratrol, ein Polyphenol, das unter anderem in Weintrauben, Himbeeren oder Erdbeeren vorkommt. Ihm werden zahlreiche gesundheitsfördernde Wirkungen zugeschrieben (Singh et al. 2019), wobei viele zugrundeliegenden Studien häufig mit unnatürlich hohen Konzentrationen von Resveratrol und unter nur begrenzt aussagefähigen Laborbedingungen (beispielsweise in Zellkulturen) durchgeführt wurden.

Bei **Heilpflanzen** ist unser Wissen ein wenig umfassender. Kenntnisse über die gesundheitsfördernden Wirkungen komplexer Pflanzenextrakte stammen unter anderem aus verschiedenen volksmedizinischen Ansätzen wie beispielsweise der Traditionellen Chinesischen Medizin (TCM). Einige Extrakte, welche in der traditionellen Medizin zur Besserung zahlreicher unterschiedlicher Krankheitssymptome eingesetzt werden, sowie auch Gingko- und Knoblauch-Präparate wurden von der pharmazeutischen Industrie aufgegriffen und zu Medikamenten weiterentwickelt. In einigen Fällen ließ sich die Wirkung auf einzelne Substanzen zurückführen, beispielsweise beim Malariawirkstoff Artemisinin (Ma et al. 2020). In anderen Fällen ist klar, dass die Wirkung auf mehr als eine Substanz zurückzuführen ist, so beispielsweise bei der antidepressiven Wirkung von Extrakten aus dem Johanniskraut (*Hypericum perforatum*). Einige pflanzliche Inhaltsstoffe können bei übermäßigem Konsum jedoch auch negative Auswirkungen auf unsere Gesundheit haben. Beispielsweise bestimmte Alkaloide wie das Solanin, das in grünen Kartoffeln enthalten ist, oder cyanogene Glykoside (enthalten beispielsweise im Maniok), die bei ihrer Verstoffwechselung giftiges Cyanid freisetzen können, die allerdings bei sachgemäßer Zubereitung zerstört werden. Weitere Beispiele sind Lektine, die Verdauungsbeschwerden verursachen, oder auch Tannine, die bei empfindlichen Menschen die Eisenaufnahme hemmen können.

Ungeachtet einer in Bezug auf isolierte Substanzen teilweise schwachen Datenlage ist das gesundheitsfördernde Potential von sekundären Pflanzeninhaltsstoffen unbestritten. Circa 50 % aller heute auf dem Markt befindlichen Pharmazeutika sind von Sekundärmetaboliten pflanzlichen oder pilzlichen Ursprungs abgeleitet (Butler 2004; Potterat & Hamburger 2008; Kinghorn et al. 2011). Dies unterstreicht ihr enormes Potenzial für die Förderung menschlicher Gesundheit (De Luca et al. 2012).

## 3.2 Wirkungen von Inhaltsstoffen

Gegenwärtig existiert ein solides, aber ausbaufähiges Wissen über die Funktion und (Wechsel-)Wirkung von Nahrungsmittel-inhaltsstoffen im menschlichen Körper. Wissenslücken bestehen vor allem hinsichtlich der mechanistischen und biochemischen Wirkungen sowie in Bezug auf das Zusammenspiel einzelner Substanzen und ihrer regulativen Prozesse, wie beispielsweise hormonelle Abläufe oder der Steuerung von Sättigungs-, Hunger- oder Zufriedenheitszuständen. Auch über Verzehrgegewohnheiten ist vergleichsweise wenig bekannt.

Bezüglich der **Makronährstoffe** wissen wir, dass hoch-energetische Kohlenhydrate (Mono-, Di- und Polysaccharide; also „Stärke“ und „Zucker“) für den Körper nicht essenziell sind (d. h. von unserem Körper selbst synthetisiert werden können). Daher und aufgrund der hormonellen Reaktion, die im Körper auf die Einnahme folgt, gilt eine übermäßige Zufuhr als ungesund. Niedrig-energetische Kohlenhydrate (Ballaststoffe) kommen vor allem in pflanzlichen Lebensmitteln vor, die zusätzlich wertvolle Vitamine und Mikronährstoffe liefern, und sind für Verdauungsprozesse von zentraler Bedeutung. Auch essenzielle Fettsäuren (insbesondere mehrfach-ungesättigte Fettsäuren) sind für einen gut funktionierenden Stoffwechsel wichtig. Eine moderate Fettzufuhr unterstützt zudem die Aufnahme wichtiger Vitamine und das Erreichen eines Sättigungs- und Zufriedenheitsgefühls. Proteine (Eiweiß) ist unverzichtbar, wobei einige Aminosäuren essenziell sind und über die Nahrung aufgenommen werden müssen. Über die optimale Proteinmenge herrscht in der Fachwelt bislang kein vollständiger Konsens.<sup>79</sup> Es gibt eine kaum überschaubare Menge an **Mikronährstoffen**, die wir mit unserer Nahrung aufnehmen. Mineralstoffe und Vitamine sind gut erforscht und ihre wichtigsten Funktionen im Stoffwechsel beschrieben; jedoch ist unser Wissen über die komplexen Wechselwirkungen begrenzt. Laufende Forschung entschlüsselt kontinuierlich neue Zusammenhänge. Wissenschaftlicher Konsens besteht darin, dass es gesund ist, mit der Nahrung – größtenteils mit pflanzlichen und unverarbeiteten Lebensmitteln – eine bestimmte, summarische Menge an sekundären Pflanzeninhaltsstoffen aufzunehmen.<sup>80</sup>

Über die **Wechselwirkungen von pflanzlichen Inhaltsstoffen** miteinander aber auch mit Produkten unseres eigenen Stoffwechsels, beispielsweise Vitaminen, Fetten oder Proteinen und deren Bausteinen, ist derzeit wenig bekannt. Zu

---

79 DGE. <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/protein/>

80 DGE. <https://www.dge.de/gesunde-ernaehrung/gut-essen-und-trinken/dge-ernaehrungskreis/>

denkbaren Mechanismen gehört auch die Beeinflussung der Aufnahme von Metaboliten im Darm durch die gemeinsame Nutzung gleicher oder ähnlicher **Transportmechanismen**. Ein Beispiel hierfür ist die Aufnahme fettlöslicher Substanzen (beispielsweise einiger Vitamine) in Verbindung mit dem Nahrungsfettgehalt.<sup>81</sup> Die Wechselwirkung zwischen dem Nahrungsfettgehalt und der Resorption von fettlöslichen Inhaltsstoffen im Darm beruht auf der mit dem Fettgehalt verbundenen Gallensekretion und der nachfolgenden verbesserten Resorption fettlöslicher Nahrungsbestandteile. Eine weitere Möglichkeit der Wechselwirkung liegt in der Variabilität des **Darmmikrobioms** (d. h. der Gesamtheit aller Mikroorganismen wie Bakterien, Archaeen, Viren, Pilze und Protozoen), welches unter anderem durch die Zusammensetzung unserer Nahrung beeinflusst wird. Viele der sekundären Pflanzeninhaltsstoffe werden durch das Darmmikrobiom direkt verstoffwechselt bzw. werden sie durch den Verdauungsvorgang der Zellwandbestandteile der pflanzlichen Nahrung erst freigesetzt.

Im Körper selbst beeinflussen sich eine Vielzahl von Metaboliten, Hormonen, Pharmaka und Nahrungsbestandteile, durch die Nutzung der gleichen Transportwege im Blut bzw. der gleichen Abbauewege in der Leber gegenseitig. Verschiedene Vitamine, sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe und Pharmaka nutzen dieselben Entgiftungsmechanismen. Beispielsweise ist eine parallele Einnahme mit mehreren Medikamenten mit einem geringeren Gehalt an Vitaminen und Pflanzeninhaltsstoffen im Blutplasma verbunden (Weber et al. 2020). Unter anderem wird ein verstärkter Abbau von Vitaminen durch Pharmaka-induzierte Entgiftungsmechanismen als mögliche Ursache diskutiert (Weber et al. 2020).

Die Zusammenhänge zwischen Nahrungszufuhr und Gesundheit werden häufig in umfassenden **Kohortenstudien** untersucht. Die gegenwärtige wissenschaftliche Datenlage in Deutschland ist lückenhaft oder veraltet, wie beispielsweise die Nationale Verzehrstudie II des BMEL (2005–2007) oder die EPIC-Potsdam-Studie (Ersterhebung 1994–1998).<sup>82</sup> Solche langfristigen Beobachtungen, oft inklusive Nachbeobachtungen, ermöglichen es, mit statistischen Methoden Zusammenhänge zu postulieren, die anschließend in Interventionsstudien auf Kausalität geprüft werden. Aufgrund der langen Zeiträume, in denen sich ernährungsmitbedingte Stoffwechselerkrankungen manifestieren, werden in solchen Studien häufig sogenannte Surrogatparameter (d.h. Ersatzgrößen wie beispielsweise die Blutdrucksenkung

---

81 National Research Council (US) Committee on Diet and Health. 1989. Chapter 11. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK218749/>

82 NVS II. [https://www.mri.bund.de/fileadmin/MRI/Institute/EV/NVSII\\_Abschlussbericht\\_Teil\\_2.pdf](https://www.mri.bund.de/fileadmin/MRI/Institute/EV/NVSII_Abschlussbericht_Teil_2.pdf), EPIC-Potsdam. <https://www.dife.de/forschung/kooperationen/epic-studie/#c3109>

anstatt der Häufigkeit von Herzinfarkten) verwendet. Diese Untersuchungen müssen von mechanistischen Plausibilitätsuntersuchungen durch die molekularen Ernährungswissenschaften begleitet werden. Herausforderungen ergeben sich häufig durch eine zu kurze Studiendauer, der korrekten Auswahl von geeigneten Surrogatparametern oder einer geringen Anzahl von Teilnehmenden. Auch die Auswahl der Teilnehmenden nach relevanten Merkmalen wie beispielsweise Migrationsgeschichte, Familienmodell, Alter, Geschlecht, Sozialstatus oder Wohnort spielt eine essenzielle Rolle (Grune et al. 2025). Denn sind nur bestimmte Bevölkerungsgruppen vertreten, gelten die entsprechenden Schlussfolgerungen nicht für die gesamte Bevölkerung. Werden die Teilnehmenden einer Ernährungsintervention immer detaillierter charakterisiert, führt dies konsequenterweise zu einem Forschungsansatz der heute als Präzisionsernährung bezeichnet wird (siehe Kapitel 4.2).

### 3.3 Lebensmittelanalytik

Lebensmittel sind komplex zusammengesetzte biologische Systeme, die auf unterschiedlichen Ebenen unter Einsatz einer Vielzahl unterschiedlicher analytischer Methoden untersucht werden können. Die Auswahl der zu erfassenden Substanzen und damit auch der einsetzbaren Analyseverfahren richtet sich nach den jeweiligen Fragestellungen (Mattisek & Fischer 2021).

Zu den Hauptaufgaben der zahlreichen Lebensmittellabore gehört gegenwärtig die **Analytik von Keimen, Pestiziden, Schwermetallen und anderen Schadstoffen**. Hierfür steht eine Reihe gut etablierter Techniken wie beispielsweise chromatographische und massenspektrometrische Methoden zur Verfügung. Die **Herkunftsanalytik** sowie der **Nachweis von verbotenen Inhaltsstoffen** gewinnt zunehmend an Bedeutung. Lebensmittellabore tragen so wesentlich dazu bei, gesundheitsschädliche Substanzen in unserem Essen nachzuweisen und verbotene Zusatzstoffe aufzudecken. Neue Schadstoffe von Nano- und Mikroplastik bis zu per- und polyfluorierten Chemikalien (PFAS) stellen die Analytik gegenwärtig vor erhebliche Herausforderungen, da für diese Kontaminanten bislang noch standardisierte Verfahren fehlen. Mit steigenden Preisen und Lieferkettenproblemen wächst zunehmend auch das Risiko für „Food Fraud“ (**Lebensmittelbetrug**), also das Inverkehrbringen von Lebensmitteln mit dem Ziel, durch absichtliche Täuschung der Konsumierenden einen finanziellen oder wirtschaftlichen Vorteil zu erlangen.<sup>83</sup> Zur Qualitätskontrolle und zum Nachweis solcher Lebensmittelfäl-

---

83 FFN. [https://ec.europa.eu/food/safety/food-fraud\\_en](https://ec.europa.eu/food/safety/food-fraud_en)

schungen und -betrug sind aufwändige Analyseverfahren erforderlich. Da Nahrungsmittel aufgrund des Klimawandels und unsachgemäßer Lagerung schneller verderben können, rücken leistungsstarke Methoden für den **Nachweis von gesundheitsschädlichen Mikroorganismen, Schimmelpilzen und anderen Schadorganismen** gegenwärtig stärker in den Fokus. Neue Aufgaben und Herausforderungen entstehen außerdem durch die Qualitätssicherung und -kontrolle von sogenanntem „**Novel Food**“, wie beispielsweise Nahrungsmittel aus Seegurken, Algen oder Insekten. Auch der wachsende Markt der **vegetarischen und veganen Ernährung** verlangt nach innovativen Verfahren der chemischen Analytik sowie nach mikrobiologischen und sensorischen Untersuchungen, nicht zuletzt, da mit deren Herstellung oft neuartige, hochgradig komplexe industrielle Verarbeitungsverfahren verbunden sind.

Insgesamt steigen die Anforderungen an die Lebensmittelanalytik und erfordern eine kontinuierliche **Weiterentwicklung der einsetzbaren Analyseverfahren**.

## 3.4 Entwicklung gesundheitsförderlicher Lebensmittel

### 3.4.1 Klassische Züchtung und neue Züchtungsziele

Traditionell sind in der **Pflanzenzüchtung** Ertrag und Ertragsstabilität, also die Erzielung eines möglichst hohen Ertrages unabhängig von abiotischen oder biotischen Stressfaktoren (siehe Kapitel 1.3.2 und 1.3.3), die entscheidenden Züchtungsziele. Ein früher Schwerpunkt lag auf der Anpassung von Pflanzen als Futter für Nutztiere. Beispielsweise weist Mais einen Mangel an der essenziellen Aminosäure Lysin auf. Um Maissorten zu entwickeln, die einen höheren Lysingehalt aufweisen, gab es eine Reihe von sowohl klassischen als auch gentechnischen Ansätzen in der Pflanzenzüchtung (Galili & Amir 2013). In den letzten 20 Jahren wurden dann auch eine Reihe von neuen Züchtungszielen formuliert, die für die menschliche Ernährung optimal stofflich angepasste Nutzpflanzen beinhalten. Ein Beispiel ist die **Biofortifikation** („biologische Verstärkung“), welche Nutzpflanzen mit einem erhöhten Gehalt an für die menschliche Ernährung wichtigen Inhaltsstoffen züchtet. Ziel ist dabei die Anreicherung mit Mineralstoffen (insbesondere Eisen, Zink und Kalzium), essenziellen Fettsäuren, essenziellen Aminosäuren, Vitaminen (Provitamin A, Vitamin B9 und Vitamin E), Carotinoiden, Anthocyanen und anderen Antioxidantien (Graham et al. 1997; Bouis 2003; Jaiswal et al. 2022; Ofori et al. 2022). Hier kommen sowohl klassische als auch gentechnische Verfahren zum Einsatz.

In der **klassischen Züchtung** werden Pflanzen oder Tiere mit erwünschten Merkmalen gekreuzt und die Nachkommen auf verbesserte erwünschte Eigenschaften hin untersucht, die sich in der Regel durch die Kombination von genetischen Informationen der Eltern ergeben. Dabei wird in der modernen Pflanzenzüchtung versucht, das Testen auf dem Feld, was sehr zeit- und kostenintensiv ist, durch die Verwendung von molekularen Markern (wie beispielsweise sogenannte polymorphe DNA-Sequenzen) zu ersetzen und somit schon sehr früh das gewünschte Kreuzungsprodukt zu identifizieren, welches die positiven Eigenschaften der Eltern kombiniert. Bei komplexen, von vielen Genen (polygen) bestimmten Eigenschaften werden, basierend auf der Kenntnis des Genoms, Algorithmen eingesetzt, wie beispielsweise die sogenannte genomische Selektion, die es erlauben, die Passfähigkeit von Elternpflanzen in der Hybridzüchtung beispielsweise beim Mais vorherzusagen und damit wiederum Zeit, Aufwand und Kosten zu sparen (Xu et al. 2022).

Für die Züchtung von **Nutzpflanzen mit verbesserten Inhaltsstoffen** werden in einem ersten Schritt die für die Biosynthese der jeweiligen Inhaltsstoffe wichtigen Gene mittels sogenannter Genomweiter Assoziationsstudien (GWAS) lokalisiert. In einem zweiten Schritt werden Polymorphismen, die die Differenzierung der beiden Eltern in der F<sub>2</sub>-Generation erlauben, identifiziert und zur schnellen Filterung der F<sub>2</sub>-Population eingesetzt. Abschließend muss mittels biochemischer Analyseverfahren überprüft werden, ob die erzeugte Pflanze in Bezug auf die gewünschten Inhaltsstoffe tatsächlich ein besseres Profil aufweist. Zwischen 2004 und 2019 wurden in 30 Ländern Asiens, Afrikas und Lateinamerikas 242 biofortifizierte Sorten von elf wichtigen Kulturpflanzen freigesetzt. Zu diesen konventionell gezüchteten biofortifizierten Nutzpflanzen zählen mit Eisen angereicherte Perlhirse und Kuhbohne, mit Zink angereicherter Reis, Weizen und Mais, sowohl mit Eisen als auch mit Zink angereicherte Linsen und Sorghumhirse sowie Sorten mit verbessertem Vitamin A-Gehalt in Süßkartoffeln, Mais, Maniok und Bananen (La Frano et al. 2014; Kumar et al. 2022). Zukünftig wird die klassische Züchtungsforschung zweifellos weiterhin eine wichtige Rolle spielen, jedoch ist ihr Potenzial für eine Reihe an Züchtungszielen bereits weitestgehend ausgeschöpft. Aber auch gentechnische Verfahren kommen in der Erzeugung biofortifizierter Pflanzen zur Anwendung (De Steur et al. 2017; siehe Kapitel 2.3.1). Bekannteste Beispiele sind der sogenannte Goldene Reis oder Tomaten mit einem hohen Gehalt an Antioxidantien wie Anthocyanen (Moghissi et al. 2016; Gonzali & Perata 2020; siehe Kapitel 2.3.1).

### 3.4.2 Zum Potenzial der modernen Züchtungstechniken

**Gentechnisch veränderte Nutzpflanzensorten** leisten bereits heute einen unersetzlichen Beitrag zur Nahrungsmittelproduktion auf unserem Planeten (Nature 2013). Aufgrund der hohen Zulassungshürden sind die aktuellen Anwendungen momentan jedoch noch auf wenige Nutzpflanzen und relativ wenige Merkmale beschränkt, insbesondere auf Resistenzen gegen Schädlinge und auf Krankheiten sowie Schutz vor Unkräutern. Eine große Anzahl weiterer Anwendungen wurde bereits erfolgreich in Laborversuchen getestet, jedoch wurden die als Prototypen entwickelten transgenen Pflanzen bislang nicht kommerzialisiert. Dazu gehören zahlreiche **Nutzpflanzen mit veränderten Inhaltsstoffen**, aber auch **Pflanzen, die Medikamente oder erneuerbare Rohstoffe für die Industrie produzieren**. Neben aufwändigen, langwierigen und teuren Zulassungsverfahren haben auch durch professionelle Kampagnen geschürte Ängste von Konsumierenden dazu beigetragen, dass die meisten dieser gentechnisch veränderten Pflanzensorten bislang den globalen Markt noch nicht vollständig erreicht haben.

Viel wird in Zukunft davon abhängen, ob Politik und Gesellschaft zu einem rationalen Umgang mit der „grünen“ Gentechnik finden, der den Erkenntnissen und Erfahrungen von drei Jahrzehnten großflächigem kommerziellem Anbau (Nature 2013) sowie umfangreicher begleitender Sicherheitsforschung Rechnung trägt. Unbestritten ist, dass viele Züchtungsziele nur durch Gentechnik erreichbar sind. Wenn beispielsweise im Genpool einer Pflanzenart kein Resistenzgen gegen ein bestimmtes Schadinsekt vorhanden ist, lässt sich eine Insektenresistenz nur durch den Einbau eines Fremdgens erzeugen, wie beispielsweise die sogenannten *Bt*-Gene aus dem Bakterium *Bacillus thuringiensis*, deren Einbringung in die Genome von Kulturpflanzen wie Baumwolle oder Mais Resistenzen gegen nahezu alle Schadinsekten vermitteln kann. Auch die meisten Anwendungen, die den Einsatz von Pflanzen als Lieferantinnen nachwachsender Rohstoffe oder als Produktionsstätten für Medikamente (beispielsweise essbare Impfstoffe) zum Ziel haben, kommen nicht ohne Fremdgene und den Einsatz konventioneller Gentechnik aus.

Auch die gewaltigen Fortschritte in der **synthetischen Biologie** eröffnen nahezu unbegrenzte Möglichkeiten (siehe Kapitel 2.3.3) bis hin zum Entwurf völlig neuer Organismen am Reißbrett (Nyerges et al. 2023; Chen et al. 2024). Ob und in welchem Umfang dieses Potenzial in absehbarer Zeit für die Nahrungsmittelproduktion genutzt werden kann, wird vor allem vom künftigen Rechtsrahmen und den Bedingungen für die Zulassung solcher Organismen für den kommerziellen Anbau bzw. die kommerzielle Tierzucht abhängen.

Die technisch einfache Ausführbarkeit der **modernen Genomedierungsverfahren** (siehe Kapitel 2.3.2) und die in vielen Ländern inzwischen erfolgte Deregulierung der neuen Züchtungstechniken hat in den vergangenen zehn Jahren bereits zu zahlreichen Anwendungen und kommerziellem Anbau vieler verschiedener Kulturpflanzenarten sowie bei einigen Nutztierarten geführt.<sup>84</sup> Die überwältigenden Vorteile der Genomedierungstechniken wie **Schnelligkeit und Präzision** werden absehbar die neuen Züchtungstechniken zu einer tragenden Säule der Züchtungsforschung machen und – vorausgesetzt, dass auch die EU die regulatorischen Hürden abbaut – die klassischen Mutagenesetechniken, wie die Anwendung von Chemikalien oder radioaktiver Bestrahlung, nahezu komplett ablösen.

Neben den vor allem den Produzierenden zugutekommenden Eigenschaften wie erhöhte Resistenzen, verbesserte Toleranzen und Ertragssteigerungen werden zunehmend auch Merkmale durch Genomedierung züchterisch bearbeitet, die Vorteile für die Konsumierenden mit sich bringen. Dazu gehört beispielsweise die verlängerte Haltbarkeit von Nahrungsmitteln oder die Verbesserung der Lebensmittelqualität.<sup>85</sup> So wurde beispielsweise die Aufnahme von giftigem Arsen und Cadmium durch Reispflanzen gesenkt und eine für die Gesundheit förderliche Fettsäurezusammensetzung von Pflanzenölen erreicht (Pixley et al. 2022).

Neben der klassischen Züchtung auf neue Merkmale eröffnen die neuen Züchtungstechniken auch die Möglichkeit, in kürzester Zeit **neue Kulturpflanzenarten** zu gewinnen. Alle unsere heutigen Kulturpflanzenarten sind aus Wildarten durch einen oft jahrhundertelangen Züchtungsprozess entstanden (Domestizierung). Dank der modernen Genomforschung wissen wir heute, welche Veränderungen im Genom für die Domestizierung entscheidend waren. Viele dieser Veränderungen können durch den Einsatz von Genomedierungsverfahren in das Genom von Wildarten eingebracht werden, womit die Erzeugung einer neuen Kulturpflanzenart im Zeitraffer ablaufen kann: Man spricht dann von Neudomestizierung (auch: Neodomestizierung). Ein Beispiel hier ist eine wilde Tomatenart (*Solanum pimpinellifolium*), die durch das gezielte Editieren von sechs Genen in eine neue Kulturtomate mit größerer Frucht umgewandelt werden konnte (Zsögön et al. 2018).

Momentan deutet alles darauf hin, dass die erhebliche Beschleunigung der Züchtungsforschung, die man sich von den Genomedierungstechniken erhofft, tatsächlich eintritt, sodass der künftige Beitrag der neuen Züchtungstechniken zur weltweiten Nahrungsmittelproduktion kaum überschätzt werden kann.

---

84 EU-SAGE. <https://www.eu-sage.eu/genome-search>,  
<https://crispr-gene-editing-regs-tracker.geneticliteracyproject.org/united-states-crops-food/>

85 <https://crispr-gene-editing-regs-tracker.geneticliteracyproject.org/united-states-crops-food/>

**Zusammenfassung:**

Unsere Nahrungsmittel enthalten eine Vielzahl an bioaktiven Substanzen, deren genaue Wirkung auf den menschlichen Körper noch nicht vollständig verstanden ist. Zum einen spielt die Lebensmittelanalytik eine zentrale Rolle, um diese Inhaltsstoffe zu identifizieren und zu quantifizieren. Zum anderen helfen epidemiologische Studien, die gesundheitlichen Wirkungen besser zu verstehen.

Um Pflanzen mit optimierten Nährstoffprofilen für gesundheitsförderliche Lebensmittel zu entwickeln, spielt nach wie vor die klassische Züchtung eine wichtige Rolle. Gleichzeitig haben Gentechnik, synthetische Biologie und neue Züchtungstechniken wie die Genomedierung, die durch gezielte Veränderungen im Erbgut eine schnelle und präzise Anpassung von Pflanzen an die Umwelt und die Bedürfnisse der menschlichen Ernährung ermöglichen, immenses Potenzial, um künftig Ernährungssicherheit und Lebensmittelqualität zu sichern.

## 4 Akuter Forschungsbedarf

Zahlreiche Studien und Stellungnahmen aus den letzten Jahren unterstreichen den dringenden Bedarf, das globale wie nationale Agrar- und Ernährungssystem zu verbessern.<sup>86</sup> Im Folgenden werden Forschungsfelder der Agrar- und Ernährungswissenschaften sowie angelegte Disziplinen beschrieben, in denen weiterer Forschungsbedarf besteht. Nur durch verstärkte Forschungsinvestitionen kann ein erfolgreicher Wandel des Agrar- und Ernährungssystems hin zu Ressourcenschonung, Nachhaltigkeit und Gesundheit gelingen.

### 4.1 Inhaltsstoffe von Nahrungsmitteln

Für die Analyse, Strukturaufklärung und Synthese der Hauptbestandteile von Lebensmitteln wie Proteine, Zucker, Stärke, Fette und Öle gibt es heutzutage exzellente Verfahren. Gleiches gilt für mineralische Bestandteile wie Kalzium, Magnesium und Eisen. Die Bestimmung von in den Lebensmitteln enthaltenen Sekundärmetaboliten ist dagegen nach wie vor eine große Herausforderung. Ursache sind die niedrigen Konzentrationen, in denen die meisten Sekundärmetabolite in Pflanzen enthalten sind, sowie ihre äußerst hohe chemische Vielfalt. Die möglichst umfassende Analyse aller in einer komplexen Probe enthaltenen Metabolite wird als **Metabolomik** bezeichnet. Sie erlaubt prinzipiell die umfassende und unvoreingenommene Analyse aller in einer Lebensmittelprobe enthaltenen Metabolite und setzt in der Regel GC-MS (Gaschromatographie mit Massenspektrometrie) und UPLC-MS (UPLC mit Massenspektrometrie) ein. NMR-spektroskopische

---

86 IPCC. 2023. AR6. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_FullVolume.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf), IPBES. 2024. Nexus Assessment Report. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11382230>, FSEC. 2024. [https://foodsystemeconomics.org/wp-content/uploads/FSEC-Global\\_Policy\\_Report.pdf](https://foodsystemeconomics.org/wp-content/uploads/FSEC-Global_Policy_Report.pdf), GLOPAN. 2020. [https://www.glopan.org/wp-content/uploads/2020/09/Foresight-2.0\\_Future-Food-Systems\\_For-people-our-planet-and-prosperity.pdf](https://www.glopan.org/wp-content/uploads/2020/09/Foresight-2.0_Future-Food-Systems_For-people-our-planet-and-prosperity.pdf)

Methoden (engl. „nuclear magnetic resonance“; auf Kernspinresonanz basierend) sind dagegen deutlich weniger sensitiv und finden derzeit nur eingeschränkt Anwendung (Emwas et al. 2019; de Souza et al. 2021). Massenspektrometrie-basierte metabolomische Methoden erlauben eine relativ umfassende Analyse der in einer Lebensmittelprobe enthaltenen Metaboliten. Die ersten Informationen sind die exakte Masse des betreffenden Metaboliten ( $m/z$ , Masse-zu-Ladung-Verhältnis;  $Ms/Ms$ ; Tandem-Massenspektrometrie) sowie sein Verhalten unter bestimmten chromatographischen Bedingungen ( $R_f$ , Retentionszeit). Beide Parameter sind unter hoch standardisierten analytischen Bedingungen weitestgehend spezifisch und reproduzierbar, erlauben jedoch a priori keine Aussage über die chemische Natur des Metaboliten (Li & Gaquerel 2021). Denn Algorithmen, die es erlauben, aus der Retentionszeit in Kombination mit den massenspektroskopischen Parametern ( $R_f$ ,  $m/z$ ;  $Ms/Ms$ ) eine derartige Vorhersage zu erhalten, existieren derzeit noch nicht. Neue KI-basierte Methoden könnten hier zukünftig Lösungen bieten (Dührkop et al. 2021).

Derzeit besteht der Königsweg noch in der Detektion einer möglichst großen Anzahl an Naturstoffen und deren Vermessung, für die die eingesetzten chromatographischen und massenspektroskopischen Systeme entscheidend sind (Shahaf et al. 2016). Häufig kann die chemische Identität der detektierten Substanzen jedoch nicht ermittelt werden. Daraus ergibt sich folgender Forschungsbedarf:

- Die Entwicklung neuer **KI-basierter Verfahren für die Zuordnung einer chemischen Struktur** zu einer Substanz anhand von massenspektroskopischen und chromatographischen Parametern und
- die Entwicklung von effizienten **Verfahren zur Reinigung von Sekundärmetaboliten** aus ernährungsrelevanten Pflanzen sowie von leistungsfähigen **Methoden zur Identifizierung möglichst aller chemischer Bestandteile** von – insbesondere verarbeiteten – Lebensmitteln.

Die **Synthese von komplexen Naturstoffen** ist in der Regel technisch anspruchsvoll und kostspielig und bietet kurzfristig keine Lösung für analytische Probleme. Langfristig könnten grundlegende Fortschritte in der Synthesechemie (die unter anderem auch von KI-gestützten neuen Methoden kommen könnten) der Inhaltsstoffanalytik neue Impulse verleihen. Entsprechend sind Forschungsinvestitionen in diesem Bereich von hoher Relevanz.

## 4.2 Wirkungen von Inhaltsstoffen und Präzisionsernährung

Die in unseren Nahrungsmitteln enthaltenen Inhaltsstoffe wie Kohlenhydrate, Fette und Proteine, aber auch Vitamine, Mineralstoffe und sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe regulieren die biochemischen Prozesse und Stoffwechselmechanismen in unserem Körper. Sie wirken in verschiedenen Systemen und Organen im menschlichen Organismus, wie beispielsweise dem Verdauungssystem, dem Blutkreislauf, dem endokrinen System oder der Leber und den Muskeln. Sie sind notwendig für zahlreiche biologische Prozesse wie beispielsweise Zelldifferenzierung und Embryonalentwicklung. Sie unterstützen beispielsweise unser Immunsystem, den Sehvorgang, die Verdauung oder auch das Herz-Kreislauf-System. Sie nehmen Einfluss unter anderem auf Epigenetik, Signalwege, biochemische und enzymatische Prozesse, sind an der Regulierung unseres Blutzuckerspiegels beteiligt und haben Auswirkungen auf den Hormonhaushalt und unser Gehirn. Es besteht gegenwärtig erhöhter Forschungsbedarf zu **molekularen Mechanismen und Wirkorten der Lebensmittelinhaltsstoffe**, die wir konsumieren, und zu den genauen **Wechselwirkungen von Lebensmittelinhaltsstoffen**.

Eine angemessene Energiezufuhr und eine abwechslungsreiche Auswahl an Nährstoffen sind entscheidend, um einen optimalen Ablauf dieser komplexen Prozesse im menschlichen Körper zu gewährleisten. Erhitzen, Gelieren oder andere Verfahren während der Lebensmittelverarbeitung die Verdauung und Absorption von Nahrungsbestandteilen in unserem Körper wesentlich beeinflussen und sich so positiv oder negativ auf Stoffwechselmechanismen auswirken. Die verschiedenen Lebensmittelbestandteile spielen so eine tragende Rolle für die menschliche Gesundheit und für die Entstehung und dem Verlauf ernährungsmitbedingter Krankheiten wie beispielsweise Adipositas, Typ-2-Diabetes und Herz-Kreislauf-Erkrankungen, wie die Interdisziplinäre Arbeitsgruppe in „Denkanstoß“ 18 (Grune et al. 2025) gezeigt hat.

Die **Präzisionsernährung** ist ein junger Forschungsansatz in der Ernährungsmedizin, bei dem individuelle Ernährungsbedürfnisse auf Grundlage von genetischen, metabolischen und lebensstilbezogenen Faktoren berücksichtigt werden (Semmler & Datz 2022). Sie geht davon aus, dass eine gesundheitsförderliche Ernährung nicht einheitlich für die gesamte Bevölkerung definiert werden kann, sondern nur für Teile der Bevölkerung gelten kann und gruppenspezifisch angepasst werden muss. Entsprechend wird die Gesamtbevölkerung nach bestimmten Kriterien unterteilt, beispielsweise nach Alter, Geschlecht, Gewicht, Genetik oder hormonellen Reaktionen. Ziel ist es, für jede dieser Gruppen maßgeschneiderte

gesundheitsförderliche Ernährungsempfehlungen zu definieren. Dabei spielen auch geschmackliche, ethische und soziale Aspekte sowie individuelle Ernährungsziele (beispielsweise Gewichtsabnahme oder Muskelaufbau) eine wichtige Rolle. Mithilfe moderner Technologien wie künstlicher Intelligenz und „Big Data“ können Forschende in einem weiteren Schritt personalisierte Ernährungspläne erstellen, die die Gesundheit und das Wohlbefinden von Einzelnen verbessern können. Ob dieser Ansatz langfristig unsere Gesundheit und Lebensqualität verbessert und einen Beitrag zur Prävention von Krankheiten leisten kann, muss durch weitere Forschung überprüft werden.

## 4.3 Klima- und Umweltfolgen

Angeichts des weiter fortschreitenden Klimawandels ist eine Ernährungswende hin zu einem resilienten, ressourcenschonenden und innovativen Agrar- und Ernährungssystem außerordentlich dringlich. Wissenschaftsakademien in Deutschland haben hierzu bereits konkrete Handlungsoptionen formuliert, wie beispielsweise die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina zum Zustand der Moore<sup>87</sup>, die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften zur Grünen Gentechnik<sup>88</sup> oder die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften acatech zur nachhaltigen Stickstoffnutzung.<sup>89</sup>

Aktuell wird in den interdisziplinären Wissenschaften eine Diskussion darüber geführt, welche der Handlungsoptionen in der globalisierten Welt und dem komplexen und vernetzten Agrar- und Ernährungssystem am wirksamsten sind. Auch innerhalb der Interdisziplinären Arbeitsgruppe führten die Bewertung dieser politischen Empfehlungen und der Umgang mit den ökologischen wie ökonomischen Folgen (sogenannte Externalitäten) der Nahrungsmittelproduktion zu kontroversen Debatten. Zwei zentrale Positionen, die die Notwendigkeit für intensive Forschungsbemühungen zur Bewältigung von Klima- und Umweltfolgen verdeutlichen, sind nachfolgend skizziert.

---

87 Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina. 2014. [https://doi.org/10.26164/LEOPOLDINA\\_03\\_01185](https://doi.org/10.26164/LEOPOLDINA_03_01185)

88 BBAW. 2021. <https://www.nomos-elibrary.de/de/10.5771/9783748927242/fuenfter-gentechnologiebericht>

89 acatech. 2023. <https://www.acatech.de/publikation/nachhaltige-stickstoffnutzung-in-der-agrarwirtschaft/>

## Position 1

Neben ihrem wichtigen Beitrag zur Ernährungssicherung verursacht die Landwirtschaft erhebliche Umweltschäden, etwa in Bezug auf Klima, Biodiversität und Stickstoffbelastung der Umwelt. In Deutschland besteht besonderer Handlungsbedarf in Bezug auf die Wiedervernässung und alternative Nutzung von trockengelegten Moorböden, die hohe Emissionen verursachen (Tiemayer et al. 2020). Diese Umweltfolgen spiegeln sich im Markt nicht wider und führen zu Wettbewerbsnachteilen für Landwirt:innen, die ressourcenschonend und umweltfreundlich arbeiten. Dies gilt auch für viele deutsche Betriebe, die im internationalen Vergleich recht ressourceneffizient arbeiten oder arbeiten möchten.

Zur Minderung von Umweltschäden stehen verschiedene Politikinstrumente zur Verfügung, darunter Steuern und Abgaben, Gebote und Verbote, Subventionen, den Handel mit Emissionszertifikaten, und öffentliche Forschungsinvestitionen, welche jeweils eigene Vor- und Nachteile haben. Marktbasierte und ergebnisorientierte Instrumente gelten oft als besonders effizient, da sie eine besonders umfassende Lenkungswirkung ausüben und Anreize für innovative neue Verfahren geben. Wird durch die Vermeidung der Umweltschäden die heimische Produktion verteuert, kann es durch den internationalen Handel zu einer Verlagerung von Umweltschäden ins Ausland kommen („**Leakage**“). So schätzt eine Studie (Barreiro-Hurle et al. 2021a), dass die Farm2Fork-Strategie der EU zwar eine substantielle Verbesserung der Umweltqualität innerhalb der EU erreichen kann, beispielsweise in Bezug auf Luftqualität oder Biodiversität (Barreiro-Hurle et al. 2021b). Durch „Leakage“ werden jedoch die Hälfte (bei gleichzeitiger Neuausrichtung der „Common Agricultural Policy“) oder sogar zwei Drittel (ohne Neuausrichtung) der Einsparungen von landwirtschaftlichen Emissionen durch höhere Emissionen im Ausland ausgeglichen (Barreiro-Hurle et al. 2021b). Eine wichtige Grundannahme hierbei ist, dass andere Staaten ihre Umweltgesetzgebung nicht anpassen. Dabei ist es ein explizites Ziel der Klimadiplomatie, eigene Verbesserungen bei Verhandlungen in die Waagschale zu legen, um andere Staaten ebenfalls zu einer Verbesserung ihrer Gesetzgebung zu animieren. Des Weiteren kann „Leakage“ verhindert werden – oder sogar im Ausland Emissionen eingespart werden – wenn ausländische Produkte durch Grenzausgleichssteuern mit heimischen Produkten in einen fairen Wettbewerb gestellt werden.

Mögliche **konkrete Handlungsoptionen** beinhalten (i) eine Vereinfachung des rechtlichen Rahmens zur Moorvernässung gemäß den Empfehlungen der Leopoldina<sup>90</sup>, (ii) eine Abgabe auf Stickstoffüberschüsse, wie vom Sachverständigenrat für Umweltfragen empfohlen<sup>91</sup>, (iii) eine Besteuerung von Pestiziden gemäß ihrer Ökotoxizität, (iv) die Förderung von Biodiversität basierend auf Ausschreibungen für regionale Konsortien in Anlehnung an die niederländischen Agri-Environment-Climate Schemes<sup>92</sup> und (v) die öffentliche Förderung von Forschung, Entwicklung und Verbreitung von neuen ressourceneffizienten und umweltschonenden Technologien, Pflanzensorten und Anbauverfahren.

Die Auswahl geeigneter Instrumente sollte sich an Kriterien wie Kosteneffizienz der Vermeidung, Passgenauigkeit auf verschiedene landwirtschaftliche Produktionssysteme und Umweltbedingungen, bürokratischem Aufwand, indirekte Umwelteffekte durch die Produktionsverlagerung ins Ausland sowie der Verteilungswirkung orientieren. So kommen oft unterschiedliche Instrumente für unterschiedliche Umweltprobleme zur Anwendung.

## Position 2

Landwirtschaft erzeugt, ebenso wie andere Wirtschaftsbereiche, sowohl externe Kosten als auch externen Nutzen. Externe Kosten werden nicht von deren Verursachern getragen, sondern von anderen Gruppen oder der Gesellschaft insgesamt. Und externer Nutzen kommt nicht den Verursachern zugute, sondern anderen Gruppen oder der Gesellschaft insgesamt. Beide führen zu wirtschaftlichen Ergebnissen, die aus Sicht der Gesellschaft nicht optimal sind. Im Falle von externen Kosten wird aus Sicht der Gesellschaft zu viel produziert; bei Vorliegen externen Nutzens dagegen zu wenig.

Die Wissenschaft hat eine Reihe von Instrumenten zur Internalisierung (d. h. der Korrektur) von solchen Externalitäten entwickelt, wie beispielsweise Forschungsinvestitionen, Subventionen, Steuern und Abgaben, handelbare Zertifikate, Gebote und Verbote sowie die Förderung innovativer Technologien. Welche dieser Instrumente unter welchen Umständen zur Korrektur welcher Externalitäten geeignet sind, ist vom Prinzip her weitgehend bekannt. Allerdings beschränken sich die

---

90 Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina. 2014. [https://doi.org/10.26164/LEOPOLDINA\\_03\\_01185](https://doi.org/10.26164/LEOPOLDINA_03_01185)

91 SRU. 2015. [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02\\_Sondergutachten/2012\\_2016/2015\\_01\\_SG\\_Stickstoff\\_HD.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2012_2016/2015_01_SG_Stickstoff_HD.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

92 Ministry of Economic Affairs. 2016. [https://ec.europa.eu/enrd/sites/default/files/w12\\_collective-approach\\_nl.pdf](https://ec.europa.eu/enrd/sites/default/files/w12_collective-approach_nl.pdf)

allermeisten der bisherigen Analysen auf lokale, nationale oder regionale Effekte. Dies ist ein schwerwiegender Fehler der traditionellen Analysen, denn räumlich beschränkte Analysen können zu wirtschaftspolitischen Markteingriffen führen, die das Gegenteil von dem bewirken, was vorgeblich damit erreicht werden soll.

So könnten beispielsweise die für die Landwirtschaft derzeit vorgesehenen Regelungen im Green Deal der EU die Produktion sowie die lokalen heimischen Klimagasemissionen verringern. Jedoch würden durch die dadurch ausgelösten beschleunigten Ausdehnungen der Agrarflächen in anderen Teilen der Welt zusätzliche globale landwirtschaftliche Emissionen freigesetzt, die die Verringerung der heimischen Emissionen um ein Vielfaches übersteigen. So würden die weltweiten Emissionen per Saldo deutlich zunehmen, anstatt, wie von der Politik oft angenommen, abnehmen. Wie fehlgeleitet politische Maßnahmen sind, die Externalitäten unvollständig und damit fehlerhaft berücksichtigen, zeigt sich auch in anderer Hinsicht im landwirtschaftlichen Teil des Green Deal, mit dem die EU für andere Länder mit gutem Beispiel vorangehen will. Wenn andere Länder dem Beispiel der EU folgen und ebenfalls eine auf Verringerung der Flächenproduktivität abzielende Politik betreiben würden, wäre der Rückgang der Nahrungsmittelproduktion noch ausgeprägter und damit auch die zusätzlichen Ausdehnungen der weltweiten Agrarflächen sowie die damit verbundenen Verluste an natürlichen Lebensräumen und deren Biodiversität. Per Saldo würden die weltweiten landwirtschaftlichen Klimagasemissionen noch stärker zunehmen. Analysen zu den gesamtgesellschaftlichen Wirkungen von Externalitäten müssen daher immer auch die globalen Effekte quantifizieren. Andernfalls können diese zu irreführenden Ergebnisse führen.

Innovation und Produktivität sind Schlüsselstrategien, um externe Kosten zu verringern bzw. zu vermeiden. Sie sind daher die Gebote in der neuen Ära der Knappheit in der Weltagrarwirtschaft. Eine solche Agrarproduktion ist ökologisch nachhaltig, weil sie das Klima und Naturkapital der Welt schont; ökonomisch nachhaltig, weil die Landwirtschaft für den Bedarf der Verbraucher:innen produziert und nicht für die Politik; und sie ist sozial nachhaltig, weil genügend Nahrung hergestellt werden kann – zu Preisen, die sich auch die nicht so wohlhabenden Menschen in den armen Ländern der Welt leisten können. Ein Beispiel für innovative Absätze sind Produkte aus der molekularen Pflanzenzüchtung (siehe Kapitel 2.3).

## 4.4 Zukunfts- und Transformationsforschung

Unterschiedliche Landnutzungskonzepte wie beispielsweise Agrarforstsysteme, regenerative Landwirtschaft und Maßnahmen werden als Strategien vorgeschlagen, um die globale Ernährung unter Einhaltung der planetaren Grenzen zu sichern sowie um Klimaschutz (Smith et al. 2008; Leip et al. 2017; Reise et al. 2024; Jost et al. 2025) und Klimawandelanpassung (Iglesias & Garrote 2015; Mitter et al. 2015; Mitter & Schmid 2019; Kropf & Mitter 2022) im Agrar- und Ernährungssystem zu fördern. Trotz der Bandbreite an vorgeschlagenen Landnutzungskonzepten und Maßnahmen besteht eine sogenannte „**Anpassungslücke**“, also eine Differenz zwischen vorgeschlagenen und tatsächlich implementierten Landnutzungskonzepten und Maßnahmen (<sup>93</sup> und McCarl 2015). Diese wird von Akteur:innen und Expert:innen im Agrar- und Ernährungssystem bestätigt (Mitter et al. 2018).

Um innovative Landnutzungskonzepte und Maßnahmen zu fördern und die Anpassungslücke schrittweise zu schließen, sind weitere wissenschaftliche Analysen erforderlich, insbesondere in drei zentralen Bereichen:

- Erfassung der Motive von Landwirt:innen, warum vorgeschlagene Landnutzungskonzepte und Maßnahmen umgesetzt bzw. nicht umgesetzt werden, wobei individuelles und kollektives Verhalten und die Einbettung der Akteur:innen in soziale Netzwerke und spezifische Kontexte zu berücksichtigen sind. **Theoriegeleitete empirische Längsschnitt-Untersuchungen** sind selten aber zentral, um die Motive von Akteur:innen, die kausalen Zusammenhänge von Einflussfaktoren und deren Veränderungen über die Zeit für spezifische Kontexte zu verstehen (van Valkengoed & Steg 2019).
- Für die Erreichung eines normativen, gesellschaftlichen Ziels – wie die globale Ernährungssicherung unter Einhaltung der planetaren Grenzen – ist die strukturierte Einbindung der gesellschaftlichen Akteur:innen in den Forschungsprozess zielführend und wird in der Forschungspraxis zunehmend gelebt. Insbesondere in Zeiten multipler Krisen und großer Unsicherheiten, die beispielsweise durch sozioökonomische und klimatische Veränderungen entstehen, verlassen sich Menschen bei Entscheidungsfindungen vermehrt auf Heuristiken und Narrative (Constantino & Weber 2021). Daher besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der gemeinsamen, **transdisziplinären Entwicklung von Narrativen** für ein zukunftsfähiges Agrar- und Ernährungssystem

---

93 IPCC. 2014. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf)

einerseits und die **systematische Analyse der Effekte von Narrativen** auf individuelle Werthaltungen und soziale Normen und auf die Umsetzung von innovativen Landnutzungskonzepten und Maßnahmen andererseits.

- Durch die Komplexität und Dringlichkeit der Transformation des Agrar- und Ernährungssystems gewinnt die interdisziplinäre Zusammenarbeit weiter an Bedeutung. Notwendig ist die **Integration disziplinärer Theorien, Methoden und Daten** voranzutreiben, neue theoretische Konzepte und wissenschaftliche Methoden zu entwickeln und die Stärken der einzelnen Disziplinen und deren Ansätze zu nutzen. Dies erhöht zugleich die Robustheit und Relevanz wissenschaftlicher Ergebnisse (Mitter 2021).

#### **Zusammenfassung:**

Für die Sicherung der Nahrungsmittelqualität ist die Erforschung der Inhaltsstoffe von zentraler Bedeutung. Die Metabolomik ist bemüht, die genaue Zusammensetzung und die potenziellen gesundheitlichen Auswirkungen der Inhaltsstoffe besser zu verstehen. Darauf aufbauend können gezielt Nahrungsmittel mit optimiertem Nährwertprofil (unter anderem mithilfe der neuen Züchtungstechniken) erzeugt werden. Zum anderen müssen genaue Wirkorte, Funktionen, molekulare Mechanismen und Wechselwirkungen von Nahrungsmittelinhaltsstoffen besser verstanden werden, um diese in der Prävention und der Behandlung von Krankheiten erfolgsversprechend einsetzen zu können. Hier spielt die Präzisionsernährung eine wichtige Rolle.

Im Bereich der Nahrungsmittelsicherung besteht unter anderem Forschungsbedarf in Bezug auf den Umgang mit Umwelt- und Klimafolgen sowie in der Zukunfts- und Transformationsforschung. Diese beschäftigt sich mit den Herausforderungen, welche unterschiedliche landwirtschaftliche Akteur:innen bewältigen müssen, sowie mit geeigneten Strategien zur Förderung von modernen Landnutzungskonzepten und weiterer innovativer Lösungen. Diese Forschung kann dazu beitragen, die Nahrungsmittelproduktion nachhaltig an die Erfordernisse der sich verändernden globalen Umwelt und an die Bedürfnisse der Gesellschaft anzupassen.

# 5 Empfehlungen

## 5.1 Einsatz neuer Züchtungstechniken

Das **europäische und deutsche Gentechnikrecht** stammt aus den 1990er Jahren. Es geht davon aus, dass die Anwendung gentechnische Verfahren mit neuartigen Risiken für Umwelt und Gesundheit verbunden sein könnte. Die in den vergangenen drei Jahrzehnten weltweit gesammelten Erfahrungen mit praktischen Anwendungen der Gentechnik im Labor, in der Medizin und in der Landwirtschaft haben jedoch gezeigt, dass die anfänglich befürchteten Risiken sich nicht eingestellt haben und wissenschaftlich nicht belegbar sind.

### **Empfehlung 1: Anpassung der Bewertung von neuen Pflanzensorten an internationale Standards**

Die moderne Pflanzenzüchtung wird einen großen, sehr wahrscheinlich sogar den mit Abstand größten, Beitrag zur künftigen Sicherung der nachhaltigen Nahrungsmittelproduktion leisten müssen. Dazu werden neben der konventionellen Züchtung auch die neuen Züchtungstechniken (CRISPR/Cas und andere Methoden der sogenannten Genomedierung) und die Gentechnik, welche bereits einen beträchtlichen Beitrag zur weltweiten Nahrungsmittelproduktion leistet, unerlässlich sein. Das große Potenzial der modernen Züchtungstechniken, das bis zur Verbesserung der Effizienz der Photosynthese und der Übertragung der Fähigkeit zur Fixierung von Luftstickstoff auf Nutzpflanzen reicht, wird bislang noch nicht annähernd ausgeschöpft. Die veraltete rechtliche Regulierung in Deutschland und der EU, der die modernen Züchtungstechniken unterliegen, muss dringend modernisiert und dem aktuellen Wissensstand der Sicherheitsforschung angepasst werden. Grundsätzlich sollte die **Bewertung neuer Pflanzensorten über ihre (gegebenenfalls neuen) Eigenschaften** erfolgen. Dieser **produktbasierte („case-by-case“) Ansatz** ist in vielen Ländern außerhalb der EU seit langem gängige und bewährte Praxis.

Die gegenwärtige restriktive Regulierung von Gentechnik und Genomedierung in der EU führt zu einer unverantwortlichen Verzögerung von dringend benötigten Innovationen zur Sicherung der Welternährung. So hat etwa der Wissenschaftliche Dienst des Europäischen Parlaments festgehalten, dass die Risiken der Genomedierung deutlich niedriger sind als die Risiken der konventionellen Mutagenese mittels Chemikalien oder radioaktiver Strahlung.<sup>94</sup> Diese Formen der Mutagenese sind aber vom europäischen Gentechnikrecht seit jeher ausgenommen.

Nachdem mittels Genomedierung erzeugte neue Pflanzensorten bereits in vielen Ländern den konventionell gezüchteten Sorten gleichgestellt wurden und nicht mehr als Gentechnik reguliert werden, hat sich das EU-Parlament auf Vorschlag der EU-Kommission im Februar 2024 für eine ähnliche Regelung ausgesprochen. Deren verbindliche Einführung wäre ein wichtiger erster Schritt zu einem rationaleren Umgang mit den modernen Züchtungstechniken. Darauf sollten jedoch weitere folgen. Mittel- bis langfristig ist auch ein neuer Rechtsrahmen zur Regulierung der klassischen Gentechnik nach wissenschaftlichen Grundsätzen erforderlich. Dafür sollte sich die deutsche Politik auch in der Europäischen Union konsequent einsetzen.

## 5.2 Klima- und Umweltfolgen

Die gegenüberstehenden Positionen aus Kapitel 4.3 wie zukünftig mit Klima- und Umweltfolgen, sogenannten Externalitäten, in Deutschland umgegangen werden sollte, erlauben gegenwärtig keine Formulierung einer gemeinsamen Empfehlung aller Autor:innen an die Politik. Einigkeit besteht jedoch darüber, dass die Auswahl und Ausgestaltung der verschiedenen Instrumente in Deutschland unter Einbeziehung aller Akteur:innen erfolgen muss. Die gemeinsame Empfehlung lautet:

### **Empfehlung 2: Kontinuierliche Evaluierung möglicher Politikinstrumente zur Bewältigung der Auswirkungen von Klima- und Umweltfolgen der Nahrungsmittelproduktion**

Wir empfehlen Forschungsinvestitionen, die es der Wissenschaft ermöglichen, gemeinsam mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland geeignete Instrumente zur gerechten Einbeziehung von positiven und negativen Auswirkungen der Nahrungsmittelproduktion, insbesondere von Klima- und Umweltfolgen, kontinuierlich zu analysieren und einzusetzen.

---

94 EPRS, 2022. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2022/690194/EPRS\\_IDA\(2022\)690194\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2022/690194/EPRS_IDA(2022)690194_EN.pdf)

## 5.3 Nachhaltige Transformation des Agrar- und Ernährungssystems

Die vielfältigen Herausforderungen im globalen Agrar- und Ernährungssystem erfordern rasches und umfassendes Handeln. Im Folgenden werden drei Empfehlungen zur Gestaltung von geeigneten Politikinstrumenten formuliert.

### **Empfehlung 3: Aufbau von Governance-Strukturen im öffentlichen Sektor**

Um mit den komplexen Ursache-Wirkung-Beziehungen im Agrarsystem adäquat umzugehen, braucht es eine **dauerhaft institutionalisierte, ressort- und sektorübergreifende Struktur zur Koordination zwischen Bund, Ländern und tur- und Klimaschutz**. Eine derartige institutionelle Verankerung, begleitet von **entsprechender Ausstattung mit Ressourcen, Entscheidungskompetenzen und klaren Zuständigkeiten**, ist entscheidend, um ein Bündel an Politikinstrumenten („Policy Mix“) umzusetzen und die dringend notwendige Transformation der Agrar- und Ernährungssysteme hin zu Nachhaltigkeit und Resilienz voranzutreiben. Diese kann die Entwicklung, Planung und Umsetzung von Politikinstrumenten und Maßnahmen unterstützen und Fortschritte dokumentieren („**Monitoring**“). Zudem kann sie auf die Einhaltung von Umweltzielen achten, Verteilungsfragen bedenken und die Bedürfnisse besonders vulnerabler Akteur:innen, die nicht im Fokus der Aufmerksamkeit stehen, mithilfe **partizipativer Verfahren** berücksichtigen. Als Modell bietet sich beispielsweise die Gründung einer „Zukunftskommission Ernährung und Landwirtschaft“ an, die als Plattform für Austausch, Innovation und Kompetenz sowie die gemeinsame Entwicklung zukunftsorientierter Wertschöpfungsketten (einschließlich der dafür notwendigen rechtlichen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen<sup>95</sup>) dienen kann.

### **Empfehlung 4: Praxisnahe und akzeptanzfördernde Gestaltung öffentlicher Zahlungen und Subventionen im Agrarsystem**

Bei der Gestaltung von öffentlichen Zahlungen und Subventionen in der Landwirtschaft ist auf deren gesellschaftlichen Nutzen, die Zweckmäßigkeit der Zielindikatoren, die regionalen und betrieblichen Gegebenheiten, die Haltungen und Vorlieben von Betriebsleitungen sowie die Ergebnisorientierung zu achten. Eine **stärkere Ausrichtung der öffentlichen Zahlungen und Subventionen an gesellschaftlichen Zielen**, wie beispielsweise Klimawandelanpassung und Klimaschutz, wird intensiv diskutiert und gefordert. Damit einher geht die Notwendigkeit einer **regelmäßigen Überarbeitung von Förderrichtlinien und Kriterien der Zielerreichung** unter breiter

---

95 Agora Agar. <https://www.agora-agriculture.org/publications/agriculture-forestry-and-food-in-a-climate-neutral-eu>

Einbindung aller Beteiligten und Betroffenen, um nicht nur gesellschaftlichen Nutzen zu erzeugen, sondern auch um administrative Hürden abzubauen. Bei der Ausarbeitung und Überarbeitung der Förderrichtlinien sollte eine situationsangepasste Bewirtschaftung von Flächen, beispielsweise durch Berücksichtigung von regionalen Bodenbedingungen oder saisonalen Wetterbedingungen, ermöglicht und eine möglichst breite **Akzeptanz der jeweiligen Instrumente** angestrebt werden.

### **Empfehlung 5: Gemeinsame Entwicklung und Umsetzung von zukunftsfähigen Produktionsstrategien, Landnutzungskonzepten und Politikinstrumenten**

Es besteht eine dringende Notwendigkeit, zukunftsfähige und ressourcenschonende Produktionsstrategien, Landnutzungskonzepte und Politikinstrumente gemeinsam zu entwickeln und bisher nicht umgesetzte Maßnahmen offen zu diskutieren. Dies sollte auf allen Ebenen und unter Einbindung von Interessensgruppen und Betroffenen erfolgen, nicht zuletzt auch, um die Innovationspotenziale im Agrar- und Ernährungssystem zu fördern. Neben der **Bereitstellung von Ressourcen für die Entwicklung und Umsetzung solcher Strategien und Konzepte** (beispielsweise Agrarforstsysteme oder Agrarökologie) beinhaltet dies auch die Stärkung der Handlungskompetenz der Betroffenen, insbesondere von Landwirt:innen. Dies kann beispielsweise durch verbesserte Aus- und Weiterbildung, geeignete Kommunikationsstrategien sowie die Entwicklung von Politikinstrumenten oder Strukturen zur Förderung überbetrieblicher Kooperationen erreicht werden. Die Zusammenarbeit von Betriebsleitungen ist beispielsweise nützlich für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen (insbesondere Wasser), bei der Bekämpfung von Schadorganismen oder invasiven Arten, für das regional koordinierte Anlegen von Biodiversitätsflächen oder bei der Errichtung von Windschutzgürteln zur Reduktion von Winderosion.

## **5.4 Forschungsinvestitionen**

Unsere Nahrungsmittel sind hochkomplexe chemische Substanzgemische, die die Physiologie und Gesundheit des Menschen in vielfältiger Weise beeinflussen. Aufgrund der Komplexität der Nahrungsmittel und ihrer Wirkungen fehlt bislang ein umfassendes Verständnis der Zusammenhänge zwischen Ernährung, Gesundheit und Krankheit. Fortschritte in der chemischen Analytik, der Systembiologie sowie der Durchführung aussagekräftiger Studien und deren effiziente Auswertung haben in den letzten Jahren neue Möglichkeiten eröffnet, diese komplexen Zusammenhänge zu entschlüsseln.

Angesichts der zentralen Rolle der Ernährung in Prävention und Therapie bedarf es deutlich verstärkter struktureller und finanzieller Investitionen in die Ernährungsforschung und angrenzende Disziplinen – der zu erwartende gesellschaftliche Nutzen und ökonomische Gewinn ist offensichtlich. Obschon alle für die Nahrungsmittelproduktion relevanten Wissenschaftsdisziplinen von verstärkten Forschungsinvestitionen profitieren würden, lassen sich Bereiche identifizieren, in denen besonderer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

### **Empfehlung 6: Weiterentwicklung systembiologischer Ansätze**

Die **Erforschung der Inhaltsstoffe und Wirkungen von Nahrungsmitteln** benötigt empfindlichere Analysemethoden und verbesserte Methoden zur Strukturaufklärung. Zudem würde die Identifizierung von Wechselwirkungen zwischen bekannten und unbekannten Inhaltsstoffen unser Wissen über gesunde Ernährung deutlich erweitern. Auch die momentan verfügbaren Methoden, mit denen die Wirkungen von Inhaltsstoffen unserer Lebensmittel auf den Organismus analysiert werden können, sind unzureichend. Sie spiegeln oft nicht die physiologischen Bedingungen im menschlichen Körper wider, ignorieren gewöhnlich potenzielle Wechselwirkungen zwischen Inhaltsstoffen nach deren Aufnahme und genügen somit nicht hohen wissenschaftlichen Ansprüchen. Neue, innovative Ansätze aus der Systembiologie sind hier vonnöten, deren Entwicklung durch geeignete Forschungsinvestitionen stimuliert werden sollte.

### **Empfehlung 7: Investitionen in eine effiziente und ressourcenschonende Agrochemie**

Wir empfehlen die Entwicklung effizienterer Formulierungs- und Ausbringtoniken für flüssige organische Düngemittel zur Emissionsminderung. Zudem sehen wir es als essenziell an, verstärkte Anstrengungen zu unternehmen, Agrochemikalien ressourcenschonender herzustellen. Eine konkrete Möglichkeit ist die gezielte Ausarbeitung verbesserter chemischer Synthesemethoden und Trennverfahren für die **Bereitstellung von Präzisionswirkstoffen** für den Pflanzenschutz. Fortschritte auf diesem Gebiet würden es ermöglichen, ausschließlich die benötigten aktiven Wirkstoffen in der Landwirtschaft einzusetzen und so die auszubringenden Wirkstoffmengen für zahlreiche Pflanzenschutzmittel zu halbieren.

### **Empfehlung 8: Stärkung von umwelt- und agrarsoziologischen Ansätzen**

Gesellschaft und Wirtschaft werden von den erheblichen globalen und regionalen Umweltveränderungen immer stärker beeinflusst. Die Umsetzung von Maßnahmen zu Umwelt- und Klimaschutz sowie zur Anpassung an den Klimawandel ist im besonders stark betroffenen Agrar- und Ernährungssystem überaus dringend. Während zielführende Maßnahmen und deren Effizienz größtenteils bekannt

sind, werden diese Maßnahmen von den Akteur:innen vor Ort, also von den Landwirt:innen, in nicht ausreichendem Maße umgesetzt. Die Wissenschaft spricht hier vom so genannten „**adaptation gap**“, also einer „Lücke“ zwischen bekannten wirksamen Maßnahmen und dem, was tatsächlich umgesetzt wird. Angesichts der Notwendigkeit und der Dringlichkeit zur Veränderung des Agrar- und Ernährungssystems (siehe dazu auch die Initiative der Leopoldina zur „Zukunftswerkstatt Landwende“<sup>96</sup>) sind deutlich verstärkte Anstrengungen notwendig. Neben intensiveren Forschungsaktivitäten zur Entwicklung effektiver Maßnahmen zum Umwelt- und Klimaschutz sowie zur Anpassung an den Klimawandel sollte auch das **Verhalten von Landwirt:innen** verstärkt erforscht werden. Zur notwendigen Stärkung von umwelt- und agrarsoziologischen Ansätzen gehören insbesondere Untersuchungen zu Faktoren, die das individuelle und das kollektive Verhalten von Landwirt:innen beeinflussen sowie zu Rahmenbedingungen, die umwelt- und klimafreundliches Verhalten fördern oder behindern. Daraus können mögliche Strategien und Maßnahmen abgeleitet werden, die zeitnah individuelle, im gesellschaftlichen Interesse liegende Verhaltensänderungen herbeiführen.

### **Empfehlung 9: Stärkung von transformationsorientierter Forschung im Agrarbereich**

Die Komplexität des Agrar- und Ernährungssystems sowie die weitreichende Vernetzung des Sektors erfordern integrative Forschungsansätze, die in Forschungsprogrammen verstärkt zu berücksichtigen sind. Unter diesen Forschungsansätzen wird die **intensive Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Disziplinen aus den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften sowie den Künsten** verstanden, die auch Interessensvertretungen aus der Praxis umfänglich in die Forschung einbindet.

### **Empfehlung 10: Gründung eines Deutschen Zentrums für Ernährung**

Wir sprechen uns für die **Einrichtung eines von Bund und Ländern finanzierten ‚Deutschen Zentrums für Ernährung‘ zur Bündelung und Stärkung bestehender Strukturen im Bereich der Ernährungswissenschaften und angrenzender Forschungsbereiche** aus. Dieses interdisziplinäre Zentrum soll unter anderem die Einrichtung von Multicenter-Studien zur langfristigen Erhebung von Ernährungs- und Gesundheitsdaten und den Datenaustausch zwischen beteiligten Forschungsinstitutionen, Krankenhäusern und Pflegeheimen gewährleisten. Hier bietet sich eine Initiative in der **Forschungs- und Innovationsregion Berlin-Brandenburg an, die über eine einzigartige interdisziplinäre Zusammensetzung**

---

96 Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina. 2024. [https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Themen/Zukunftswerkstatt\\_Landwende\\_Wie\\_wollen\\_wir\\_leben\\_GraphicNovel\\_DIGITAL.pdf](https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Themen/Zukunftswerkstatt_Landwende_Wie_wollen_wir_leben_GraphicNovel_DIGITAL.pdf)

**relevanter Forschungsinstitutionen verfügt.** Ein solche unabhängige Dauerstruktur, vergleichbar mit den Deutschen Zentren für Gesundheitsforschung<sup>97</sup> oder in einer anderen Form (wie beispielsweise einer Stiftung), sichert eine konzertierte und effektive Überführung der Forschungsergebnisse aus dem Agrar- und Ernährungsbereich in die medizinische Behandlung von ernährungsmitbedingten Erkrankungen, und vice versa. Es führt die bisher fehlende Verzahnung diverser Forschungsdisziplinen sowie eine Fokussierung auf die komplexen Zusammenhänge zwischen Nahrungsmittelproduktion, Ernährung und menschlicher Gesundheit herbei. Dieses Zentrum kann auf dem Gebiet der Krankheitsprävention durch Ernährung eine nationale und internationale Vorreiterrolle einnehmen.

---

97 <https://deutschezentren.de/>

# Glossar

## **Ernährungsumgebung**

Wir folgen der Definition des WBAE<sup>98</sup>, der unter einer Ernährungsumgebung alle Faktoren versteht, die unser Ernährungsverhalten beeinflussen. „Die Ernährungsumgebung erstreckt sich über den gesamten Verhaltensprozess. Dieser kann in vier Phasen (Exposition–Zugang–Auswahl–Konsum) eingeteilt werden.“ Ernährungsumgebungen gelten „als fair, weil und insofern sie (1) auf unsere menschlichen Wahrnehmungs- und Entscheidungsmöglichkeiten sowie Verhaltensweisen abgestimmt sind und (2) gesundheitsfördernder, sozial-, umwelt- und tierwohlverträglicher sind und damit zur Erhaltung der Lebensgrundlagen heutiger und zukünftig lebender Menschen beitragen.“

## **Ernährungswende**

Mit Ernährungswende bezeichnen wir die staatliche und gesamtgesellschaftliche gesundheitsorientierte Transformation hin zu einer Ernährungsform, die die negativen Auswirkungen der Nahrungsmittelversorgung auf dem Planeten minimiert und unsere Gesundheit und die unser Wohlbefinden fördert.

## **Gunststandort**

Ein Gunststandort in der Landwirtschaft ist ein Standort, der sich aufgrund seiner natürlichen und wirtschaftlichen Bedingungen besonders gut für landwirtschaftliche Nutzung eignet.

## **Interventionsstudien**

Im Bereich der Humanstudien werden bei Interventionsstudien gezielt eine oder mehrere Bedingungen im Studienverlauf verändert, beispielsweise durch ein Medikament, eine Therapie oder eine Verhaltensintervention. Das Ziel ist, den Effekt dieser Intervention auf die Proband:innen systematisch zu messen und zu vergleichen.

---

98 WBAE. 2020. <https://www.bmel.de/DE/ministerium/organisation/beiraete/agr-veroeffentlichungen.html>

### **Präzisionslandwirtschaft**

Unter dem Begriff Präzisionslandwirtschaft verstehen wir ein modernes Konzept der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung, welches durch den Einsatz digitaler Technologien zur Überwachung und Optimierung landwirtschaftlicher Produktionsprozesse gekennzeichnet ist.<sup>99</sup>

### **Strukturwandel**

Der Strukturwandel in der Landwirtschaft ist unter anderem durch die abnehmende Zahl an landwirtschaftlichen Betrieben innerhalb einer räumlichen Einheit gekennzeichnet. Damit ist verbunden, dass die durchschnittlich pro Betrieb bewirtschaftete Fläche steigt. In der europäischen und der deutschen Landwirtschaft wird der Strukturwandel seit Jahrzehnten beobachtet und beforscht.

### **Transgene Pflanzen**

In der Gentechnik werden bei der zielgerichteten Veränderung des Genoms (Transformation) von Pflanzen bekannte Gensequenzen mithilfe verschiedenster Methoden eingebracht. Handelt es sich um ein Gen aus einer anderen Art, sprechen wir von transgenen Pflanzen. Stammt das Gen aus der gleichen Art, ist von cisgenen Pflanzen die Rede. Grundlage der klassischen Pflanzenzüchtung hingegen ist die Auslese (Selektion) von Pflanzen mit erwünschten Merkmalen und deren gezielte Kreuzung miteinander.

### **Wirtschaftsdünger**

Wirtschaftsdünger sind organische Düngemittel, die hauptsächlich aus tierischen Ausscheidungen wie beispielsweise Gülle, Mist und Jauche oder aus pflanzlichen Stoffen wie beispielsweise Stroh, Pflanzenresten und Kompost bestehen.

### **Zwischenfrüchte**

Zwischenfrüchte sind Pflanzen, die zwischen zwei Hauptkulturen angebaut werden. Sie dienen vornehmlich als Futter, Gründüngung oder zum Schutz und zur Verbesserung des Bodens. Sie nutzen vegetationsfreie Zeiten, speichern Nährstoffe wie Stickstoff, was die **Fruchtfolge**, also die geplante zeitliche Abfolge verschiedener Nutzpflanzen auf derselben Agrarfläche, verbessert.

---

99 [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS\\_STU\(2016\)581892\\_DE.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/581892/EPRS_STU(2016)581892_DE.pdf)

# Literatur

- Adhikari K, Hartemink AE. 2016. Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma* 262: 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Aeikens HO. 2023. Unsere Landwirtschaft besser verstehen: Was wir alle wissen sollten. Mitteldeutscher Verlag, Halle.
- Afendi FM et al. 2012. KNApSACk family databases: integrated metabolite-plant species databases for multifaceted plant research. *Plant Cell Physiol.* 53(2): e1. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcr165>
- Afshin A et al. 2017. Effectiveness of Dietary Policies to Reduce Noncommunicable Diseases. In: Prabhakaran D et al. (Hrsg.) *Cardiovascular, Respiratory, and Related Disorders*, 3rd ed. Washington (DC): The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. 165–186. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK525147/>
- Al-Babili S, Beyer P. 2005. Golden Rice – five years on the road – five years to go? *Trends Plant Sci* 10(12): 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.10.006>
- Alston JM et al. 2010. Global Patterns of Crop Yields and other Partial Productivity Measures and Prices. In: Alston JA, Babcock BA, Pardey PG (Hrsg.) *The Shifting Patterns of Agricultural Production and Productivity Worldwide*. Iowa State University: 39–61.
- Ammann K. 2005. Effects of biotechnology on biodiversity: herbicide-tolerant and insect-resistant GM crops. *Trends Biotechnol* 23(8): 388–394. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.06.008>
- Ampim PAY et al. 2022. Indoor Vegetable Production: An Alternative Approach to Increasing Cultivation. *Plants* 11: 2843. <https://doi.org/10.3390/plants11212843>
- Appella DH. 2009. Non-natural nucleic acids for synthetic biology. *Curr Op Chem Biol* 13(5–6): 687–696. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2009.09.030>
- Arnold N. 2023. Kein erhöhtes Risiko: Genome Editing in der Pflanzenzüchtung. Konrad-Adenauer-Stiftung. <https://www.kas.de/de/einzeltitel/-/content/kein-erhoehtes-risiko-genome-editing-in-der-pflanzenzuechtung>

- Baganz GFM et al. 2022. The aquaponic principle — It is all about coupling. *Reviews in Aquaculture* 14(1): 252–264. <https://doi.org/10.1111/raq.12596>
- Bailey R, Wellesley L. 2017. Chokepoints and Vulnerabilities in Global Food Trade. Chatham House Report. Toronto, ON, CA. <https://www.chathamhouse.org/2017/06/chokepoints-and-vulnerabilities-global-food-trade>
- Bailey-Serres J et al. 2019. Genetic strategies for improving crop yields. *Nature* 575: 109–118. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1679-0>
- Balkovič J et al. 2018. Impacts and Uncertainties of +2°C of Climate Change and Soil Degradation on European Crop Calorie Supply. *Earth's Future* 6(3): 373–395. <https://doi.org/10.1002/2017EF000629>
- Barreiro-Hurle J et al. 2021a. Modelling environmental and climatic ambition in the agricultural sector with the CAPRI model – Exploring the potential effects of selected farm to fork and biodiversity strategies targets in the framework of the 2030 climate targets and the post 2020 Common Agricultural Policy. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/98160>
- Barreiro-Hurle J et al. 2021b. Modelling Transitions to Sustainable Food Systems: Are We Missing the Point? *EuroChoices* 20(3): 12–20. <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12339>
- Bebber D et al. 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Clim Change* 3: 985–988. <https://doi.org/10.1038/nclimate1990>
- Beckman J et al. 2020. Economic and Food Policy Impacts of Agricultural Input Reduction under the European Union Green Deal's Farm to Fork and Biodiversity Strategies. USDA EB30. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.327231>
- Benton TG et al. 2021. Food system impacts on biodiversity loss – Three levers for food system transformation in support of nature. Chatham House Research Paper. Toronto, ON, CA. [https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/2021-02/2021-02-03-food-system-biodiversity-loss-benton-et-al\\_0.pdf](https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/2021-02/2021-02-03-food-system-biodiversity-loss-benton-et-al_0.pdf)
- Beyer RM et al. 2022. Relocating croplands could drastically reduce the environmental impacts of global food production. *Commun Earth Environ* 3: 49. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00360-6>
- Bock R. 2015. Engineering plastid genomes: Methods, tools, and applications in basic research and biotechnology. *Annu Rev Plant Biol* 66: 211–241. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-040212>
- Bock R. 2015. Keine Vernunft. Nirgends. *Laborjournal* 7–8: 6–9. [https://www.laborjournal.de/rubric/essays/essays2015/e15\\_01.php](https://www.laborjournal.de/rubric/essays/essays2015/e15_01.php)
- Bock R, Dederer HG. 2022. Perspectives on a science-based regulation of genome-edited plants. *Leopoldina news* 1: 10. [https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Leopoldina\\_aktuell/Deutsch/Leopoldina\\_Newsletter\\_1\\_2022\\_DEU.pdf](https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Publikationen/Leopoldina_aktuell/Deutsch/Leopoldina_Newsletter_1_2022_DEU.pdf)

- Bock R et al. 2023. Keeping Europe Up to Date – a Fit-for-Purpose Regulatory Environment for New Genomic Techniques. Statement of the German Research Foundation and the German National Academy of Sciences Leopoldina regarding the proposal of the European Commission for an EU regulation on plants obtained by new genomic techniques. <https://www.dfg.de/resource/blob/289576/300ff7085ac66b7ff03177849008a13f/statement-genomic-techniques-data.pdf>
- Bock CH et al. 2020. From visual estimates to fully automated sensor-based measurements of plant disease severity: status and challenges for improving accuracy. *Phytopathology Research* 2: 9. <https://doi.org/10.1186/s42483-020-00049-8>
- Bodirsky BL et al. 2014. Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution. *Nat Commun* 5: 3858. <https://doi.org/10.1038/ncomms4858>
- Bodirsky BL et al. 2020. The ongoing nutrition transition thwarts long-term targets for food security, public health and environmental protection. *Sci Rep* 10: 19778. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75213-3>
- Bodirsky BL et al. 2023. A Food System Transformation can enhance Global Health, Environmental Conditions and Social Inclusion. Preprint (Version 1). Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2928708/v1>
- Bodirsky BL et al. 2024. Die Bedeutung einer gezielten CO<sub>2</sub>-Entnahme für die Zukunft des Europäischen Emissionshandelssystems (ETS). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14411049>
- Boehm CR, Bock R. 2019. Recent advances and current challenges in synthetic biology of the plastid genetic system and metabolism. *Plant Physiol* 179(3): 794–802. <https://doi.org/10.1104/pp.18.00767>
- Borrelli P et al. 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Proc. Natl. Acad. Sci.* 117(36): 21994–22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
- Bouis HE. 2003. Micronutrient fortification of plants through plant breeding: can it improve nutrition in man at low cost? *Proceedings of the Nutrition Society* 62(2): 403–411. <https://doi.org/10.1079/PNS2003262>
- Bouvard V et al. on behalf of the International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. 2015. Carcinogenicity of consumption of red and processed meat. *The Lancet Oncology* 16: 1599–1600. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(15\)00444-1](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(15)00444-1)
- Bunge AC et al. 2022. A systematic scoping review of the sustainability of vertical farming, plant-based alternatives, food delivery services and blockchain in food systems. *Nat Food* 3: 933–941. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00622-8>
- Butler MS. 2004. The role of natural product chemistry in drug discovery. *J Nat Prod* 67 (12): 2141–2153. <https://doi.org/10.1021/np040106y>

- Butterbach-Bahl K et al. 2011. Nitrogen as Threat to European Greenhouse Balance. In: Sutton MA et al. (Hrsg.) The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press. 434–462. <http://hdl.handle.net/1854/LU-2042188>
- Cambray G et al. 2011. Toward rational design of bacterial genomes. *Curr Op Microbiol* 14 (5): 624–630. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2011.08.001>
- Carozzi M et al. 2021. Effects of climate change in the European croplands and grasslands: productivity, GHG balance and soil carbon storage (preprint). *Biogeochemistry: Modelling, Terrestrial*. <https://doi.org/10.5194/bg-2021-241>
- Casini A et al. 2015. Bricks and blueprints: methods and standards for DNA assembly. *Nature Rev Mol Cell Biol* 16: 568–576. <https://doi.org/10.1038/nrm4014>
- Chen Z et al. 2022. Recent advances in crop transformation technologies. *Nat Plants* 8: 1343–1351. <https://doi.org/10.1038/s41477-022-01295-8>
- Chen LG et al. 2024. A designer synthetic chromosome fragment functions in moss. *Nat Plants* 10: 228–239. <https://doi.org/10.1038/s41477-023-01595-7>
- Cheng C et al. 2023. Recent Advancements in Agriculture Robots: Benefits and Challenges. *Machines* 11(1): 48. <https://doi.org/10.3390/machines11010048>
- Chhokar RS et al. 2012. Weed management strategies in wheat - A review. *J Wheat Res* 4: 1–21. [https://www.researchgate.net/publication/260731272\\_Weed\\_Management\\_strategies\\_in\\_wheat\\_-\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/260731272_Weed_Management_strategies_in_wheat_-_A_review)
- Chin JW. 2017. Expanding and reprogramming the genetic code. *Nature* 550: 53–60. <https://doi.org/10.1038/nature24031>
- Chin R et al. 2023. Plant disease detection using drones in precision agriculture. *Prec Agricult* 24: 1663–1682. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10014-y>
- Choi D-M et al. 2025. Sustainable media development for cultured meat: Technology and material reviews. *Food Research International* 217: 116670. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116670>
- Collins A et al. 1995. *Chirality in Industry*. Wiley, Chichester.
- Constantino SM, Weber EU. 2021. Decision-making under the deep uncertainty of climate change: The psychological and political agency of narratives. *Curr Opin Psychol*. 42: 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2021.11.001>
- de la Torre D, Chin JW. 2021. Reprogramming the genetic code. *Nat Rev Genet* 22: 169–184. <https://doi.org/10.1038/s41576-020-00307-7>
- Dale PJ et al. 2002. Potential for the environmental impact of transgenic crops. *Nat Biotechnol* 20: 567–574. <https://doi.org/10.1038/nbt0602-567>
- Dale J et al. 2017. Transgenic Cavendish bananas with resistance to Fusarium wilt tropical race 4. *Nat Commun* 8(1): 1496. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01670-6>

- Daliakopoulos IN et al. 2016. The threat of soil salinity: A European scale review. *Sci Total Environ* 573: 727–739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>
- Deer C et al. 2021. Nitrification and Maintenance in Media Bed Aquaponics. Oklahoma Cooperative Extension Service. SRAC Publication No. HLA-6729. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/nitrification-and-maintenance-in-media-bed-aquaponics.html>
- Delaye L, Moya A. 2010. Evolution of reduced prokaryotic genomes and the minimal cell concept: Variations on a theme. *BioEssays* 32(4): 281–287. <https://doi.org/10.1002/bies.200900161>
- De Luca V et al. 2012. Mining the biodiversity of plants: a revolution in the making. *Science* 336(6089): 1658–1661. <https://doi.org/10.1126/science.1217410>
- de Souza LP et al. 2021. Ultra-high-performance liquid chromatography high-resolution mass spectrometry variants for metabolomics research. *Nature Methods* 18: 733–746. <https://doi.org/10.1038/s41592-021-01116-4>
- Des Soye BJ et al. 2015. Repurposing the translation apparatus for synthetic biology. *Curr Opin Chem Biol* 28: 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2015.06.008>
- De Steur H et al. 2017. GM biofortified crops: potential effects on targeting the micronutrient intake gap in human populations. *Current Opinion in Biotechnology* 44: 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.02.003>
- Deutsch CA et al. 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science* 361(6405): 916–919. <https://doi.org/10.1126/science.aat3466>
- Dixon RA, Dickinson AJ. 2024. A century of studying plant secondary metabolism—From “what?” to “where, how, and why?” *Plant Physiology* 195(1): 1–19. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad596>
- Dührkop K et al. 2021. Systematic classification of unknown metabolites using high-resolution fragmentation mass spectra. *Nature Biotechnology* 39: 462–471. <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0740-8>
- Durel L. 2024. Border Carbon Adjustment Compliance and the WTO: The Interactional Evolution of Law. *Journal of International Economic Law* 27(1): 18–40. <https://doi.org/10.1093/jiel/jgae007>
- Eekhout JPV, de Vente J. 2022. Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation. *Earth-Science Reviews* 226: 103921. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103921>
- Ekele JU et al. 2025. Current impacts of elevated CO<sub>2</sub> on crop nutritional quality: a review using wheat as a case study. *Stress Biology* 5: 34. <https://doi.org/10.1007/s44154-025-00217-w>
- Eliel EL et al. 2001. *Basic Organic Stereochemistry*. Wiley: Chichester. 688 pp.
- Ellstrand NC. 2001. When transgenes wander, should we worry? *Plant Physiol* 125 (4): 1543–1545. <https://doi.org/10.1104/pp.125.4.1543>

- Engle CR, Beem M. 2017. Economics of Aquaponics. Oklahoma Cooperative Extension Service. SRAC Publication No. SRAC-5006. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/economics-of-aquaponics.html>
- Emwas AH et al. 2019. NMR Spectroscopy for Metabolomics Research. *Metabolites* 9 (7): 123. <https://doi.org/10.3390/metabo9070123>
- Erb M, Kliebenstein DJ. 2020. Plant Secondary Metabolites as Defenses, Regulators, and Primary Metabolites. *Plant Physiology* 184(1): 39–52. <https://doi.org/10.1104/pp.20.00433>
- Erb TJ, Zarzycki J. 2016. Biochemical and synthetic biology approaches to improve photosynthetic CO<sub>2</sub>-fixation. *Curr Op Chem Biol* 34: 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2016.06.026>
- Erisman JW et al. 2011. Reactive nitrogen in the environment and its effect on climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability, Carbon and nitrogen cycles* 3: 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2011.08.012>
- Facchini PJ et al. 2012. Synthetic biosystems for the production of high-value plant metabolites. *Trends Biotechnol* 30(3): 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2011.10.001>
- Fang C et al. 2019. Exploring the diversity of plant metabolism. *Trends in Plant Sciences* 24(1): 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.09.006>
- Feindt PH. 2018. EU Agricultural Policy. In: Edward Elgar Publishing. *Handbook of European Policies*: 115–133. <https://doi.org/10.4337/9781784719364.00014>
- Fesenfeld L et al. 2022. Policy Brief: Für Ernährungssicherheit und eine lebenswerte Zukunft – Pflanzenbasierte Ernährungsweisen fördern, Produktion und Verbrauch tierischer Lebensmittel reduzieren. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7038960>
- Fesenko E, Edwards R. 2014. Plant synthetic biology: a new platform for industrial biotechnology. *J Exp Bot* 65(8): 1927–1937. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru070>
- Fuentes I et al. 2014. Horizontal genome transfer as an asexual path to the formation of new species. *Nature* 511: 232–235. <https://doi.org/10.1038/nature13291>
- Fuentes P et al. 2016. A new synthetic biology approach allows transfer of an entire metabolic pathway from a medicinal plant to a biomass crop. *eLife* 5: e13664. <https://doi.org/10.7554/eLife.13664>
- Fuglie K. 2012. Total factor productivity in the global agricultural economy: Evidence from FAO data. In: Alston J, Babcock B, Pardey P (Hrsg.). *The shifting patterns of agricultural production and productivity worldwide*. 63–95. Midwest Agribus Trade & Res Inform Center, Ames, IA, USA.
- Gänsch J et al. 2021. Continuous Enantioselective Crystallization of Chiral Compounds in Coupled Fluidized Beds. *Chemical Engineering Journal* 422: 129627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129627>

- Gaj T et al. 2013. ZFN, TALEN, and CRISPR/Cas-based methods for genome engineering. *Trends Biotechnol* 31(7): 397–405. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.04.004>
- Galili G, Amir R. 2013. Fortifying plants with the essential amino acids lysine and methionine to improve nutritional quality. *Plant Biotechnology Journal* 11(2): 211–222. <https://doi.org/10.1111/pbi.12025>
- Gao C. 2021. Genome engineering for crop improvement and future agriculture. *Cell* 184(6): 1621–1635. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.01.005>
- Gerhards R et al. 2022. Advances in site-specific weed management in agriculture. *Weed Res* 62(2): 123–133. <https://doi.org/10.1111/wre.12526>
- Ghatrehsamani S et al. 2023. Artificial Intelligence Tools and Techniques to Combat Herbicide Resistant Weeds. *Sustainability* 15(3): 1843. <https://doi.org/10.3390/su15031843>
- Giannadaki D et al. 2018. Estimating health and economic benefits of reductions in air pollution from agriculture. *Science of The Total Environment* 622–623: 1304–1316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.064>
- Giannakis E et al. 2019. Costs and benefits of agricultural ammonia emission abatement options for compliance with European air quality regulations. *Environmental Sciences Europe* 31: 93. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0275-0>
- Godde CM et al. 2021. Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence. *Glob Food Sec* 28: 100488. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100488>
- Gonzali S, Perata P. 2020. Anthocyanins from Purple Tomatoes as Novel Antioxidants to Promote Human Health. *Antioxidants* 9(10): 1017. <https://doi.org/10.3390/antiox9101017>
- Graham RD et al. 1997. A strategy for breeding staple-food crops with high micronutrient density *Soil Science And Plant Nutrition* 43: 1153–1157. <https://doi.org/10.1080/00380768.1997.11863734>
- Großbölting T, Lenhard-Schramm N. 2017. Contergan. Hintergründe und Folgen eines Arzneimittel-Skandals. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.
- Grune T, Bickelmann C, Bodirsky BL, Diefenbach A, Eggert A, Grüters-Kieslich A, Hertwig R, Korte M, Kuhlmeier A, Mons U, Schirmeier A, Seifert G, Siegmund B, von Philipsborn P, Willmitzer L, Wolff J. 2025. Die Zukunft unserer Ernährung: Ernährung und Gesundheit. Denkanstöße aus der Akademie 18. BBAW, Berlin.
- Gu B et al. 2023. Cost-Effective Mitigation of Nitrogen Pollution from Global Croplands. *Nature* 613(7942): 77–84. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05481-8>.
- Gu H et al. 2025. Scaling Cultured Meat: Challenges and Solutions for Affordable Mass Production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 24(4): e70221. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70221>
- Gutiérrez RA. 2012. Systems biology for enhanced plant nitrogen nutrition. *Science* 336(6089): 1673–1675. <https://doi.org/10.1126/science.1217620>

- Häußermann U et al. 2019. Stickstoff-Flächenbilanzen Für Deutschland Mit Regionalgliederung Bundesländer Und Kreise – Jahre 1995 bis 2017. Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement, Justus-Liebig-Universität Gießen. [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz\\_3714\\_43\\_202\\_luftqualitaet\\_stickstoffbilanz\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3714_43_202_luftqualitaet_stickstoffbilanz_bf.pdf)
- Hawkes C et al. 2013. A food policy package for healthy diets and the prevention of obesity and diet-related non-communicable diseases: The NOURISHING framework. *Obes Rev* 14(S2): 159–168. <https://doi.org/10.1111/obr.12098>
- Hermann A et al. 2020. Instrumente und Maßnahmen zur Reduktion der Stickstoffüberschüsse: 179. [https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10179-Instrumente\\_und\\_Ma%C3%9Fnahmen\\_zur\\_Reduktion\\_der\\_Stickstoff%C3%BCbersch%C3%BCsse.pdf](https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10179-Instrumente_und_Ma%C3%9Fnahmen_zur_Reduktion_der_Stickstoff%C3%BCbersch%C3%BCsse.pdf)
- Herrero M et al. 2013. Biomass Use, Production, Feed Efficiencies, and Greenhouse Gas Emissions from Global Livestock Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110(52): 20888–20893. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308149110>
- Hertel TW. 2018. Economic Perspectives on Change and Leakage. *Economic Letters* 13:1–9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad2a4>
- Hiç C et al. 2016. Food Surplus and Its Climate Burdens. *Environmental Science & Technology* 50(8): 4269–4277. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05088>
- Hirvonen K et al. 2020. Affordability of the EAT-Lancet Reference Diet: A Global Analysis. *The Lancet. Global Health* 8(1): e59–66. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(19\)30447-4](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(19)30447-4)
- Houck JP. 1987. Grain Markets and the United States: Trade Wars, Export Subsidies, and Price Rivalry. International Agricultural Trade Research Consortium, Working Papers 51243. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.51243>
- Huang J et al. 2005. Insect-resistant GM rice in farmers' fields: assessing productivity and health effects in China. *Science* 308(5722): 688–690. <https://doi.org/10.1126/science.1108972>
- Iglesias A, Garrote L. 2015. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agricultural Water Management* 155: 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.014>
- Ishikawa S et al. 2010. Heme induces DNA damage and hyperproliferation of colonic epithelial cells via hydrogen peroxide produced by heme oxygenase: a possible mechanism of heme-induced colon cancer. *Mol Nutr Food Res* 54(8): 1182–1191. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200900348>
- Jägermeyr J et al. 2021. Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nat Food* 2(11): 873–885. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>
- Jaiswal DK et al. 2022. Bio-fortification of minerals in crops: current scenario and future prospects for sustainable agriculture and human health. *Plant Growth Regulation* 98: 5–22. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00847-4>

- Jakszyn P et al. 2012. Dietary intake of heme iron and risk of gastric cancer in the European prospective investigation into cancer and nutrition study. *Int J Cancer* 130(11): 2654–2663. <https://doi.org/10.1002/ijc.26263>
- John D et al. 2023. A systematic review on the factors governing precision agriculture adoption among small-scale farmers. *Outlook on agriculture* 52(4): 469–485. <https://doi.org/10.1177/00307270231205640>
- Jónsson JÖG, Davíðsdóttir B. 2016. Classification and valuation of soil ecosystem services. *Agric. Syst.* 145: 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.010>
- Jost E et al. 2021. Dynamic soil functions assessment employing land use and climate scenarios at regional scale. *J Environ Manag* 287: 112318. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112318>
- Jost E et al. 2025. Integrated modelling of fertilizer and climate change scenario impacts on agricultural production and nitrogen losses in Austria. *Ecological Economics* 227: 108398. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108398>
- Kim JS. 2018. Precision genome engineering through adenine and cytosine base editing. *Nat Plants* 4: 148–151. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0115-z>
- Kim J et al. 2019. Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control, and Applications. *IEEE Access* 7: 105100–105115. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932119>
- Kinghorn AD et al. 2011. The relevance of higher plants in lead compound discovery programs. *J. Nat. Prod.* 74(6): 1539–1555. <https://doi.org/10.1021/np200391c>
- Klümper W, Qaim M. 2014. A Meta-Analysis of the Impacts of Genetically Modified Crops. *PLoS ONE* 9(11): e111629. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111629>
- Knox J et al. 2016. Meta-analysis of climate impacts and uncertainty on crop yields in Europe. *Environ. Res. Lett.* 11: 113004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/113004>
- Komor AC et al. 2017. CRISPR-based technologies for the manipulation of eukaryotic genomes. *Cell* 168(1): 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.10.044>
- Kopittke PM et al. 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environ Int* 132: 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Kort AK et al. 2016. Physical-Chemical Properties of the Chiral Fungicide Fenamidone and Strategies for Enantioselective Crystallization. *Chirality* 28: 1409–1419. <https://doi.org/10.1002/chir.22608>
- Kort AK et al. 2017. Melting Behavior and Solubility Equilibria of (R)- and (S)-Mefenpyr-diethyl in Ethanol/Water Mixtures, Industrial and Engineering Chemistry Research. *Journal of Chemical Engineering Data* 62: 4411–4418. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00819>
- Kovach J et al. 1992. A method to measure the environmental impact of pesticides. *New York Food and Life Sciences Bulletin* Number 139. <http://hdl.handle.net/1813/55750>

- Kropf B, Mitter H. 2022. Factors Influencing Farmers' Climate Change Mitigation and Adaptation Behavior: A Systematic Literature Review. In: Larcher M, Schmid E. (Hrsg.) *Alpine Landesgesellschaften zwischen Urbanisierung und Globalisierung*. Springer VS, Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-36562-2\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-658-36562-2_14)
- Kropf B et al. 2025. Drought adaptation in Austrian agriculture: empirically based farmer types. *Agric Hum Values* 42: 1063–1081. <https://doi.org/10.1007/s10460-024-10661-5>
- Kumar S et al. 2022. Breeding and adoption of biofortified crops and their nutritional impact on human health. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1520(1): 5–19. <https://doi.org/10.1111/nyas.14936>
- La Frano MR et al. 2014. Bioavailability of iron, zinc, and provitamin A carotenoids in biofortified staple crops. *Nutrition Reviews* 72(5): 289–307. <https://doi.org/10.1111/nure.12108>
- Lassaletta L et al. 2014. 50 Year Trends in Nitrogen Use Efficiency of World Cropping Systems: The Relationship between Yield and Nitrogen Input to Cropland. *Environmental Research Letters* 9(10): 105011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105011>
- Leakey ADB et al. 2009. Elevated CO<sub>2</sub> effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *J. Exp. Bot.* 60(10): 2859–2876. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp096>
- Leip A et al. 2017. Mitigation measures in the agriculture, forestry, and other land use (AFOLU) sector: quantifying mitigation effects at the farm level and in national greenhouse gas inventories. European Commission. Joint Research Centre, LU. <https://doi.org/10.2760/51052>
- Lelieveld J et al. 2015. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525: 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- Lelis, CA et al. 2025. Can lab-grown milk be a novel trend in the dairy industry? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 1–10. <https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2471013>
- Lemken D, Peter von Philipsborn. 2023. Die „Dublin Declaration of Scientists on the Societal Role of Livestock“ – eine Einordnung. *ErnährungsUmschau* 6: M376–M379. <https://www.ernaehrungs-umschau.de/print-artikel/14-06-2023-die-dublin-declaration-of-scientists-on-the-societal-role-of-livestock-eine-einordnung/>
- Levy DT et al. 2011. Simulation Models of Obesity: A Review of the Literature and Implications for Research and Policy. *Obesity Reviews* 12(5): 378–394. <https://doi.org/10.1111/j.1467-789X.2010.00804.x>
- Li DP, Gaquerel E. 2021. Next-Generation Mass Spectrometry Metabolomics Revives the Functional Analysis of Plant Metabolic Diversity. *Annual Review of Plant Biology* 72: 867–891. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-071720-114836>
- Li LL et al. 2021. Plant Disease Detection and Classification by Deep Learning-A Review *IEEE Access* 9: 56683–56698. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069646>

- Lin GQ et al. 2011. *Chiral Drugs: Chemistry and Biological Action*. 472 pp. Wiley, Hoboken.
- Liu W, Stewart Jr. CN. 2015. Plant synthetic biology. *Trends Plant Sci* 20(5): 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.02.004>
- Liu Z et al. 2004. A primitive Y chromosome in papaya marks incipient sex chromosome evolution. *Nature* 427: 348–352. <https://doi.org/10.1038/nature02228>
- Loi A et al. 2024. Research for AGRI Committee – The dependency of the EU's food system on inputs and their sources, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2024/747272/IPOL\\_STU\(2024\)747272\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2024/747272/IPOL_STU(2024)747272_EN.pdf)
- Long et al. 2016. Cyanobacterial CO<sub>2</sub>-concentrating mechanism components: function and prospects for plant metabolic engineering. *Curr Op Plant Biol* 31: 1–8. <https://ripe.illinois.edu/sites/ripe.illinois.edu/files/2018-06/Cyanobacterial.pdf>
- Lorenz H, Seidel-Morgenstern A. 2014. Separation of Enantiomers, *Angew Chemie Int Ed* 53(5): 1218–1250. <https://doi.org/10.1002/anie.201302823>
- Lowder SK et al. 2016. The Number, Size, and Distribution of Farms, Smallholder Farms, and Family Farms Worldwide. *World Dev* 87: 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.world-dev.2015.10.041>
- Ma S et al. 2012. DNA synthesis, assembly and applications in synthetic biology. *Curr Op Chem Biol* 16(3–4): 260–267. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2012.05.001>
- Ma N et al. 2020. The birth of artemisinin. *Pharmacology and Therapeutics* 216: 107658. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2020.107658>
- Mandell DJ et al. 2015. Biocontainment of genetically modified organisms by synthetic protein design. *Nature* 518: 55–60. <https://doi.org/10.1038/nature14121>
- Matissek R, Fischer M. 2021. *Lebensmittelanalytik*. Springer Spektrum, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55722-8>
- McCarl BA. 2015. Elaborations on Climate Adaptation in U.S. Agriculture. *Choices* 30(2): 1–5. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.206385>
- Mega R et al. 2019. Tuning water-use efficiency and drought tolerance in wheat using abscisic acid receptors. *Nat Plants* 5: 153–159. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0361-8>
- Meierhenrich U. 2008. *Amino Acids and the Asymmetry of Life*. Springer, Berlin.
- Mikami K, Lautens. 2007. *New Frontiers in Asymmetric Catalysis*. Wiley, New York.
- Meister Pro Crop Protection Handbook. 2013. *The Essential Desktop Reference for Plant Health Experts*. Meister Publishing Company, Willoughby, Ohio.
- Mitter H. 2021. *Towards integrated research in agricultural adaptation to climate and socio-economic change (Habilitation)*. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria.

- Mitter H, Schmid E. 2019. Computing the economic value of climate information for water stress management exemplified by crop production in Austria. *Agricultural Water Management* 221: 430–448. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.005>.
- Mitter H et al. 2015. Spatial modeling of robust crop production portfolios to assess agricultural vulnerability and adaptation to climate change. *Land Use Policy* 46: 75–90. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.010>
- Mitter H et al. 2014. The participation of agricultural stakeholders in assessing regional vulnerability of cropland to soil water erosion in Austria. *Reg Environ Change* 14: 385–400. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0506-7>
- Mitter H et al. 2018. The Stimuli-Actions-Effects-Responses (SAER)-framework for exploring perceived relationships between private and public climate change adaptation in agriculture. *J. Environ Manag* 209(1): 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.063>
- Mitter H et al. 2019. Exploring Farmers' Climate Change Perceptions and Adaptation Intentions: Empirical Evidence from Austria. *Environ Manag* 63 : 804–821. <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01158-7>
- Moghissi AA et al. 2016. Golden rice: scientific, regulatory and public information processes of a genetically modified organism. *Critical Reviews in Biotechnology* 36(3): 535–541. <https://doi.org/10.3109/07388551.2014.993586>
- Molla KA et al. 2021. Precise plant genome editing using base editors and prime editors. *Nat. Plants* 7: 1166–1187. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00991-1>
- Mozaffarian D et al. 2018. Role of government policy in nutrition—barriers to and opportunities for healthier eating. *BMJ* 361: k2426. <https://doi.org/10.1136/bmj.k2426>
- Myers S et al. 2014. Increasing CO<sub>2</sub> threatens human nutrition. *Nature* 510: 139–142. <https://doi.org/10.1038/nature13179>
- Nardone A et al. 2010. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science* 130(1–3): 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.011>.
- Nature. 2013. GM crops: A story in numbers. *Nature* 497: 22–23. <https://doi.org/10.1038/497022a>
- NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC). 2016a. Trends in adult body-mass index in 200 countries from 1975 to 2014: a pooled analysis of 1698 population-based measurement studies with 19·2 million participants. *The Lancet* 387: 1377–1396. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)30054-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)30054-X)
- NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC). 2016b. A century of trends in adult human height. *eLife Sciences* 5: e13410. <https://doi.org/10.7554/eLife.13410>
- Neumann H. 2012. Rewiring translation – Genetic code expansion and its applications. *FEBS Lett* 586(15): 2057–2064. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.02.002>

- News in Brief. 2021. Argentina first to market with drought-resistant GM wheat. *Nat Biotechnol* 39: 652. <https://doi.org/10.1038/s41587-021-00963-y>
- News in Brief. 2022. Japan embraces CRISPR-edited fish. *Nat Biotechnol* 40: 10. <https://doi.org/10.1038/s41587-021-01197-8>
- Nielsen AZ et al. 2016. Extending the biosynthetic repertoires of cyanobacteria and chloroplasts. *Plant J* 87(1): 87–102. <https://doi.org/10.1111/tpj.13173>
- Noleppa S. 2016. The economic, social and environmental value of plant breeding in the European Union: An ex-post evaluation and ex-ante assessment. HFFA Research Paper 01.
- Noleppa S. 2017. Banning neonicotinoids in the European Union: An ex-post assessment of economic and environmental costs. HFFA Research Paper 01.
- Noleppa S, von Witzke H. 2017. Der gesamtgesellschaftliche Nutzen von Pflanzenschutz in Deutschland: Ein Update und eine Erweiterung zu vorherigen Studienergebnissen. HFFA Research Paper 2.
- Noyori R. 1994. *Asymmetric Catalysis in Organic Synthesis*. Wiley, New York.
- Nugent R et al. 2023. Diet-Focused Behavioral Interventions to Reduce the Risk of Non-Communicable Diseases in Low- and Middle-Income Countries: A Scoping Review of the Existing Evidence. <https://foodsystemeconomics.org/wp-content/uploads/Nugent-et-al.-2023.pdf>.
- Nunes OBDS et al. 2025. Can cell-cultured meat from stem cells pave the way for sustainable alternative protein? *Curr Res Food Sci* 21(10): 100979. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.100979>
- Nyerges A et al. 2023. A swapped genetic code prevents viral infections and gene transfer. *Nature* 615: 720–727. <https://doi.org/10.1101/2022.07.08.499367>
- O'Donoghue P et al. 2013. Upgrading protein synthesis for synthetic biology. *Nat Chem Biol* 9: 594–598. <https://doi.org/10.1038/nchembio.1339>
- Ofori KF et al. 2022. Improving nutrition through biofortification – A systematic review. *Front Nutr* 9: 1043655. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1043655>
- Okunogbe A et al. 2022. Economic Impacts of Overweight and Obesity: Current and Future Estimates for 161 Countries. *BMJ Global Health* 7(9): e009773. <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2022-009773>.
- Oldroyd GED, Dixon R. 2014. Biotechnological solutions to the nitrogen problem. *Curr Opin Biotechnol* 26: 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.08.006>
- Ort DR et al. 2015. Redesigning photosynthesis to sustainably meet global food and bio-energy demand. *Proc Natl Acad Sci USA* 112(28): 8529–8536. <https://doi.org/10.1073/pnas.1424031112>
- Paarlberg RL. 1980. Lessons of the Grain Embargo. *Foreign Affairs* 59(1): 144–162. <https://doi.org/10.2307/20040657>

- Paine JA et al. 2005. Improving the nutritional value of Golden Rice through increased provitamin A content. *Nat Biotechnol* 23: 482–487. <https://doi.org/10.1038/nbt1082>
- Panagos P et al. 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environ. Sci. Policy* 54: 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Patron NJ. 2014. DNA assembly for plant biology: techniques and tools. *Curr Op Plant Biol* 19: 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2014.02.004>
- Pergner I, Lippert C. 2023. On the Effects That Motivate Pesticide Use in Perspective of Designing a Cropping System without Pesticides but with Mineral Fertilizer—a Review. *Agronomy for Sustainable Development* 43(2): 24. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00877-w>
- Phang SK et al. 2023. From Satellite to UAV-Based Remote Sensing: A Review on Precision Agriculture. *IEEE Access* 11: 127057–127076. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3330886>
- Pimentel DS, Raven PH. 2000. Bt corn pollen impacts on nontarget lepidoptera: assessment of effects in nature. *Proc Natl Acad Sci U A.* 97(15): 8198–8199. <https://doi.org/10.1073/pnas.97.15.8198>
- Pixley KV et al. 2022. Genome-edited crops for improved food security of smallholder farmers. *Nat Genet* 54(4): 364–367. <https://doi.org/10.1038/s41588-022-01046-7>
- Poore J, Nemecek T. 2018. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360 (6392): 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0216>
- Popkin BM. 2001. The nutrition transition and obesity in the developing world. *The Journal of nutrition* 131(3): 871S–873S. <https://doi.org/10.1093/jn/131.3.871S>
- Porter JR, Semenov MA. 2005. Crop responses to climatic variation. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 360(1463): 2021–2035. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1752>, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16433091/>
- Potterat O, Hamburger M. 2008. Drug discovery and development with plant-derived compounds. *Prog Drug Res* 65: 45–118. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8117-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8117-2_2)
- Puchta H, Houben A. 2024. Plant chromosome engineering - past, present and future. *New Phytol* 241(2): 541–552. <https://doi.org/10.1111/nph.19414>
- Puma MJ. 2019. Resilience of the global food system. *Nat Sustain* 2: 260–261. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0274-6>
- Pusztahelyi T et al. 2015. Secondary metabolites in fungus-plant interactions. *Frontiers in Plant Science* 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00573>
- Qaim M. 2020. Role of New Plant Breeding Technologies for Food Security and Sustainable Agricultural Development. *Applied Economic Perspectives and Policy* 42: 129–150. <https://doi.org/10.1002/aepp.13044>
- Rae BD et al. 2017. Progress and challenges of engineering a biophysical CO<sub>2</sub>-concentrating mechanism into higher plants. *J Exp Bot* 68 (14): 3717–3737. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx133>

- Rai A et al. 2017. Integrated omics analysis of specialized metabolism in medicinal plants. *Plant Journal* 90(4): 764–797. <https://doi.org/10.1111/tpj.13485>
- Raich J et al. 2024. Glossar. In: APCC Special Report: Landnutzung und Klimawandel in Österreich (APCC SR Land). In Jandl R, Tappeiner U, Foldal CB, Erb K-H. (Hrsg.). Springer Spektrum, Heidelberg: 491–526. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-67864-0>
- Rakocy JE. 2012. Aquaponics - Integrating fish and plant culture. In: Tidwell JH (Hrsg.). *Aquaculture Production Systems*. Wiley-Blackwell, Oxford: 344–386. <https://doi.org/10.1002/9781118250105.ch14>
- Rakocy JE et al. 2006. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics — Integrating Plants and Fish Culture. Oklahoma Cooperative Extension Service. SRAC Publication No. 454. <https://pods.okstate.edu/?product=srac-454-recirculating-aquaculture-tank-production-systems-aquaponics-integrating-fish-and-plant-culture-2>
- Rathor AS et al. 2024. Empowering vertical farming through IoT and AI-Driven technologies: A comprehensive review. *Heliyon* 10(15): e34998. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34998>
- Raven PH. 2014. GM crops, the environment and sustainable food production. *Transgenic Res* 23: 915–921. <https://doi.org/10.1007/s11248-013-9756-x>
- Ravishankara AR et al. 2009. Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. *Science* 326(5949): 123–125. <https://doi.org/10.1126/science.1176985>
- Rees HA, Liu DR. 2018. Base editing: precision chemistry on the genome and transcriptome of living cells. *Nat Rev Genet* 19: 770–788. <https://doi.org/10.1038/s41576-018-0059-1>
- Reich PB et al. 2018. Unexpected reversal of C3 versus C4 grass response to elevated CO<sub>2</sub> during a 20-year field experiment. *Science* 360(6386): 317–320. <https://doi.org/10.1126/science.aas9313>
- Reise J et al. 2024. Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor: Potenziale und Sensitivitäten. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE) (No. 10/2024), Climate Change. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzmassnahmen-im-lulucf-sektor-potenziale>
- Rembold M. 2013. „Urban Farming“ – Flucht nach Oben. *Laborjournal* 09: 30–35. <https://www.laborjournal.de/editorials/767.php>
- Rembold M. 2023. Vertical Farming. Zwischen Hype und neuen Chancen. *Laborjournal* 11: 13–15. [https://www.laborjournal.de/rubric/hintergrund/hg/hg\\_23\\_11\\_01.php](https://www.laborjournal.de/rubric/hintergrund/hg/hg_23_11_01.php)
- Rezaei EE et al. 2023. Climate change impacts on crop yields. *Nat Rev Earth Environ* 4: 831–846. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00491-0>
- Roberts RJ. 2018. The Nobel Laureates' Campaign Supporting GMOs. *J Innov Knowl* 3 (2): 61–65. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2017.12.006>

- Rogers C, Oldroyd GED. 2014. Synthetic biology approaches to engineering the nitrogen symbiosis in cereals. *J Exp Bot* 65(8): 1939–1946. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru098>
- Rojas-Downing MM et al. 2017. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management* 16: 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>
- Roodbeen R, van Hest JCM. 2009. Synthetic cells and organelles: compartmentalization strategies. *BioEssays* 31(12): 1299–1308. <https://doi.org/10.1002/bies.200900106>
- Rovner AJ et al. 2015. Recoded organisms engineered to depend on synthetic amino acids. *Nature* 518: 89–93. <https://doi.org/10.1038/nature14095>
- Ruttan VW. 1982. *Agricultural Research Policy*. Minneapolis, MN, University of Minnesota Press. 369 Seiten.
- Sánchez MA, Parrott WA. 2017. Characterization of scientific studies usually cited as evidence of adverse effects of GM food/feed. *Plant Biotechnol J* 15(10): 1227–1234. <https://doi.org/10.1111/pbi.12798>
- Savary S et al. 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nat Ecol Evol* 3(3): 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
- Scharff LB, Bock R. 2014. Synthetic biology in plastids. *Plant J* 78 (5): 783–798. <https://doi.org/10.1111/tpj.12356>
- Schlieker ML et al. 2025. Technology and processes for cultivated meat. *Fundamentals, challenges, and perspectives*. *ErnährungsUmschau* 72(6): AP34–42. <https://doi.org/10.4455/eu.2025.025>
- Schneider P et al. 2021. Circular Approaches in Small-Scale Food Production. *Circ Econ Sust* 1: 1231–1255. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00129-7>
- Semmler G, Datz, C. 2022. Personalisierte Ernährung als Zukunftsmodell. *J Gastroenterol Hepatol Erkr* 20: 97–102. <https://doi.org/10.1007/s41971-022-00136-x>
- Seppelt R et al. 2022. Agriculture and food security under a changing climate: An underestimated challenge. *iScience* 25(12): 105551. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105551>
- Shahaf N et al. 2016. The WEIZMASS spectral library for high-confidence metabolite identification. *Nature Communications* 7: 12423. <https://doi.org/10.1038/ncomms12423>
- Shelton AM, Sears MK. 2001. The monarch butterfly controversy: scientific interpretations of a phenomenon. *Plant J* 27(6):483–438. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.2001.01118.x>
- Shin J et al. 2023. Trends and Prospect of Machine Vision Technology for Stresses and Diseases Detection in Precision Agriculture. *Agriengineering* 5(1): 20–39. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5010003>
- Singh AP et al. 2019. Health benefits of resveratrol: Evidence from clinical studies. *Medicinal Research Reviews* 39(5): 1851–1891. <https://doi.org/10.1002/med.21565>
- Sishodia RP et al. 2020. Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture. *Remote Sensing* 12(19): 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>

- Smil V. 2000. *Feeding the World: A Challenge for the 21st Century*. MIT.
- Smil V. 2013. *Should We Eat Meat Evolution and Consequences of Modern Carnivory*. 1 edition. Wiley-Blackwell.
- Smith P et al. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 363: 789–813. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>
- Song J et al. 2003. Gene RB cloned from *Solanum bulbocastanum* confers broad spectrum resistance to potato late blight. *Proc Natl Acad Sci USA* 100(16): 9128–9133. <https://doi.org/10.1073/pnas.1533501100>
- Springmann M et al. 2021. The Global and Regional Costs of Healthy and Sustainable Dietary Patterns: A Modelling Study. *The Lancet Planetary Health* 5(11): e797–807. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00251-5)
- Stavins RN. 2022. The Relative Merits of Carbon Pricing Instruments: Taxes versus Trading. *Review of Environmental Economics and Policy* 16(1): 62–82. <https://doi.org/10.1086/717773>
- Steppler HA, Nair. PKR. 1987. *Agroforestry — A Decade of Development*. Nairobi: International Council for Research in Agroforestry. Cambridge University Press, Cambridge.
- Stokstad E. 2022. Gene-edited wheat resists dreaded fungus without pesticides. *Science News*. <https://doi.org/10.1126/science.ada1111>
- Sutton MA et al. 2011. *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Tan J et al. 2022. DNA base editing in nuclear and organellar genomes. *Trends Genet* 38(11): 1147–1169. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2022.06.015>
- Tiemeyer B et al. 2020. A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators* 109: 105838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>
- Toreti A et al. 2020. Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO<sub>2</sub> on crops. *Nat Food* 1: 775–782. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00195-4>
- van Ittersum MK et al. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance — A review. *Field Crops Res*. 143: 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- van Lierderkerke M et al. 2014. *Progress in the management of contaminated sites in Europe*. Publications Office of the European Union. <https://dx.doi.org/10.2788/4658>
- van Valkengoed AM, Steg L. 2019. Meta-analyses of factors motivating climate change adaptation behaviour. *Nat Clim Change* 9: 158. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0371-y>
- Viering K. 2019. Ackerbau und Viehzucht im Hochhaus. *Spektrum der Wissenschaft*. In: *Landwirtschaft — Neue Wege auf dem Acker*. Spektrum Kompakt: 19. <https://www.spektrum.de/news/ackerbau-und-viehzucht-im-hochhaus-ist-das-womoeglich-unsere-zukunft/1621212>

- Vlad I et al. 2023. The development of the NOURISHING and MOVING benchmarking tools to monitor and evaluate national governments' nutrition and physical activity policies to address obesity in the European region. *Obesity Reviews* 24(S1): e13541. <https://doi.org/10.1111/obr.13541>
- von Philipsborn P. 2022. Wissenschaftliche Evidenz in der Ernährungspolitik, *ErnährungsUmschau* 69: 10–17. <https://doi.org/10.4455/eu.2022.003>
- von Philipsborn P. 2024. Public Health Strategien zur Zuckerreduktion. *Schweizer Zeitschrift für Ernährungsmedizin* 3: 8–11. <https://www.rosenfluh.ch/media/ernaehrungsmedizin/2024/03/Gesunde-Ernaehrung-foerdern-Public-Health-Strategien-zur-Zuckerreduktion.pdf>
- von Philipsborn P et al. 2021. Nutrition policies in Germany: a systematic assessment with the Food Environment Policy Index, *Public Health Nutr* 25 (6): 1691–1700. <https://doi.org/10.1017/S1368980021004742>
- von Witzke H et al. 2008. Global Agricultural Market Trends Revisited: The Roles of Energy Prices and Biofuel Production. Working Paper 89, Humboldt-Universität zu Berlin. <https://hdl.handle.net/10419/96472>
- von Witzke H, Noleppa S. 2009. EU Agricultural Production and Trade: Can More Production Efficiency Prevent Increasing ‚Land-grabbing‘ Outside of Europe? Opera Research Center, University of Piacenza. [https://np-net.pbworks.com/f/Von\\_Witzke+\(2010\)+EU+agri\\_prod\\_trade.pdf](https://np-net.pbworks.com/f/Von_Witzke+(2010)+EU+agri_prod_trade.pdf)
- von Witzke H, Noleppa S. 2016. The High value to Society of Modern Agriculture: Global Food Security, Climate Protection and Preservation of the Environment. Food Security in a Food Abundant World: An Individual Country Perspective. In: Schmitz A, Kennedy PL, Schmitz TG (Hrsg.): *Frontiers of Economics and Globalization* 16. Bingle, Emerald. <https://doi.org/10.1108/S1574-871520150000016016>
- von Witzke H et al. 2017. Der gesamtgesellschaftliche Nutzen moderner Geflügelfleischerzeugung in Deutschland und der Europäischen Union: Eine Analyse ökonomischer und ökologischer Effekte. HFFA Research Paper 04. [https://deutsches-gefluegel.de/wp-content/uploads/2018/07/Der\\_gesamtgesellschaftliche\\_Nutzen\\_moderner\\_Gefluegelfleischerzeugung\\_in\\_Deutschland\\_und\\_der\\_EU\\_HFFA\\_Research.pdf](https://deutsches-gefluegel.de/wp-content/uploads/2018/07/Der_gesamtgesellschaftliche_Nutzen_moderner_Gefluegelfleischerzeugung_in_Deutschland_und_der_EU_HFFA_Research.pdf)
- Waltz E. 2016. Gene-edited CRISPR mushroom escapes US regulation. *Nature* 532: 293. <https://doi.org/10.1038/nature.2016.19754>
- Waltz E. 2017. First genetically engineered salmon sold in Canada. *Nature* 548: 148. <https://doi.org/10.1038/nature.2017.22116>
- Weber D et al. 2020. Medication Intake Is Associated with Lower Plasma Carotenoids and Higher Fat-Soluble Vitamins in the Cross-Sectional MARK-AGE Study in Older Individuals. *Journal of Clinical Medicine* 9(7): 2072. <https://doi.org/10.3390/jcm9072072>
- Wei S et al. 2022. A transcriptional regulator that boosts grain yields and shortens the growth duration of rice. *Science* 377(6604): eabi8455. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abi8455>

- Weindl I et al. 2017. Livestock and human use of land: Productivity trends and dietary choices as drivers of future land and carbon dynamics. *Global and Planetary Change* 159: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.10.002>
- Wenz L, Willner SN. 2022. Climate impacts and global supply chains: an overview, in: *Handbook on Trade Policy and Climate Change*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham: 290–316. [https://publications.pik-potsdam.de/pubman/item/item\\_26892](https://publications.pik-potsdam.de/pubman/item/item_26892)
- Wicke B et al. 2012. Indirect land use change: review of existing models and strategies for mitigation. *Biofuels* 3(1): 87–100. <https://doi.org/10.4155/bfs.11.154>
- Willett W et al. 2019. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems, *The Lancet* 393(10170): 447–492. [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Wittmann M et al. 2024. Klimawandelbedingte psychosoziale Belastungen und wahrgenommene Anpassungskapazitäten bei Landwirtinnen und Landwirten. *Standort* 48: 312–319. <https://doi.org/10.1007/s00548-024-00923-z>
- Wolfert S et al. 2017. Big Data in Smart Farming. *Agricult Syst* 153: 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- World Resources Institute, The World Bank, UNEP, UNDP. 2018. *Creating a Sustainable Food Future: A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050*. <https://www.wri.org/publication/creating-sustainable-food-future>.
- Wright AV et al. 2016. Biology and applications of CRISPR systems: harnessing nature's toolbox for genome engineering. *Cell* 164(1–2): 29–44. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.12.035>
- Wurtzel ET et al. 2019. Revolutionizing agriculture with synthetic biology. *Nature Plants* 5: 1207–1210. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0539-0>
- Xue L et al. 2017. Missing Food, Missing Data? A Critical Review of Global Food Losses and Food Waste Data. *Environmental Science & Technology* 51(12): 6618–6633. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00401>.
- Young TS, Schultz PG. 2010. Beyond the canonical 20 amino acids: expanding the genetic lexicon. *J Biol Chem* 285(15): 11039–11044. <https://doi.org/10.1074/jbc.R109.091306>
- Yue J et al. 2022. SunUp and Sunset genomes revealed impact of particle bombardment mediated transformation and domestication history in papaya. *Nat Genet* 54: 715–724. <https://doi.org/10.1038/s41588-022-01068-1>
- Xu YB et al. 2022. Smart breeding driven by big data, artificial intelligence, and integrated genomic-enviromic prediction. *Molecular Plant* 15(11): 1664–1695. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2022.09.001>
- Zamanian K et al. 2024. Acidification of European croplands by nitrogen fertilization: Consequences for carbonate losses, and soil health. *Sci Total Environ* 924: 171631. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171631>

- Zhang JC et al. 2019. Monitoring plant diseases and pests through remote sensing technology. *Computers and Electronics in Agriculture* 165: 104943. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104943>
- Zhu H et al. 2020a. Applications of CRISPR-Cas in agriculture and plant biotechnology. *Nat Rev Mol Cell Biol* 21: 661–677. <https://doi.org/10.1038/s41580-020-00288-9>
- Zhu X-G et al. 2020b. A wish list for synthetic biology in photosynthesis research. *J Exp Bot* 71(7): 2219–2225. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa075>
- Zsögön A et al. 2018. *De novo* domestication of wild tomato using genome editing. *Nat Biotechnol* 36: 1211–1216 <https://doi.org/10.1038/nbt.4272>

# Autorinnen und Autoren

**Bickelmann, Constanze**, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften und Deutsches Institut für Ernährungsforschung, Potsdam-Rehbrücke

**Ralph Bock\***, Max-Planck-Institut für Molekulare Pflanzenphysiologie, Potsdam-Golm, und Universität Potsdam

**Bodirsky, Benjamin Leon**, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Lab Landsystemtransformation

**Grune, Tilman**, Deutsches Institut für Ernährungsforschung Potsdam-Rehbrücke und Universität Potsdam

**Hermine Mitter**, Karl-Franzens-Universität Graz, Lehrstuhl für Nachhaltigkeit, Klimawandel und menschliches Verhalten

**Andreas Seidel-Morgenstern\***, Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg und Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

**Peter von Philipsborn**, Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Public Health Nutrition

**Harald von Witzke**, Humboldt-Universität zu Berlin

**Lothar Willmitzer\***, Max-Planck-Institut für Molekulare Pflanzenphysiologie, Potsdam-Golm

\* Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

# Kapitelverantwortliche

Die Inhalte der Kapitel 1 bis 4 spiegeln die Fachexpertise der verantwortlichen Autor:innen wieder, die im Folgenden spezifiziert sind. Die Empfehlungen in Kapitel 5 wurden gemeinsam erarbeitet.

**Bickelmann, Constanze:** Einleitung, Zusammenfassungen, Kapitel 3.2, 4.2, 4.3 (Einleitung) und 5.

**Bock, Ralph:** Einleitung, Kapitel 1.3.3, 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5, 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 3.4.2 und 5.

**Bodirsky, Benjamin Leon:** Kapitel 1.1.1, 1.1.2, 1.2.6, 1.3.1, 2.2.1, 2.4, 4.3 (Position 1) und 5.

**Grune, Tilman:** Kapitel 3.2, 4.2 und 5.

**Mitter, Hermine:** Einleitung, Kapitel 1.2.2, 1.3.2, 1.4.3, 4.4 und 5.

**Seidel-Morgenstern, Andreas:** Kapitel 1.2.1, 1.2.5, 2.2.2, 3.3 und 5.

**von Philipsborn, Peter:** Einleitung, Kapitel 2.5 und 5.

**von Witzke, Harald:** Kapitel 1.2.3, 1.2.4, 1.4.1, 1.4.2, 2.1.1, 2.1.2, 2.3.4, 4.3 (Position 2) und 5.

**Willmitzer, Lothar:** Kapitel 2.2.3, 3.1, 3.4.1, 4.1 und 5.

# Mitglieder der Interdisziplinären Arbeitsgruppe

Die Mitglieder der Interdisziplinären Arbeitsgruppe „Ernährung, Gesundheit, Prävention“ setzen sich aus Expert:innen vieler Disziplinen zusammen.

Sprecher und stellvertretende Sprecher:innen sind Ralph Bock (Max-Planck-Institut für Molekulare Pflanzenphysiologie, Potsdam-Golm) und Annette Grüters-Kieslich (Charité – Universitätsmedizin Berlin) aus der Biowissenschaftlich-Medizinischen Klasse der BBAW und Tilman Grune (Deutsches Institut für Ernährungsforschung Potsdam-Rehbrücke).

Die Biowissenschaftlich-Medizinische Klasse der BBAW wird des Weiteren vertreten durch Andreas Diefenbach (Charité – Universitätsmedizin Berlin), Angelika Eggert (Universitätsmedizin Essen), Detlev Ganten (Virchow Foundation), Martin Korte (Technische Universität Braunschweig), Britta Siegmund (Charité – Universitätsmedizin Berlin) und Lothar Willmitzer (Max-Planck-Institut für Molekulare Pflanzenphysiologie, Potsdam-Golm). Ralph Hertwig (Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, Berlin) gehört der Sozialwissenschaftlichen Klasse an, Andreas Seidel-Morgenstern (Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg) der Technikwissenschaftlichen Klasse und Philip van der Eijk (Humboldt-Universität zu Berlin) der Geisteswissenschaftlichen Klasse.

Hermine Mitter (Universität Graz) nimmt als Mitglied der Jungen Akademie teil.

Weitere Mitglieder sind Benjamin Leon Bodirsky (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung), Adelheid Kuhlmei (Charité – Universitätsmedizin Berlin & Medizinische Universität Lausitz), Ute Mons (Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg), Peter von Philipsborn (Universität Bayreuth), Georg Seifert (Charité – Universitätsmedizin Berlin), Harald von Witzke (Humboldt-Universität zu Berlin) und Johanna Wolff (Universität Osnabrück).

Constanze Bickelmann (BBAW) ist wissenschaftliche Koordinatorin der Interdisziplinären Arbeitsgruppe. Emil von Lossow (BBAW) wirkt als studentische Hilfskraft mit. Die Interdisziplinäre Arbeitsgruppe wird von Ute Tintemann (BBAW) administrativ und publizistisch betreut.

## Weitere Titel der Reihe „Denkanstöße aus der Akademie“

**13 / Juni 2023**

Carola Lentz und Andrea Noll

**Early-Career-Förderung in der deutsch-afrikanischen Wissenschaftskooperation.  
Leistungen, Herausforderungen, Perspektiven  
(online und gedruckt)**

**14 / Juni 2023**

Anna L. Ahlers, Uwe Schimank, Uli Schreiterer

**Gefährdungen der Wissenschaftsfreiheit aus internationalen Verflechtungen  
(online und gedruckt)**

**15 / Jan 2024**

Detlev Ganten, Kerstin Berr, Susanne Melin und Britta Rutert (Hrsg.)

**Gesundheit von Morgen: Gesundheitskompetenz stärken –  
Prävention verbessern  
(online und gedruckt)**

**16 / January 2024**

Carola Lentz and Andrea Noll

**Early-career funding in German-African Academic cooperation.  
Achievements, challenges, perspectives  
(translation of Denkanstoß 13, online)**

**17 / Juni 2024**

Annette Grüters-Kieslich, Angelika C. Messner, Andreas Radbruch, Roman Marek (Hrsg.)

**Zukunft der Pflege  
(online und gedruckt)**

**18 / Oktober 2025**

Tilman Grune, Constanze Bickelmann, Benjamin Leon Bodirsky, Andreas Diefenbach, Angelika Eggert, Annette Grüters-Kieslich, Ralph Hertwig, Martin Korte, Adelheid Kuhlmeier, Ute Mons, Anne Schirmaier, Georg Seifert, Britta Siegmund, Peter von Philipsborn, Lothar Willmitzer, Johanna Wolff

**Die Zukunft unserer Ernährung: Ernährung und Gesundheit  
(online und gedruckt)**

Alle Hefte der Reihe können auf dem edoc-Server der BBAW abgerufen werden:  
<https://edoc.bbaw.de/solrsearch/index/search/searchtype/series/id/17>









Weltweit stehen Nahrungsmittel nicht in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung. Vor dem Hintergrund des Klimawandels und weltweiter Krisen sind Handlungsansätze für eine gesicherte Produktion gesunder und nachhaltiger Nahrungsmittel dringend vonnöten.

Im vorliegenden Beitrag analysieren die Autor:innen den aktuellen Forschungsstand zur Quantität und Qualität unserer Nahrungsmittel. Darauffolgend identifizieren sie Potentiale und Herausforderungen für innovative Lösungsansätze. Zudem entwickeln sie Handlungsempfehlungen für eine notwendige Agrar- und Ernährungswende.