

Bioökonomie für eine nachhaltige Proteinversorgung – Zur Bedeutung tierischer Produkte und biobasierter Innovationen

August 2017

Autoren: Lang, C., Daniel, H., Birner, R. und Reich, M.*

Präambel

Das vorliegende Hintergrundpapier ist im Zuge der Rechercharbeiten des Bioökonomierates entstanden. Zweck dieses Beitrages ist die Beschreibung des aktuellen Wissensstandes und die Identifizierung von Wissenslücken. Der Rat sieht dies als eine Grundvoraussetzung, um politische Empfehlungen formulieren zu können. Dieses Dokument erhebt nicht den Anspruch, eine abgeschlossene wissenschaftliche Veröffentlichung im klassischen Sinne zu sein. Vielmehr ist es eine Beschreibung der konzeptionellen Basis, auf der die Überlegungen und Empfehlungen des Rates aufbauen. Unter Berücksichtigung der dynamischen weltweiten Entwicklung der Bioökonomie, werden die hier zusammengefassten Inhalte, Erkenntnisse, Datenquellen und Forschungsagenden ständig aktualisiert und erweitert. Hintergrundpapiere stehen in der Verantwortung der genannten Autoren.

Zusammenfassung

Tiere sind für die Bioökonomie von umfassender Bedeutung. Als Teil von Ökosystemen tragen Tiere essentiell zu deren Funktionalität bei. Für große Teile der landwirtschaftlichen Produktion erbringen Wildtiere wichtige und zum Teil unerlässliche Dienstleistungen, von der Bestäubung von Blüten bis zum Abbau von organischem Material im Boden. Nach ihrer Domestizierung durch den Menschen werden Tiere seit Jahrtausenden genutzt und gezüchtet, zum Schutz, für den Transport, zur Produktion von Materialien und Dünger und vor allem zur Bereitstellung von Nahrungsmitteln. Die Bereitstellung von Nahrungsmitteln für eine ausreichende und gesundheitsförderliche Ernährung ist eine Kernaufgabe der Bioökonomie. Dabei ist vor allem die nachhaltige Bereitstellung hochwertigen Proteins für die menschliche Ernährung von großer Bedeutung. Nutztiere spielen dabei bis heute eine wichtige Rolle, da sie qualitativ besonders hochwertige Nahrungsmittel liefern, insbesondere im Hinblick auf die Proteinversorgung und ausgewählte Mikronährstoffe (Bsp. Eisen). Ein regelmäßig hoher Konsum von tierischen Nahrungsmitteln kann jedoch auch negative gesundheitliche Auswirkungen haben.

Ein großer Teil der weltweit verfügbaren landwirtschaftlichen Nutzfläche sind Grasländer. Diese lassen sich nur über die extensive Haltung von Wiederkäuern nachhaltig nutzen. Allerdings werden auch in erheblichem Umfang fruchtbare Ackerflächen für den Anbau von Futtermitteln für die intensive Tierhaltung benötigt. Diese Ackerflächen könnten auch direkt für den Anbau von Nahrungsmitteln verwendet werden. Somit entsteht eine Konkurrenz um Böden und Wasser. Die Tierproduktion ist besonders in den Industrieländern bereits sehr effizient und wird laufend optimiert. Für die überwiegende Deckung des globalen Proteinbedarfs aus tierischen Produkten wie Fleisch und Milch ergeben sich dennoch große ökologische, ökonomische und soziale Probleme. Zum einen ist die Proteinumwandlung von Futtermitteln in tierische Lebensmittel wenig effizient und lässt sich physiologisch nur begrenzt steigern. Zum anderen steigt die globale Nachfrage nach proteinhaltigen Lebensmitteln sehr stark und damit auch der Druck auf eine Ausweitung der Tierhaltung und Futtermittelproduktion. Beides ist mit negativen Gesundheits-, Umwelt- und Klimawirkungen verbunden. Ziel des vorliegenden Papiers ist es, diese Problematik in ihren Einzelaspekten zu beleuchten und Lösungsoptionen aufzuzeigen, wobei der Fokus des Papiers auf die Proteinversorgung gerichtet ist. Drei prinzipielle Ansätze werden dabei identifiziert: 1. Eine Reduktion des Konsums tierischer Nahrungsmittel in jenen Ländern, in denen der Konsum über der aus gesundheitlichen Gründen empfohlenen Menge liegt, 2. Alternativen zu tierischen Nahrungsmitteln und 3.

*Kontakt über die Geschäftsstelle des Bioökonomierates

die Optimierung der Produktion tierischer Nahrungsmittel. Die Bioökonomie kann wichtige Beiträge für alle drei Ansätze leisten, insbesondere für die Entwicklung alternativer Proteinquellen für nachhaltige, gesunde Lebensmittel. Das vorliegende Papier wird die aquatische Tierproduktion als hochrelevantes, aber eigenständiges Thema größtenteils ausklammern und sich auf terrestrische Nutztiere konzentrieren. Nutztiere, die ausschließlich Produkte liefern, die nicht zur Ernährung beitragen (wie z. B. Pelztiere) werden nicht miteinbezogen. Die Themen Tierwohl und gesellschaftliche Diskussion der modernen Nutztierhaltung wurden an anderer Stelle bereits ausführlich behandelt und entsprechende Empfehlungen ausgesprochen (u. a. BÖR 2010, 2014a; WBA 2015). Im vorliegenden Papier wird dieser Bereich nicht weiter vertieft.

Inhaltsverzeichnis

1. Die Rolle der Produktion tierischer Nahrungsmittel in der Bioökonomie	3
1.1. Globale Ernährungssituation	3
1.2. Proteinbedarf und die Bedeutung von pflanzlichen und tierischen Proteinen in der menschlichen Ernährung	4
1.3. Die Bedeutung der Nutztierhaltung in der Bioökonomie	6
1.4. Konsum und Nachfrage	7
2. Einschätzung der Nachhaltigkeit der Ernährung mit tierischen Nahrungsmitteln	9
2.1. Effizienz und Wirtschaftlichkeit	10
2.2. Auswirkungen auf die Umwelt und natürliche Ressourcen	12
2.3. Klimawandel	15
2.4. Menschliche Gesundheit	17
3. Definition des Proteinproblems	18
4. Ansätze zur Lösung des Proteinproblems	18
4.1. Reduktion des Konsums tierischer Nahrungsmittel in Industrieländern	18
4.2. Alternativen zu herkömmlichen tierischen Nahrungsmitteln als Proteinquelle	20
Pflanzliche Alternativen	20
Insekten	22
Algen	23
Aquakultur	24
Speise-Pilze	25
Mikrobielles Protein	25
In-vitro-Fleisch	26
4.3. Optimierte Produktion tierischer Nahrungsmittel	27
Optimierte Futtermittel	27
Alternative Proteinquellen für Futtermittel	27
Technischer Fortschritt und Digitalisierung	29
Entkopplung von Raumnutzungskonflikten	29
Hochwertige Nutzung von Nebenprodukten und Reststoffen	30
Fortschritte in der Tierzucht	30
Vermeidung von Verlusten	30
5. Fazit	32

1. Die Rolle der Produktion tierischer Nahrungsmittel in der Bioökonomie

Produktion und Konsum von proteinreicher Nahrung durch Nutztiere sollten im Kontext der globalen Ernährungssituation gesehen werden. Diese wird deshalb in diesem Kapitel zunächst anhand von wichtigen Eckdaten eingeführt, bevor die Bedeutung von Protein als Nährstoff für die menschliche Ernährung und die Wertigkeit unterschiedlicher Proteinquellen erörtert werden. Nutztiere spielen dabei eine zentrale Rolle, als Lieferanten besonders hochwertigen Proteins, sie sind jedoch auch Verbraucher und Produzenten anderer Ausgangsstoffe innerhalb der Bioökonomie. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Übersicht zum Konsum tierischer Nahrungsmittel weltweit und in Deutschland sowie der global steigenden Nachfrage.

1.1. Globale Ernährungssituation

In der Landwirtschaft liegt der Fokus seit Langem auf Produktivitätssteigerungen und der Ernährungssicherung für eine wachsende Weltbevölkerung. Die technischen Errungenschaften während der sog. Grünen Revolution, die vor etwa hundert Jahren begann und zwischen 1930 und 1960 ihr volles Ausmaß entfaltete, haben zu einer Vervielfachung der landwirtschaftlichen Produktion geführt und damit die Grundlage für die Ernährung von mehreren Milliarden Menschen geschaffen. Zwischen 1961 und heute ist die Weltbevölkerung um 98% gewachsen, während die Produktion von Nahrungsmitteln um 146% gestiegen ist; die Pro-Kopf-Produktion stieg somit um 24%. Die landwirtschaftlichen Erträge haben sich mehr als verdoppelt, die Anbaufläche ist im selben Zeitraum jedoch um nur 8% ausgeweitet worden. Dieser Anstieg in Produktivität pro Fläche fußt auf Erfolgen in der Pflanzenzucht und Bewirtschaftung, vor allem der Düngung mit Stickstoff. Der Einsatz von Düngemitteln stieg um das Siebenfache und der Einsatz von Wasser für die Bewässerung von Feldern verdoppelte sich (FAO und ITPS 2015).

Zwar können durch die Steigerung der Nahrungsmittelproduktion immer mehr Menschen ernährt werden und immer weniger Menschen in Entwicklungsländern müssen Hunger leiden, jedoch fehlt es vielfach weiterhin am Zugang zur bedarfsgerechten Ernährung, auch wenn Lebensmittel weltweit in ausreichender Menge vorhanden sind (Evans 2009). Die Produktion von energiereichem, aber relativ nährstoffarmem Getreide und daraus hergestellten Nahrungsmitteln trägt zur Fehlernährung bei; ihr übermäßiger Konsum gilt als Mitauslöser für Adipositas und die damit assoziierten Krankheiten wie Diabetes. Auch der übermäßige Verzehr von „rotem“ Fleisch und daraus hergestellten Produkten in Industrieländern erweist sich als negativ für die menschliche Gesundheit (Breslau et al. 1988; Giovannucci et al. 1994; Bouvard et al. 2015). Weltweit ist somit die Ernährung inzwischen der größte Risikofaktor für eine Vielzahl chronischer Erkrankungen. Etwa 1,9 Milliarden Menschen nehmen mehr Kalorien zu sich, als empfohlen (FAO 2012a). Die Zahl der Kinder unter fünf Jahren mit Übergewicht ist inzwischen fast genauso hoch wie die Zahl derer, die hungern (IFPRI 2016). Darüber hinaus sind etwa 800 Millionen Menschen mangelernährt, weil sie selbst bei einer ausreichenden Versorgung mit Kalorien nicht alle wichtigen Nährstoffe in ausreichenden Mengen zu sich nehmen können (IFPRI 2016). Neben Kindern und Heranwachsenden in Entwicklungsländern sind besonders ältere Menschen (auch in westlichen Industrieländern) von Mangelernährung betroffen. Dieses Problem wächst mit dem weltweit steigenden Durchschnittsalter bzw. der Lebenserwartung (WHO 2017).

Eine gesundheitsförderliche Ernährung ist somit für die Bevölkerung in allen Teilen der Welt von großer und wachsender Bedeutung. Daher stellen zahlreiche internationale Agenden, u. a. die *Sustainable Development Goals* (SDG 2 und 3), die *Global Targets 2025* der WHO und die *United Nations Decade of Action on Nutrition 2016 – 2025* die Verbesserung der globalen Ernährungssituation in den Mittelpunkt. So wird auch erwogen und gefordert, die negativen Folgen und assoziierten Kosten für die öffentliche Gesundheit in ganzheitliche Rechnungen zur Effizienz und Effektivität der Lebensmittelproduktion und Landwirtschaft einzubeziehen (Sukhdev et al. 2016). Auch wenn die Lebensumstände in vielen Ländern durch wirtschaftliches Wachstum und Entwicklung verbessert werden können, ist dies für die Qualität der Ernährung nicht *a priori* der Fall. So

wird in wirtschaftlich aufstrebenden Schwellenländern häufig das Ernährungsverhalten westlicher Industrienationen mit den entsprechenden gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen (Haddad et al. 2016) übernommen. Das Ziel, den Welthunger durch die Bereitstellung von ausreichend Kalorien zu bekämpfen, muss auf eine insgesamt gesunde Ernährungsweise ausgeweitet werden.

1.2. Proteinbedarf und die Bedeutung von pflanzlichen und tierischen Proteinen in der menschlichen Ernährung

Neben Vitaminen und Mineralstoffen sind Proteine diejenige Nahrungskomponente mit dem höchsten Anteil an essentiellen Bestandteilen. Proteine sind für nahezu alle lebenswichtigen Prozesse in den Zellen von Organismen verantwortlich. Als Strukturproteine sind sie Bausteine in Zellen und Geweben, als Enzyme vermitteln sie chemische Reaktionen, als Rezeptoren dienen sie der Kommunikation und in Membranen sorgen sie für Stabilität und Funktionalität. Da Proteine im Gegensatz zu Lipiden (und in begrenztem Maße auch Kohlenhydraten), im Körper nicht gespeichert werden, ist eine ausgewogene Zufuhr über die Ernährung unabdingbar.

Proteine sind Ketten von 20 verschiedenen Aminosäuren, deren genaue Abfolge (Sequenz) die Struktur und damit die Funktion des Proteins bestimmt. Im menschlichen Körper kommen etwa 100.000 verschiedene Proteine vor, die ausgehend von ca. 22.000 kodierenden Genen durch vielfältige Modifikation entstehen können. Von den für die Proteinsynthese benötigten 20 Aminosäuren können elf im Körper von gesunden, erwachsenen Menschen selbst synthetisiert werden, die sog. nicht-essentiellen (oder entbehrlichen) Aminosäuren. Die acht unabdingbar essentiellen, d. h., nicht-entbehrlichen Aminosäuren, müssen über die Nahrung bereitgestellt werden. Eine weitere, für Säuglinge und Kleinkinder nicht aber beim Erwachsenen essentielle Aminosäure, ist Histidin. Während der Verdauung werden die Nahrungsproteine in Aminosäuren zerlegt und in das Blut abgegeben. Aus diesen baut der Körper dann die eigenen Proteine auf. Somit ist nicht nur die Menge an Proteinen in der Ernährung von Belang, sondern vor allem auch deren Aminosäure-Zusammensetzung. Der Mangel an einer essentiellen Aminosäure in der Ernährung limitiert die Synthese von wichtigen Proteinen im Körper und so kann trotz eines angemessenen Gesamtproteingehaltes eine Mangelernährung auftreten. Die Aminosäure-Zusammensetzung von Proteinquellen bestimmt also deren biologische Wertigkeit für Mensch und Tier. Insbesondere große Bevölkerungsteile Afrikas, die sich hauptsächlich von Mais und Cassava mit niedriger Proteinvwertigkeit ernähren, leiden unter Mangelerscheinungen, die auf eine zu geringe Zufuhr an essentiellen Aminosäuren zurückgeführt wird (Pencharz et al. 2014; Semba 2016).

Alle Fachgesellschaften geben Zufuhrempfehlungen heraus, die nach Alterskategorien und Geschlecht klassifizieren. So beläuft sich der durchschnittliche Proteinbedarf laut der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e. V. (DGE) für Männer im Alter von 25 bis 51 Jahren auf ca. 57 Gramm pro Tag. Für Frauen gleichen Alters werden ca. 48 Gramm Protein am Tag empfohlen (DGE 2016a).

Viele pflanzliche Proteine weisen einen Mangel an einer oder mehreren essentiellen Aminosäuren auf (z. B. Lysin im Weizenprotein) und haben deshalb eine geringere biologische Wertigkeit für die menschliche Ernährung (siehe Abbildung 1). Hier kann die Kombination diverser pflanzlicher Proteinquellen auch zu einer ausgewogenen Aufnahme von Aminosäuren führen (Young und Pellet 1994; Melina et al. 2016). Gemessen am Gesamtproteingehalt können pflanzliche Lebensmittel Fleisch durchaus ersetzen. Die Samen mancher Pflanzen (z. B. Hülsenfrüchte) enthalten vergleichbare Mengen Protein pro Gramm wie Fleisch.

Um die Proteinqualität der verschiedenen Eiweißquellen zu bewerten und zu vergleichen, wurden Standardisierungen vereinbart. 1989 legte eine Expertenkommission der FAO und WHO eine praktikable Berechnung der Proteinqualität fest, bei der die Aminosäure-Zusammensetzung des fraglichen Proteins mit der eines Referenzproteins verglichen und zusätzlich die Effizienz der Verdauung ermittelt wird (protein digestibility-correc-

ted amino acid score; PDCAAS). Vorteile dieser Methode sind ihre relativ geringen Kosten und einfache Durchführbarkeit. Die meisten verfügbaren Angaben zur Proteinqualität beruhen auf diesem PDCAAS. Kritisch an der Methode ist allerdings, dass sie z. B. den oft erhöhten Gehalt an anti-nutritiven Inhaltsstoffen einiger pflanzlicher Proteinquellen nicht miteinbezieht und diesen daher eine zu hohe Qualität zuschreibt (u. a. Schaafsma 2012). Solche Inhaltsstoffe, wie die in vielen pflanzlichen Produkten enthaltene Phytinsäure, mindern die Aufnahme von Aminosäuren bei bzw. nach der Verdauung. Selbst eine Proteinquelle mit optimaler Aminosäure-Zusammensetzung kann dadurch an Wertigkeit für den Menschen verlieren.

Seit 2013 empfiehlt die FAO deshalb eine neue Methode, die Proteine hinsichtlich ihrer Aminosäure-Zusammensetzung und deren Aufnahme während der menschlichen Verdauung bewertet (digestible indispensable amino acid score, DIAAS; FAO 2013). So haben Proteine in Milchprodukten beispielsweise einen höheren DIAAS als solche aus eiweißreichen Pflanzen, wie zum Beispiel Soja. Vor allem für die wachsende Bevölkerung in Regionen mit Unter- und Mangelernährung verspricht diese neue Methode zielführendere Bewertungen für die ausreichende Versorgung mit Aminosäuren. Heute liefern in diesen Regionen die hochwertigen Proteine aus tierischen Nahrungsmitteln nach wie vor noch einen wichtigen Beitrag zur optimalen Ernährung. Da in den entwickelten Ländern hingegen keine Unter-, sondern bereits eine Überversorgung mit Proteinen die Regel ist (Westhoek et al. 2011), stellt ein Mangel an einzelnen Aminosäuren keinen Risikofaktor dar und die Bewertung tierischer Nahrungsmittel relativiert sich.

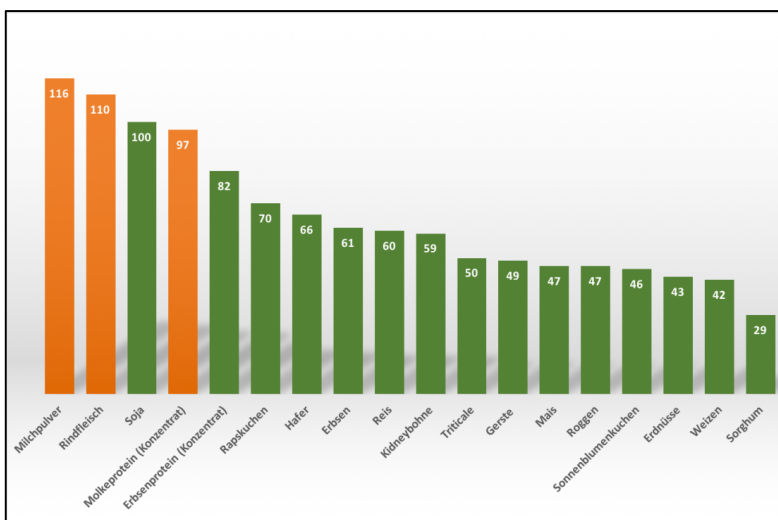


Abbildung 1: Biologische Wertigkeit (DIAAS in %) verschiedener tierischer (orange) und pflanzlicher (grün) Proteinquellen. (Daten aus Cervantes-Pahm et al. 2013; Rutherford et al. 2015; Ertl et al. 2016; teilweise wurden Mittelwerte gebildet)

Neben hochwertigen Proteinen dienen tierische Nahrungsmittel auch der Versorgung mit essentiellen Mineralstoffen und Spurenelementen. Fleisch, Milch und Eier enthalten viel Zink, an dem in Entwicklungsländern ein verbreiteter Mangel herrscht. Unter den pflanzlichen Quellen für Zink erreichen nur Nüsse und einige Hülsenfrüchte ähnlich hohe Werte (Brown et al. 2001). Tierische Nahrungsmittel sind weiterhin eine wichtige Quelle für Kalzium und Eisen (Givens 2005) sowie die Vitamine B₁₂, A und Folsäure (Pereira und Vicente 2013). Diese Eigenschaften machen tierische Nahrungsmittel zu einem sehr wertvollen Bestandteil der menschlichen Ernährung.

1.3. Die Bedeutung der Nutztierhaltung in der Bioökonomie

Die Nutztierhaltung beansprucht für die Fütterung und Haltung erhebliche natürliche Ressourcen und stellt im Gegenzug hochwertige Nahrung zur Verfügung. Damit trägt sie auch maßgeblich zur Lebensgrundlage vieler Menschen bei. Zur Fütterung werden hauptsächlich Mais und Gras eingesetzt, als Proteinquelle werden vorwiegend Soja und Fischmehl beigemischt. In **Deutschland** und anderen industrialisierten Ländern ist die moderne Nutztierhaltung zu einem hochproduktiven Wirtschaftszweig geworden, eng vernetzt mit den anderen Sektoren der Landwirtschaft und den ihr nachgelagerten, verarbeitenden Betrieben. Parallele, aufeinander abgestimmte Fortschritte in der Tierzucht, Tiermedizin, Tierhaltung und der Bereitstellung von Futtermitteln haben die Produktion weitgehend optimiert.

Tabelle 1: Anzahl der Nutztiere in Deutschland (Stand 2016; Quelle: Statistisches Bundesamt)

Tierart	Anzahl (in Millionen)
Rinder	12,5
Schweine	27,4
Schafe	1,6
Legehennen	40,4

Die Rolle von Nutztieren in der Bioökonomie geht dabei über die Bereitstellung von Nahrungsmitteln hinaus. Nutztiere liefern wertvolle Ausgangsstoffe für andere Bereiche der Bioökonomie und sind so mit deren Wertschöpfungsketten verknüpft. Neben Nahrungsmitteln erzeugt die Nutztierhaltung Leder, Horn und Wolle, welche synthetische, erdölbasierte Produkte wie etwa Kunstfasern ersetzen können. Die Nutztierhaltung liefert ferner nährstoffreichen organischen Dünger für die Landwirtschaft. Dieser hat bei sachgerechtem Einsatz einen positiven Einfluss auf die Bodenfruchtbarkeit und der Einsatz von mineralischen Düngern und deren energieaufwendige und emissionsstarke Herstellung kann gesenkt werden (WBA 2015). Gülle und andere energiehaltige Reststoffe können in Biogasanlagen Verwendung finden, die für viele Landwirte inzwischen einen wichtigen Teil zum Erwerb beitragen.

Die Nutztierhaltung nimmt zudem eine wichtige sozioökonomische Rolle ein, die sich global unterschiedlich gestaltet. Die Tierhaltung ist **weltweit** einer der am schnellsten wachsenden Bereiche der Landwirtschaft mit einer großen Wertschöpfung und vielen Beschäftigten. Sie macht 40% des **globalen** landwirtschaftlichen Bruttoinlandsproduktes aus und schafft Einkommen für 1,3 Milliarden Menschen (Steinfeld et al., 2006; Herrero et al. 2013). Insbesondere in Entwicklungsländern trägt die Produktion tierischer Nahrungsmittel zur Ernährungs- und Existenzsicherung bei und zwar direkt durch die Selbstversorgung mit hochwertigem Protein für die Ernährung der Menschen und indirekt durch die Erlöse aus dem Verkauf der Produkte und dem dadurch steigenden Wohlstand und verbesserten Bildungschancen (FAO 2011, Smith et al. 2013). Neben der Produktion von Nahrung spielt die Tierhaltung in vielen Ländern außerdem noch eine bedeutende Rolle im Transport (Nutzung als Arbeitstier) und bei der Erbringung bestimmter Ökosystemdienstleistungen¹ (insbesondere durch Grünlandnutzung; WBA 2015).

In **Deutschland** sind ca. 1,5 Millionen Menschen in der Tierhaltung im weiteren Sinne (Produktion und Verarbeitung) beschäftigt, sie generiert mehr als die Hälfte des Gesamteinkommens des deutschen Agrarsektors (Schwerin 2014). Wie auch in der Landwirtschaft insgesamt (für eine Übersicht siehe BÖR 2014a), gibt es in der Nutztierhaltung einen Trend zur regionalen Konzentration mit Ansiedelung von Unternehmen aus den vor- und nachgelagerten Branchen. Auch hat sich ein Strukturwandel in Richtung größerer Betriebe und Bestände

¹ Ökosystemdienstleistungen: Jegliche Form von Leistungen und Nutzen, die Ökosysteme für den Menschen erbringen.

vollzogen. Schon jetzt werden in den meisten Tierproduktionszweigen (vor allem bei Geflügel und Schwein) 70% bis 80% aller Tiere von den größten 20% bis 30% der Betriebe gehalten (WBA und WBW 2016). Im Jahr 2014 stieg die Fleischproduktion in Deutschland auf einen Wert von 8,2 Millionen Tonnen von ca. 750 Millionen Tieren (Fleischatlas 2014). Eine Übersicht der Anzahl unterschiedlicher Nutztiere in Deutschland gibt Tabelle 1. Bei fast allen bedeutenden Tierprodukten hat Deutschland bereits einen Selbstversorgungsgrad von über 100% erreicht (WBA und WBW 2016). Dieser Trend setzte sich auch 2016 fort (Statistisches Bundesamt 2016). Die Produktion tierischer Nahrungsmittel für den Export sorgt für eine teilweise Entkoppelung des inländischen Konsums von der Produktion. Tatsächlich steigt trotz leicht sinkender inländischer Nachfrage die Produktion tierischer Nahrungsmittel in Deutschland weiter an, was dem steigenden Export zuzuschreiben ist (Eyerund 2015).

1.4. Konsum und Nachfrage

Weltweit wird heute etwa ein Drittel der menschlichen Proteinzufuhr über tierische Produkte gedeckt (Steinfeld et al. 2006). Im Jahr 2014 wurden weltweit 315 Millionen Tonnen Fleisch produziert. Im globalen Schnitt standen damit theoretisch jeder Person 43,4 Kilogramm Fleisch zur Verfügung (FAO 2015), allerdings mit extremen Unterschieden in der tatsächlichen Versorgung vor allem zwischen Industrie- und Entwicklungsländern (Abbildung 2). Das globale Bevölkerungswachstum führt zudem zu einem parallelen Anstieg des Nahrungsbedarfs und damit des Bedarfs an tierischen Proteinen. Zu beobachten ist auch ein Zusammenhang zwischen Wohlstand und Fleischkonsum sowie eine steigende Nachfrage nach Fleisch in der wachsenden Mittelschicht der Wachstumsstaaten und der Schwellenländer (Wellesley et al. 2015; siehe Abbildung 2). Vor allem in China, Südostasien und Südamerika stieg der Konsum von Fleisch in den letzten Jahrzehnten stark an (Zhou et al. 2012; siehe Abbildung 3). In den meisten Industrienationen ist hingegen eine Sättigung eingetreten, in der Mehrzahl geht der Fleischkonsum sogar leicht zurück.

Prognosen gehen davon aus, dass sich die globale Nachfrage nach hochwertigem (tierischem) Protein bis 2050 nochmals um ca. 100% steigern wird (Boland et al. 2013). Experten schätzen, dass sich parallel auch die globale Fleischproduktion bis 2050 von 229 Millionen Tonnen (Vergleichsjahr 1999/2001) auf 465 Millionen Tonnen verdoppeln wird (Steinfeld et al. 2006).

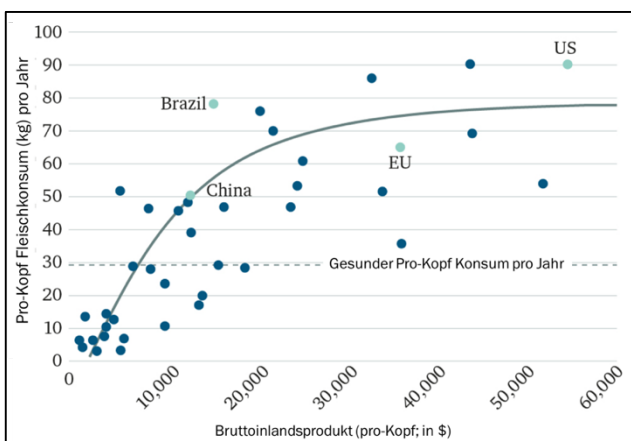


Abbildung 2: Der Zusammenhang zwischen dem Bruttosozialprodukt ausgewählter Länder und deren Fleischkonsum pro Kopf für 2014. Die gestrichelte Linie kennzeichnet das als „gesund“ empfohlene Niveau von Fleischkonsum (Wellesley et al. 2015; zusammengefasst sind der Konsum von Rind-, Schweine-, Schaf- und Hühnerfleisch. Basierend auf Daten von Stehfest et al. 2009, Worldbank 2014 und FAO 2009).

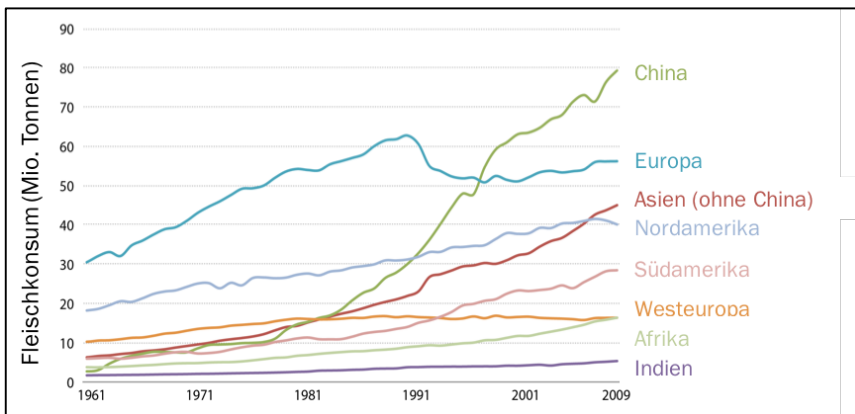


Abbildung 3: Trends des Fleischkonsums in verschiedenen Ländern und Regionen (UNEP 2012, basierend auf Daten von FAO 2012a)

In **Deutschland** empfiehlt die DGE, nicht mehr als 300 g bis 600 g Fleisch pro Woche zu verzehren (DGE 2016b). Auch wenn der Pro-Kopf-Konsum in Deutschland mit ca. 1,15 kg pro Woche (errechnet aus den Daten in BVDF 2015, siehe Abbildung 4) noch immer weit über dieser Empfehlung liegt, ist er seit 2005 deutlich gesunken. Dabei wird in Deutschland hauptsächlich Schweinefleisch (38,2 kg/Jahr), gefolgt von Geflügel (11,5 kg/Jahr) und Rindfleisch (8,9 kg/Jahr; Abbildung 4) verzehrt. In Deutschland liegt der Anteil von Vegetariern an der gesamten Bevölkerung bei etwa 4%, wobei der Anteil bei jüngeren Menschen und bei Frauen tendenziell höher liegt (Mensink et al. 2016). Auch konsumieren einkommensstärkere und besser ausgebildete Personen tendenziell weniger Fleisch als durchschnittliche Bundesbürger (WBA 2015; Mensink et al. 2016). Eine Mehrheit der in Deutschland Befragten gab im Rahmen einer Umfrage des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft an, am liebsten Fleischgerichte zu essen (53% der Befragten; BMEL 2017).

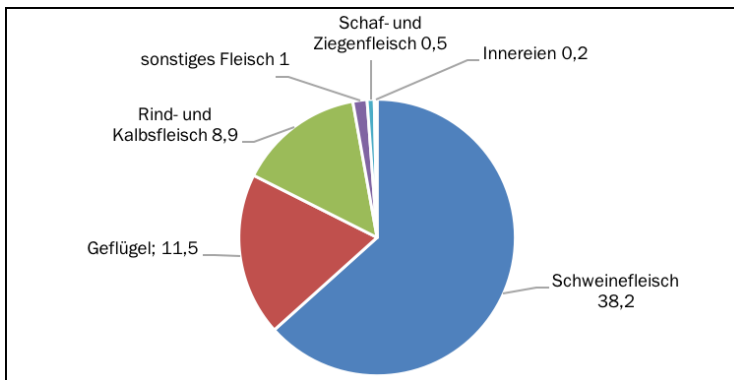


Abbildung 4: Pro-Kopf-Verzehr von Fleisch in Deutschland 2014 (in kg pro Jahr; nach BVDF 2015)

2. Einschätzung der Nachhaltigkeit der Ernährung mit tierischen Nahrungsmitteln

In Anlehnung an das Drei-Säulen-Modell der nachhaltigen Entwicklung² beschäftigt sich dieses Kapitel mit der ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit der Ernährung mit tierischen Nahrungsmitteln, wie sie heute und in näherer Zukunft global stattfindet. Ökonomische Nachhaltigkeit meint dabei eine Weise des Wirtschaftens, wie sie auf Dauer und ohne Einbußen für kommende Generationen durchgeführt werden kann. Ökologische Nachhaltigkeit ist dann erreicht, wenn dieses Wirtschaften die Natur nur in einem solchen Maße beansprucht, wie diese sich auch regenerieren kann. Soziale Nachhaltigkeit zielt auf Chancengleichheit, Gesundheit, Teilhabe und Existenzsicherung. Spannungen innerhalb der Gesellschaft sollen vermieden bzw. konstruktiv ausgetragen werden. Die drei Bereiche haben dabei große Schnittmengen und werden hier spezifisch für die Nutztierhaltung betrachtet. Die soziale Nachhaltigkeit wird insbesondere mit Blick auf die menschliche Gesundheit berücksichtigt, aber auch hinsichtlich der Einkommenschancen und Entwicklungsmöglichkeiten.

Bei der ökonomischen Nachhaltigkeit stehen die Effizienz der Produktion, die Preiserwartungen und Wirtschaftlichkeit im Fokus (2.1). Mit der Produktion einher gehen Rohstoffbedarf sowie Auswirkungen auf Böden und Wasser sowie negative Folgen für die Biodiversität, zusammengefasst als Auswirkungen auf Umwelt und natürliche Ressourcen (2.2). Diese erfordern eine kritische Betrachtung der ökologischen Nachhaltigkeit der Nutztierhaltung. Daran schließen Effekte auf das Klima durch Emissionen an, die zum Klimawandel beitragen (2.3) und sowohl ökologische, als auch soziale Implikationen haben. Im letzten Teil werden die Auswirkungen der Ernährung mit tierischen Produkten und der Nutztierhaltung auf die menschliche Gesundheit betrachtet (2.4).

Die Einschränkung der natürlichen Bedürfnisse von Tieren sowie die Bedrohung ihrer Unversehrtheit und Gesundheit durch nicht artgerechte Haltung stellen den unmittelbarsten negativen Effekt der Nutztierhaltung dar. Die Themen Tierwohl und gesellschaftliche Akzeptanz der modernen Nutztierhaltung wurden an anderer Stelle ausführlich behandelt und entsprechende Empfehlungen zu einer Verbesserung des Tierwohls wurden ausgesprochen (u. a. BÖR 2010, 2014a; WBA 2015). Auf diese Berichte sei hier verwiesen, im vorliegenden Papier wird dieser Bereich weitgehend ausgeklammert.

² Eine Beschreibung des Drei-Säulen-Modells der Nachhaltigkeit findet sich u. a. unter https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/1_3_a_drei_saeulen_modell_1531.htm

2.1. Effizienz und Wirtschaftlichkeit

Bewertet man die Produktion tierischer Nahrungsmittel hinsichtlich ihrer Effizienz, ist von besonderer Bedeutung, dass während der Mast biologisch bedingt pflanzliche Proteine nicht 1:1 in tierische Proteine umgesetzt werden. Stattdessen treten Verluste auf und es muss zum Teil ein Vielfaches an pflanzlichem Protein durch die Fütterung vorgelegt werden, um tierisches Protein zu erzeugen. Diese Veredlung genannte Umwandlung von pflanzlichem in tierisches Protein ist je nach Tierart und Produktionssystem unterschiedlich effizient. Im Vergleich der fleischlichen Proteinquellen hat die Produktion von Hühnerfleisch mit etwa 21% die höchste Protein-Konversionseffizienz (kg produziertes Protein pro kg Protein im Futtermittel), jene von Rindfleisch mit etwa 3% die geringste (Shepon et al. 2016; siehe Abbildung 5).

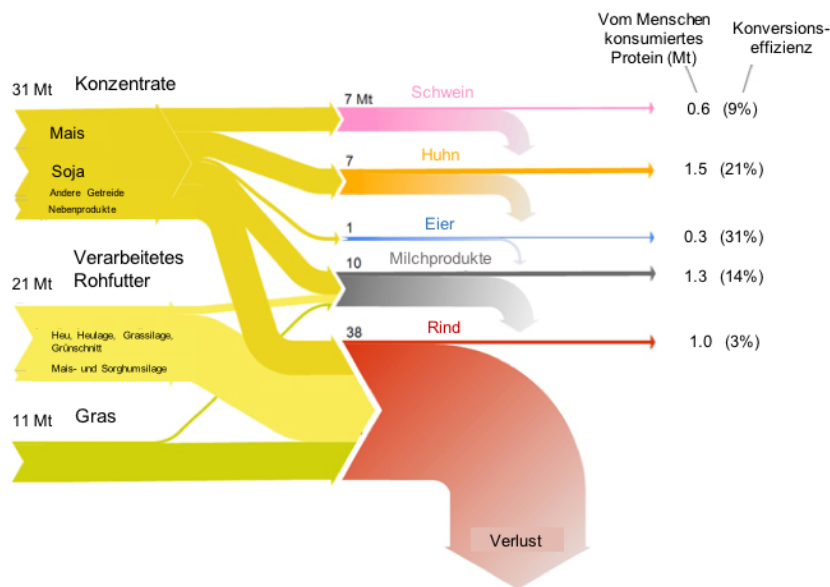


Abbildung 5: Massenströme in der Produktion tierischer Nahrungsmittel auf Proteinbasis und die Effizienz der Umwandlung von pflanzlichem in tierisches Protein (nach Shepon et al. 2016; auf die USA bezogen).

Die Produktion von Milch und Eiern hat mit 40% bzw. 30% eine höhere Effizienz als Fleisch, das heißt für die gleiche Menge Protein muss bei Milch und Eiern weniger pflanzliches Protein eingesetzt werden als bei Fleisch. Zusätzlich senken hohe Verluste in der Produktion, Verarbeitung und beim Konsum die Effizienz der Bereitstellung tierischer Nahrungsmittel (Abbildung 5). Eine aktuelle Studie zeigt auf, dass der Nutztiersektor innerhalb des gesamten Nahrungsmittelsystems die größten Verluste aufweist. Als Konsequenz wird die prognostizierte steigende Nachfrage nach tierischen Produkten die Effizienz des gesamten Systems weiter verringern (Alexander et al. 2017). Demnach betragen die Verluste auf der Basis von Protein etwa 82%, bezogen auf das eingesetzte Futter (einschließlich Gras) und die resultierende Menge essbarer tierischer Produkte. Zum Vergleich: die Verluste bei der Bereitstellung von Getreide von der Ernte bis zum Konsumenten betragen nur etwa 8%.

Durch diese geringere Effizienz der Bereitstellung tierischen Proteins ist auch der Verbrauch an Energie und der Ausstoß an CO₂ pro Einheit Protein hoch, verglichen mit der Produktion pflanzlicher Proteine. Der Energieeinsatz, der nötig ist, um Protein aus verschiedenen Quellen zu produzieren, liegt bei tierischen Proteinen um ein Vielfaches höher als bei pflanzlichen Proteinen (zum Beispiel zehnmal höher bei Produktion von Hühnerfleisch als von Erbsen). Noch größer wird der Unterschied, berechnet man die Effizienz der Proteinproduktion pro ausgestoßenem CO₂-Äquivalent (Tabelle 2; González et al. 2011).

Dieser relativen Ineffizienz bei der Umwandlung von pflanzlichem zu tierischem Protein im Vergleich zu einem direkten Verzehr pflanzlicher Lebensmittel steht die höhere biologische Wertigkeit tierischer Proteine für den Menschen gegenüber (siehe Abbildung 1). Außerdem sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass Wiederkäuer wie Kühe in der Lage sind, Proteinquellen wie Gras zu verwerten und in für den Menschen nutzbares Protein umzuwandeln. In Deutschland bestehen etwa 52% der 80 Millionen Tonnen des gesamten jährlichen Futtereinsatzes aus Gras und Grasprodukten (DVT 2017).

Tabelle 2: Proteingehalt verschiedener tierischer und pflanzlicher Nahrungsmittel sowie Energieverbrauch und Treibhausgas-Emissionen (THG) ihrer Produktion. Daraus ergibt sich die Effizienz der Proteinbereitstellung auf Basis des Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen (nach González et al. 2011).

Produktgruppe	Produkt	Proteingehalt (g/kg)	Energieverbrauch für die Proteinbereitstellung (MJ/kg)	THG (kg CO ₂ -Äq)	Energie-Effizienz der Proteinbereitstellung (g/MJ)	THG-Effizienz der Proteinbereitstellung (g/kg CO ₂ -Äq)
Fleisch	Rind	206	47	29	4,4	7,1
	Schaf und Ziege	193	46	26	4,2	7,6
	Schwein	206	28	8,2	7,3	25
	Huhn	188	27	4,7	7,0	39
	Fisch	207	40	3,1	5,1	67
Milchprodukte und Eier	Eier	126	14	3,0	9	42
	Milch	32	3,0	1,0	11	31
	Käse	249	38	8,8	6,5	28
Leguminosen	Bohne	210	5,1	0,86	41	246
	Erbse	245	3,5	0,49	70	495
	Sojabohne	365	4,8	0,72	77	505
	Ackerbohne	261	4,6	0,94	57	277
Getreide	Weizen	111	3,9	0,58	29	192
	Mais	94	4,8	0,67	19	141
	Hafer	169	3,0	0,47	57	359
	Gerste	111	2,7	0,60	41	187
	Roggen	103	2,1	0,36	48	283
	Reis	66	7,9	1,2	8,4	56
Gemüse	Kartoffel	17	1,8	0,19	9,4	89
	Beete	16	1,1	0,11	15	146
	Kürbis	10	1,0	0,09	10	106
	Tomate	9	3,4	0,30	2,6	27
	Tomate GH	9	77	5,3	0,1	1,7
	Gurke	7	0,8	0,08	7,7	84
	Gurke GH	7	38	1,7	0,2	3,9
	Karotte	9	1,4	0,12	6,9	81
	Zwiebel	11	1,0	0,1	10	116
	Salat	12	2,2	0,20	5,4	61
Obst	Brokkoli	28	3,6	0,37	7,7	75
	Apfel	3	3,6	0,28	0,7	9,2
	Orange	7	3,8	0,32	1,9	22
	Kirsche	11	4	0,35	2,7	31
	Erdbeere	7	4,1	0,38	1,6	18

GH = im Gewächshaus

Für die effiziente, moderne Mast ist die Beimischung proteinreichen Futters notwendig. Weltweit wird dazu zurzeit vor allem eiweißreiches Sojaschrot eingesetzt. Die Haupterzeugerländer für Soja sind die USA, Brasilien und Argentinien. Die steigende globale Nachfrage nach Fleisch und damit auch nach proteinreichem Futtermittel hat starke Auswirkungen auf die Produktionsmengen, die Anbauflächen und die Preise für Soja (IFPRI 2009; Naylor et al. 2005; USDA 2016). In Deutschland machen importierte Futtermittel einen Anteil von etwa 12% an der gesamten Tierfuttermenge aus, ein Großteil davon ist Soja (DVT 2017).

2.2. Auswirkungen auf die Umwelt und natürliche Ressourcen

Die enorme Steigerung von landwirtschaftlichen Erträgen im Laufe der letzten hundert Jahre ging auch zu Lasten der Umwelt und der wichtigsten natürlichen Ressourcen wie Boden, Wasser und Biodiversität (Tilman et al. 2002). Die Nutztierwirtschaft ist global gesehen bei weitem der größte Nutzer landwirtschaftlicher Flächen. Die hohe Flächennutzung hängt vor allem mit der für die Futtermittelproduktion nötigen Anbaufläche zusammen. So werden 33% der **weltweiten** Fläche und 70% der landwirtschaftlich genutzten Fläche für die Tierproduktion verwendet (Steinfeld et al. 2006). Dies gilt auch für **Deutschland** (BMEL 2014). Dabei steht der Anbau von Futtermitteln in Konkurrenz zum Anbau von Pflanzen für den direkten Verzehr. Der Flächen-Fußabdruck der Produktion tierischer Nahrungsmittel schwankt je nach Tierart und Produkt und ist mit Abstand am höchsten für die Produktion von Rindfleisch (De Vries und De Boer 2010). Wiederkäuer wie Rinder können jedoch, im Gegensatz zu anderen Nutztierarten und Menschen, Gras verdauen und in hochwertiges Protein umwandeln. Zusätzlich spielt Grasland eine wichtige Rolle bei der Speicherung von CO₂ (Soussana et al. 2010). Dies zeigt, dass einzelne Faktoren in einer globalen Analyse des Umweltfußabdruckes verschiedener Produktionsarten differenziert betrachtet werden können bzw. müssen.

Weltweit ist bereits ungefähr ein Drittel des fruchtbaren Bodens durch Erosion, Versalzung, Überflutung, chemische Verschmutzung und Verlust von organischem Material oder Verdichtung (Greenland et al. 1998; Trevas 2002; FAO und ITPS 2015) geschädigt oder gefährdet. Diese Böden gelten als bereits degradiert (Abbildung 6) und etwa drei Milliarden Menschen leben in Gebieten mit solchen Böden. Die daraus resultierenden wirtschaftlichen Schäden werden auf etwa 300 Milliarden US-Dollar pro Jahr beziffert (Nkonya et al. 2015). Für die Landwirtschaft stellt Bodenerosion durch Wasser ein besonders großes Problem dar. Etwa 23 bis 42 Megatonnen Stickstoff und 14,6 bis 26,4 Megatonnen Phosphor werden jährlich von Feldern gewaschen und müssen durch Düngung ersetzt werden (FAO und ITPS 2015). Auf längere Sicht ist vor allem auch der Verlust der wertvollen oberen Erdschichten problematisch. Umgekehrt trägt vor allem die Ausweitung der intensivierten Landwirtschaft, auch für den Anbau von immer mehr Futterpflanzen, maßgeblich zur Degradation von Böden bei. Dazu zählt u. a. tiefes Pflügen, Maßnahmen, die die Erosion begünstigen und zu kurze Fruchtfolgen, womit den Böden zu viele Nährstoffe entzogen werden. Hinzu kommen in vielen Ländern ein unkontrollierter oder unabsichtlicher Eintrag von Nährstoffen (vor allem Nitrat) und von den in intensiven Mastbetrieben verwendeten Antibiotika und Hormonen über ausgebrachte Gülle (FAO und ITPS 2015). Die Degradation von Böden hat negative Auswirkungen auf Ertrag und Ernährungssicherung (Lal 2009). Eine nicht nachhaltige Landwirtschaft entzieht sich also die eigenen Grundlagen.

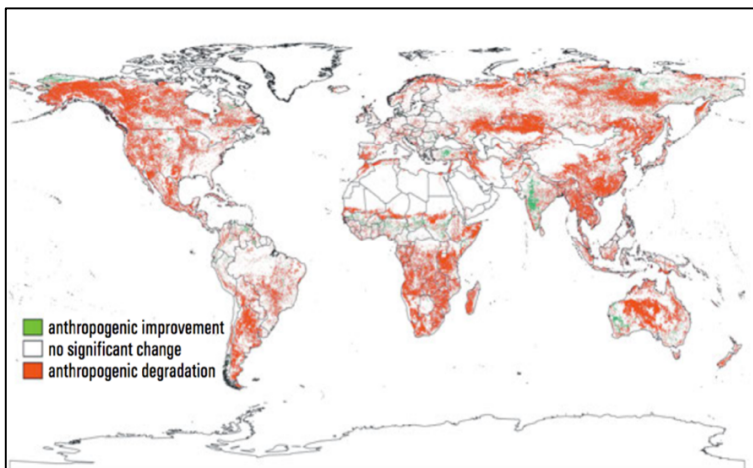


Abbildung 6: Weltweite Degradation (orange) und Verbesserung (grün) von Böden durch den Menschen (Von Braun 2015, nach Le et al. 2014, Kartografie von Oliver Kirui, ZEF, Universität Bonn).

In Deutschland definiert die Düngeverordnung „die gute fachliche Praxis der Düngung“ und gibt vor, wie die mit der Düngung verbundenen Risiken zu minimieren sind. Sie ist wesentlicher Bestandteil des nationalen Aktionsprogramms zur Umsetzung der EU-Nitratrichtlinie, um die Stickstoffeinträge in die Umwelt zu verringern (UBA 2017).

Die intensivierte Landwirtschaft und industrielle Tierhaltung stellen zudem eine ernste Bedrohung für die Biodiversität dar (Cafaro et al. 2006). Wirtschaftsflächen wurden vergrößert und natürliche Landschaftselemente wie Gehölze und kleine Gewässer wurden größtenteils entfernt. Dies führt zu einer Verdrängung wertvoller Habitate, wie zum Beispiel auch bei der Rodung von Wäldern und Trockenlegung von Mooren. Zusätzlich sorgt die Fragmentierung der Landschaft dafür, dass noch erhaltene natürliche Landschaftselemente und damit die Lebensräume vieler Tier- und Pflanzenarten nicht mehr eng miteinander verbunden sind. Auch die Ausweitung großer Monokulturen wirkt sich negativ auf die natürliche Biodiversität aus (UBA 2015). Inzwischen weiß man, dass die Biodiversität eine wichtige Rolle für die Widerstandsfähigkeit der Landwirtschaft gegen Ertragsverluste durch Schädlinge und extreme Wetterereignisse spielt (Tscharntke et al. 2012). Vor allem Bestäuber (zum Beispiel Honigbienen) und Vögel, aber auch die zahlreichen Bodenorganismen sind hier von besonderer Bedeutung. Anlässlich des Biodiversitätsgipfels in Cancún, Mexiko, bekräftigten die Vertragsstaaten ihr Ziel, Subventionen für die Nutztierhaltung und Landwirtschaft mit negativen Auswirkungen für die biologische Vielfalt abzubauen³.

Die Produktion tierischer Nahrungsmittel ist auch gekennzeichnet durch einen hohen Wasserverbrauch. Über 8% des **weltweit** zur Verfügung stehenden Süßwassers werden für die Nutztierhaltung eingesetzt, vor allem für die Bewässerung von Futterpflanzen (Steinfeld et al. 2006) und mit etwa 30% für die Erzeugung tierischer Produkte insgesamt. Davon ist wiederum etwa ein Drittel der Produktion von Rindfleisch zuzuschreiben (Mekonnen und Hoekstra 2012). Obwohl sich Produktionssysteme weltweit sehr in ihrem Wasser-Fußabdruck unterscheiden (Ridoutt et al. 2012), ist der Wasserverbrauch pro Einheit Protein in der tierischen Produktion um ein Vielfaches höher, als in der pflanzlichen (Mekonnen und Hoekstra 2012, Tabelle 3). Folglich gehören tierische Nahrungsmittel zu den Konsumgütern mit dem höchsten virtuellen Wasserverbrauch⁴ (Hoekstra und Chapagain 2007; Tabelle 4).

³ Agrar-Europe. „Zum Biodiversität-Gipfel Ziel des Abbaus naturschädlicher Subventionen bekräftigt“. 6.12.2016. Verfügbar unter: <http://www.agrar-europe.de/premium-bereich/nachrichten/zum-biodiversitaet-gipfel-ziel-des-abbaus-naturschaedlicher-subventionen-bekraeftigt.html> [24.03.2017]

⁴ Für eine Übersicht siehe auch www.waterfootprint.org

Tabelle 3: Wasser-Fußabdruck pro produziertem Protein verschiedener tierischer und pflanzlicher Produkte (Mekonnen und Hoekstra 2012).

Produkt	Wasserverbrauch pro produziertem Protein (l/g)
Rindfleisch	112
Schwein	57
Huhn	34
Milch	31
Eier	29
Getreide	21
Hülsenfrüchte	19
Ölpflanzen	16

Tabelle 4: Durchschnittlicher virtueller Wassergehalt ausgewählter Nahrungsmittel (nach Hoekstra und Chapagain 2007; tierische Produkte sind hervorgehoben).

Produkt	Virtueller Wassergehalt in Liter
Hamburger (150 g)	2.400
Glas Milch (200 ml)	200
Glas Apfelsaft (200 ml)	190
Tüte Kartoffelchips (200 g)	185
Glas Orangensaft (200 ml)	170
Tasse Kaffee (125 ml)	140
Ei (40 g)	135
Glas Wein (125 ml)	120
Scheibe Brot (30 g) mit Käse (10 g)	90
Glas Bier (250 ml)	75
Apfel (100 g)	70
Orange (100 g)	50
Scheibe Brot (30 g)	40
Tasse Tee (250 ml)	35
Kartoffel (100 g)	25
Tomate (70 g)	13

Neben dem Verbrauch von Wasser stellt die Produktion tierischer Produkte auch eine potentielle Gefahr für die Wasserqualität dar. Überschüssige Nährstoffe aus der Viehhaltung und dem Anbau von Futtermitteln gelangen in das Grundwasser und in natürliche Ökosysteme. Etwa ein Drittel der landwirtschaftlichen Stickstoff- und Phosphoreinträge sind auf die Nutztierhaltung zurückzuführen (Steinfeld et al. 2006). Erhöhte Nitratwerte im Trinkwasser stellen eine Gefährdung der öffentlichen Gesundheit dar und stellen die Politik vor – nach Ansicht vieler Experten verspäteten – Handlungsbedarf⁵.

Für den Anbau von Futterpflanzen werden außerdem wertvolle mineralische Dünger verbraucht. Bedenklich ist hier vor allem der Verbrauch von Phosphor, dessen natürliche, mineralische Vorkommen bei einer Beibehaltung heutiger Nutzungsmengen in etwa 50 bis 100 Jahren versiegen könnten (Cordell et al. 2009).

⁵ Siehe u. a.: NDR. „Gülle im Glas – Grundwasser immer stärker mit Nitrat belastet.“ Claudia Plaß, 16. September 2016. Verfügbar unter <http://www.tagesschau.de/in-land/nitrat-grundwasser-101.html> [27.03.2017]

2.3. Klimawandel

Weltweit trägt die Landwirtschaft rund 15% zu den vom Menschen verursachten Treibhausgasen bei (Abbildung 7). In **Deutschland** war die Agrarwirtschaft 2014 für die Emission von ca. 66 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten verantwortlich, was 7,3% der gesamten Treibhausgas-Emissionen entspricht (UBA 2016). Die Nutztierhaltung ist innerhalb der Landwirtschaft für den Großteil der Treibhausgase verantwortlich (Gerber et al. 2013). Dabei handelt es sich vorrangig um die Emissionen von Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O), welche weitaus klimaschädlicher sind als CO₂ (Abbildung 7). Durch N₂O-Emissionen und den Eintrag von überschüssigem Nitrat aus Düngemitteln in die Umwelt trägt die Produktion tierischer Nahrungsmittel maßgeblich zum globalen Ungleichgewicht des Stickstoffkreislaufs bei (Townsend und Howarth 2010). Bei Wiederkäuern machen die bei der Verdauung entstehenden Gase (enterogene Fermentation; vor allem CH₄) den größten Anteil an den gesamten klimaschädlichen Emissionen aus (Abbildung 8), gefolgt von Stickstoffemissionen durch die Düngung des Ackerbodens. Bei Schweinen machen Emissionen, die durch Düngung entstehen, den größten Anteil aus. Insgesamt sind die Emissionen aus der Produktion von Rindfleisch und Milch mehr als doppelt so hoch, wie jene aus der Produktion von Schweinefleisch und ein Vielfaches höher, als jene aus der Produktion von Hühnerfleisch und Eiern. Werden die Emissionen auf die Menge des produzierten Proteins bezogen, liegen Schweine- und Hühnerproduktion etwa gleich hoch, während Rindfleisch weiterhin sehr viel höhere Emissionen verursacht (De Vries und De Boer 2010). Dies hängt vor allem mit der niedrigen Protein-Konversionsrate (Abbildung 5) und dem Ausstoß des besonders klimaschädlichen Methans während der Verdauung beim Wiederkäuer zusammen (Bryngelsson et al. 2016).

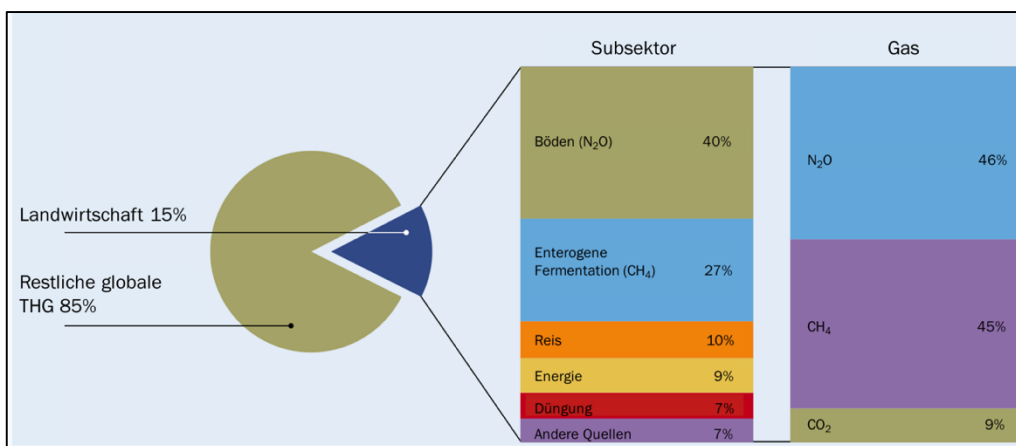


Abbildung 7: Anteil der Landwirtschaft an den globalen Treibhausgas-Emissionen (THG) und die Anteile ihrer einzelnen Sektoren. Die meisten klimaschädlichen Gase entstehen durch die Düngung von Böden und bei der Verdauung von Wiederkäuern (UNEP 2012).

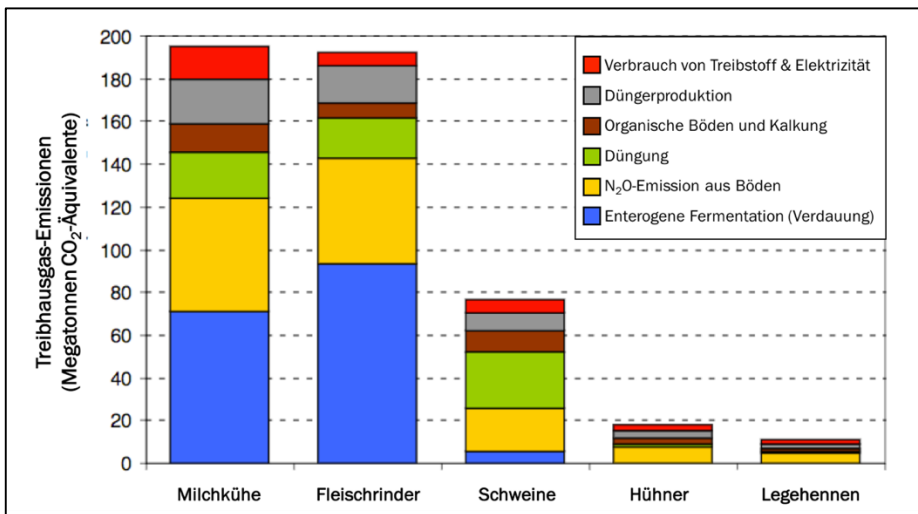


Abbildung 8: Treibhausgas-Emissionen aus den einzelnen Emissionsquellen verschiedener Systeme zur Produktion tierischer Nahrungsmittel in den EU-27 Staaten (Lesschen et al. 2011).

Um die internationalen Klimaschutzziele zu erreichen, plant die Bundesregierung die Emissionen von Treibhausgasen bis 2020 um 40% im Vergleich zu 1990 zu senken. Dazu soll auch eine starke Verringerung der Emissionen aus der Landwirtschaft beitragen. Von 1990 bis 2013 sind die Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft bereits um 19% zurückgegangen und stabilisieren sich Prognosen zufolge dank der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen bei ca. 66 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten, was einer Reduktion von über 20% gegenüber 1990 entspricht (BMUB 2015). Diese Reduktion resultiert vor allem aus den Maßnahmen der gemeinsamen EU-Agrarpolitik. Dazu zählen höhere Umweltauflagen, ein verbessertes Düngemittelmanagement und eine Anpassung von Viehdichten an Standorteigenschaften. Eine höhere Stickstoffeffizienz, eine Ausweitung des Ökolandbaus und eine Erhaltung von Dauergrünland als CO₂-Senken sind weitere Minderungsoptionen (BMUB 2015). Trotz dieser Bemühungen und zu verzeichnender Erfolge durch technologischen Fortschritt wird eine weitere Reduktion der Methan- und Lachgasemissionen aus der Tierhaltung über 20% hinaus kaum möglich sein, wenn nicht der Konsum tierischer Nahrungsmittel und damit die Produktion insgesamt zurückgehen (McMichael et al. 2007). Dennoch müssen die Auswirkungen verschiedener Systeme der Nutztierhaltung differenziert betrachtet werden. Wo die Tierhaltung zum Beispiel einen Umbruch von Grünland in ackerbaulich genutztes Land verhindert, trägt sie auch zum Klimaschutz bei.

Neben der Emission klimaschädlicher Treibhausgase hat die Produktion tierischer Nahrungsmittel weitere, indirekte Auswirkungen auf das Klima. Insbesondere steht die Umwandlung von Waldflächen in landwirtschaftlicher Nutzfläche in der Kritik. Für die Nutztierhaltung trifft dies vor allem auf die Regenwälder Südamerikas zu, die für den Anbau von Soja gerodet werden (Fearnside 2001; Grau und Aide 2008). Die Rodung der Regenwälder, oft durch Niederbrennen, sorgt direkt für CO₂-Emissionen und zerstört außerdem eine wichtige globale CO₂-Senke.

2.4. Menschliche Gesundheit

Wie in Kapitel 1.2. ausgeführt, sind Proteine und insbesondere die essentiellen Aminosäuren wichtiger Bestandteil der menschlichen Ernährung. Tierische Nahrungsmittel decken den Bedarf an essentiellen Aminosäuren sehr effizient ab und tragen bei maßvollem Verzehr zu einer gesunden Ernährungsweise bei. Übermäßiger Konsum tierischer Produkte – vor allem von rotem Fleisch – ist jedoch mit einem erhöhten Risiko für Dickdarmkrebs, Typ 2-Diabetes (Song et al. 2004) und Arteriosklerose (Koeth et al. 2013) assoziiert. Die Bildung von Nierensteinen wird ebenfalls mit hohem Verzehr an tierischem Protein in Verbindung gebracht (Breslau et al. 1988; Giovannucci et al. 1994; Bouvard et al. 2015). Zwar können nicht alle Studien eine enge Korrelation zwischen dem Konsum von rotem Fleisch und verarbeiteten Fleischprodukten auf Arteriosklerose und Diabetes belegen (Micha et al. 2010), doch weist die Mehrheit auf einen Zusammenhang zwischen dem übermäßigen Verzehr tierischer Nahrungsmittel und einer Zahl von Erkrankungen sowie der Gesamtmortalität hin (Larsson und Orsini 2013). In den letzten Jahren wurde deutlich, dass sich die Ernährungsweise – ob dominiert durch pflanzliche Kost oder mit substanziellem Anteil tierischer Produkte – auch auf das intestinale Mikrobiom (die Gesamtheit der Bakterien im Dickdarm) des Menschen auswirkt (David et al. 2014). So kann eine faserreiche Nahrung von bestimmten Bakterien im Darm als Nährstoffquelle genutzt werden und lässt diese Stoffe produzieren (wie Buttersäure), die u. a. entzündungshemmend wirken und damit das Risiko für Darmkrebs senken können. Umgekehrt verstoffwechseln Darmbakterien bestimmte Verbindungen in rotem Fleisch und Fisch zu Stoffen, die mit der Entstehung von Darmkrebs und anderen Erkrankungen in Verbindung gebracht werden (Irrazábal et al. 2014; O’Keefe 2016).

Ein weiteres besonderes Risiko der Nutzung tierischer Lebensmittel stellt die Übertragung von Krankheiten von Tieren auf Menschen dar, die sog. Zoonosen (BfR 2012). Neben Anstrengungen zur Vermeidung von Zoonosen durch Hygienemaßnahmen werden in der intensiven Tierproduktion häufig Antibiotika zur Behandlung und Vorbeugung eingesetzt. Deren übermäßiger und unsachgemäßer Gebrauch führt zu immer mehr antibiotikaresistenten bakteriellen Erregern (EFSA 2014). Laut jüngsten Berichten der FAO stellt die Ausbreitung von solchen Antibiotikaresistenzen bei pathogenen Bakterien **weltweit** eine der größten Gefahren für die menschliche und tierische Gesundheit dar (FAO 2016b). Etwa zwei Drittel des zukünftigen Einsatzes von Antibiotika werden im Lebensmittelsektor und vor allem in der Produktion tierischer Lebensmittel erwartet (Van Boeckel et al. 2015). Der immer engere Kontakt zwischen Tieren in Großanlagen erfordert einen vermehrten Einsatz von Antibiotika, um Ansteckungen zu vermeiden. Auch ist zu erwarten, dass der internationale Handel und der damit einhergehende globale Austausch von Lebensmitteln die Ausbreitung antibiotikaresistenter Keime begünstigen wird. Wie schnell eine solche Ausbreitung geschehen kann, zeigt das aktuelle Beispiel einer bakteriellen Resistenz gegen das Antibiotikum Colistin (Skov und Monnet 2016). In kurzer Zeit hat die Resistenz sich über fast alle Kontinente ausgebreitet, wurde in Bakterien bei Nutztieren, aus Wasserproben aus Flüssen, aus Fleisch, Gemüse und in menschlichen Patienten nachgewiesen. Unter dem „One-Health“-Ansatz sollen zukünftig die Gesundheit von Mensch, Tier und Umwelt nicht mehr getrennt, sondern ganzheitlich betrachtet werden, um Epidemien mit resistenten Mikroorganismen besser vorzubeugen (Gibbs 2014).

3. Definition des Proteinproblems

Im Zusammenhang mit der steigenden globalen Nachfrage nach tierischen Produkten wird in der EU und anderen importierenden Ländern oft von der Proteinelücke (*protein gap*) gesprochen, die einen gewissen Preisdruck bzw. eine Verknappung der verfügbaren Futtermittel auslösen dürfte. Das hier beschriebene Proteinproblem geht jedoch über diese ökonomische Dimension hinaus. Im Spannungsfeld der weltweit wachsenden Nachfrage nach tierischen Proteinquellen und den gleichzeitig zunehmenden negativen Auswirkungen durch deren Produktion und Konsum (2.2–2.4) entsteht ein Zielkonflikt in Form eines globalen *Proteinproblems*.

Um eine weiter steigende Nachfrage nach tierischen Nahrungsmitteln mit den bestehenden Ansätzen zu stillen, müssen entweder die Anbauflächen erweitert oder die Produktivität pro Fläche erhöht werden. Ersteres ist ohne erhebliche ökologische Schäden kaum noch möglich, zu Letzterem können Maßnahmen zur Optimierung der Produktion (wie die weiter verbesserte Anpassung der Fütterung), Fortschritte in der Zucht und der standortgerechten Auswahl der Tierart beitragen. Alternativen zu einer Steigerung der derzeitigen Produktion sind ein nachhaltigerer Konsum und die Bereitstellung alternativer, effizienterer Proteinquellen mit ausreichend hoher Wertigkeit.

Ein wichtiger Schritt für eine konkretere Definition des Proteinproblems und die Suche nach geeigneten Lösungsansätzen ist eine Internalisierung aller externen Kosten der Produktion von Protein aus verschiedenen Quellen. Auswirkungen auf Umwelt, Klima und menschliche Gesundheit der gesamten Produktionskette müssen dafür als Kosten anerkannt und quantifiziert werden.

4. Ansätze zur Lösung des Proteinproblems

Verschiedene Ansätze für die Lösung des globalen Proteinproblems werden diskutiert. Dieses Kapitel soll einen Überblick hierzu liefern. An erster Stelle steht eine Reduktion des übermäßigen Konsums tierischer Nahrungsmittel in Industrie- und Schwellenländern (4.1). Ein weiterer Themenbereich ist der Ersatz von tierischen Nahrungsmitteln durch verschiedenste alternative Proteinquellen (4.2). Unter diesen finden sich sowohl seit langem bekannte pflanzliche Nahrungsquellen mit hohem Proteingehalt als auch in westlichen Ländern bisher kaum oder gar nicht genutzte Proteinquellen wie Insekten und Algen. In der dritten Kategorie werden Ansätze zur Optimierung der bestehenden Produktion tierischer Lebensmittel zusammengefasst (4.3).

4.1. Reduktion des Konsums tierischer Nahrungsmittel in Industrieländern

Mehrere kürzlich veröffentlichte Studien und Berichte benennen die Reduktion des Konsums tierischer Nahrungsmittel in den Industrieländern als wichtigen Schritt zur Minderung der Auswirkungen auf Umwelt, Klima, menschliche Gesundheit und Tierwohl. Das vorliegende Papier wird hier deshalb nur kurz und anhand einiger neuer Zahlen und Fakten auf diesen Ansatz eingehen.

Ein **weltweiter** Konsum tierischer Nahrungsmittel auf dem Niveau des jetzigen OECD-Durchschnitts ist nicht nachhaltig und die jetzige Form und das Ausmaß der industriellen Tierproduktion werden allgemein als nicht zukunftsfähig bewertet (WBA und WBW 2016). Eine aktuelle Studie zeigt zum Beispiel, dass die Verschwendung im Ernährungssystem durch übermäßigen Konsum mindestens ebenso groß ist wie jene durch weggeworfene Nahrungsmittel (Alexander et al. 2017). Eine Reduktion des Konsums auf ein empfohlenes, „gesundes“ Maß könnte die für 2050 prognostizierte landwirtschaftlich genutzte Fläche weltweit um 25% senken. Dadurch könnte u. a. auch der Verlust von Biodiversität signifikant verringert werden, vorausgesetzt, dass ungenutzte Flächen renaturiert würden (ten Brink et al. 2010). Hierzu ist nicht zwingend der vollständige Verzicht auf tierische Nahrungsmittel (Veganismus) nötig. Ein Verzicht auf Fleisch (Vegetarismus) oder eine Reduktion

des Fleischkonsums durch den Konsum pflanzlicher und alternativer Proteinquellen (Flexitarismus) hätte bereits deutlich positive Auswirkungen (Forum for the Future 2016; Mensink et al. 2016).

Zu bedenken ist zwar, dass eine Reduktion des Konsums in Ländern mit industrialisierter Tierproduktion zunächst wahrscheinlich nicht zu einer proportional geringeren Produktion führen wird, da steigende Exporte in Schwellenländer die sinkende Nachfrage im Inland teilweise ausgleichen würden (Wolf et al. 2011). Dennoch stellen ein reduzierter Konsum und eine Umstellung der Kost den größten Hebel dar, um die negativen Auswirkungen der Tierproduktion (2.2–2.4) in ihrer Gesamtheit zu mindern (Stehfest et al. 2009; Bellarby et al. 2013). In **Deutschland** könnte eine Reduktion des Konsums, auf das von der DGE empfohlene Niveau, die Emission von Treibhausgasen um 22 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr verringern (WBA und WBW 2016). Vor allem eine Reduktion der Emissionen von Methan (bei der Verdauung im Rind entstehend) und Lachgas (durch das Ausbringen von Wirtschaftsdünger) sind für das Erreichen der Klimaziele bis 2050 nötig (Bryngelsson et al. 2016). Der Ersatz tierischer durch pflanzliche Proteinquellen für die Ernährung könnte weiterhin den Wasserverbrauch der Ernährung um ca. 30% senken (Mekonnen und Hoekstra 2012).

Eine Reduktion des Konsums in den Industrieländern könnte auch eine positive Signalwirkung für Entwicklungs- und Schwellenländer haben und als Orientierung für einen geringeren Konsum trotz steigenden Einkommens dienen (McMichael et al. 2007).

Tabelle 6: Gegenüberstellung des theoretischen globalen Bedarfs an verschiedenen Nahrungsmitteln, wenn alle Menschen einer gesundheitlich optimalen („minimum risk“) Ernährung folgen würden, mit der momentanen globalen Verfügbarkeit dieser Nahrungsmittel (FAO 2016d, nach Murray 2014).

Produkt	Globaler optimaler Bedarf (in Megatonnen)	Globale Verfügbarkeit (in Megatonnen)	Verfügbarkeit in % des Bedarfs
Fisch	83	123	148 %
Obst	746	483	66 %
Milch	1.119	573	51 %
Nüsse und Samen	41	17	42 %
Rotes Fleisch	36	202	568 %
Gemüse	995	874	89 %
Getreide	311	480	154 %

Ernährungsgewohnheiten werden maßgeblich durch die „Ernährungsumwelt“ der Menschen bestimmt (food environment; FAO 2016b). Gemeint sind zeitliche und örtliche Verfügbarkeit sowie Kosten verschiedener Nahrungsmittel. Denn die Auswahl und der Konsum bestimmter Arten von Nahrungsmitteln hängen davon ab, wie verfügbar, preiswert, zweckmäßig und begehrt diese sind (Herforth und Ahmed 2015). Aber auch soziale und kulturelle Aspekte der Umwelt beeinflussen, wie Vorzüge in der Ernährung erlernt, ausgedrückt und überdacht werden (Hawkes et al. 2015). Politische Rahmenbedingungen können auf diese Ernährungsumwelt positiv einwirken, um ungesunden Ernährungsweisen und ressourcenintensivem Konsum entgegenzuwirken (BÖR 2015; FAO 2016b). Dazu gehört u. a., eine Umwelt zu schaffen, in der eine gesundheitsförderliche Ernährungsweise erlernt und praktiziert werden kann. Stellt man den theoretischen Bedarf an verschiedenen Nahrungsmitteln bei einer empfohlenen, gesundheitsförderlichen Ernährung der tatsächlichen Verfügbarkeit gegenüber, zeigen sich zum Teil enorme Diskrepanzen (Tabelle 6). Während ein Überangebot an Fleisch, Fisch und Getreide herrscht, sind Gemüse und Obst in diesem Szenario nicht in ausreichendem Maße verfügbar. Da die Produktion jedoch auch maßgeblich durch Nachfrage bestimmt wird (vor allem in Industrieländern) ist es wichtig, ein Bewusstsein dafür zu schaffen, ungesunde Vorzüge im Moment des Kaufes zu überdenken (Hawkes et al. 2015). Studien legen nahe, dass politische Anreize, den Konsum von Fleisch zu reduzieren, auf weniger

Widerstand in der Bevölkerung stoßen könnten, als häufig befürchtet (Wellesley et al. 2015). Zum Forschungsbedarf und entsprechenden Empfehlungen zur Forschungsförderung sei hier auf das Förderkonzept des Bioökonomierates „Lebensmittelkonsum, Ernährung und Gesundheit“ verwiesen (BÖR 2014c).

4.2. Alternativen zu herkömmlichen tierischen Nahrungsmitteln als Proteinquelle

Da der Konsum von Protein (aus tierischen oder pflanzlichen Quellen) in der EU 70% über dem von der WHO empfohlenen Optimum liegt (Westhoek et al. 2011), macht eine Reduktion des Konsums tierischer Lebensmittel aus ernährungsphysiologischer Sicht nicht unbedingt den Ersatz tierischer Proteine durch Alternativen erforderlich. Neue Proteinquellen für die menschliche Ernährung werden jedoch dann wichtig, wenn der Konsum tierischer Nahrungsmittel z. B. aus gesundheitlichen oder umweltpolitischen Erwägungen noch unter das empfohlene Optimum gesenkt werden soll (Bellarby et al. 2013). Die Nachhaltigkeit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit dieser Alternativen sind stark abhängig von klimatischen, ökonomischen, technologischen und sozialen Faktoren sowie der Verfügbarkeit von Rohstoffen und daher standortspezifische Größen. Dies ist vor allem auch zu beachten, wenn adäquate Lösungen für Entwicklungsländer zu entwickeln sind.

Alle alternativen Proteinquellen sind, in unterschiedlichem Ausmaß, sowohl für die direkte Ernährung des Menschen als auch für die Tierfütterung geeignet. Hier sollen zunächst die für den direkten Konsum dienlichen Proteinquellen behandelt werden.

Pflanzliche Alternativen

Obwohl die biologische Wertigkeit der Mehrzahl pflanzlicher Proteine geringer ist, als die von Proteinen tierischer Herkunft (Abbildung 1), kann eine Ernährung aus pflanzlichen Quellen durchaus zu einer ausgewogenen Aufnahme von Aminosäuren führen. Dies gilt insbesondere in entwickelten Märkten mit einem schier unbegrenzten und breiten Angebot an pflanzlichen Lebensmitteln. Bisher wurden aber häufig gerade jene Gruppen von Nutzpflanzen, die sich durch einen hochwertigeren Proteingehalt auszeichnen sowohl in der Produktion als auch auf der Nachfrageseite vernachlässigt (Abbildung 9). Die mit Abstand meistangebauten Nutzpflanzen weltweit sind Reis, Mais und Weizen, also Getreidegräser mit von Natur aus niedrigem Proteingehalt und eher geringer biologischer Wertigkeit. Hinzu kommt, dass die Pflanzenzüchtung in den letzten Jahrzehnten vor allem einen hohen Gehalt an Kohlenhydraten zum Ziel hatte und nicht eine hohe Qualität durch optimale Protein- und Nährstoffzusammensetzung (Sands et al. 2009). Dies hat die adäquate Versorgung großer Teile der Weltbevölkerung mit Kalorien ermöglicht, gleichzeitig jedoch eine kohlenhydratreiche, sonst aber eher nährstoffarme (Fehl)-Ernährung gefördert. Neben Ertragssteigerung und höherer Effizienz (siehe auch BÖR 2014b) stehen bei Züchtungsprogrammen inzwischen jedoch auch Proteinqualität und Nährstoffgehalte wieder im Fokus, da dies allgemein anerkannte Schlüsselparameter für eine gesündere Ernährung sind (Sands et al. 2009). Züchtungsziel könnte daher eine für den Menschen optimierte Aminosäure-Zusammensetzung pflanzlicher Proteine sein (Zhao und Shewry 2011). Hier können alte Sorten und wilde Verwandte von Getreiden als Ressourcen genetischer Vielfalt mit häufig vorteilhaften Eigenschaften beim Nährstoffgehalt eine wichtige Rolle spielen (Chatzav et al. 2010). Moderne Züchtungsmethoden ermöglichen es sehr viel leichter auch die Proteinqualität zu verbessern. Ein Beispiel ist „quality protein maize“ (QPM; Tang et al. 2013) mit einem erhöhten Gehalt der Aminosäure Lysin, die vor allem in vielen Entwicklungsländern eine limitierende Aminosäure ist. Und auch die Erhöhung des Gehaltes an wichtigen Mineralstoffen und Spurenelementen könnte durch Züchtung erreicht werden (Welch und Graham 2004; Velu et al. 2014). Potential, das Nährstoffprofil von Getreide und anderen Pflanzen für die menschliche Ernährung zu verbessern und so zu vorteilhaften Alternativen für tierische Nahrungsmittel zu machen, ist also durchaus vorhanden.

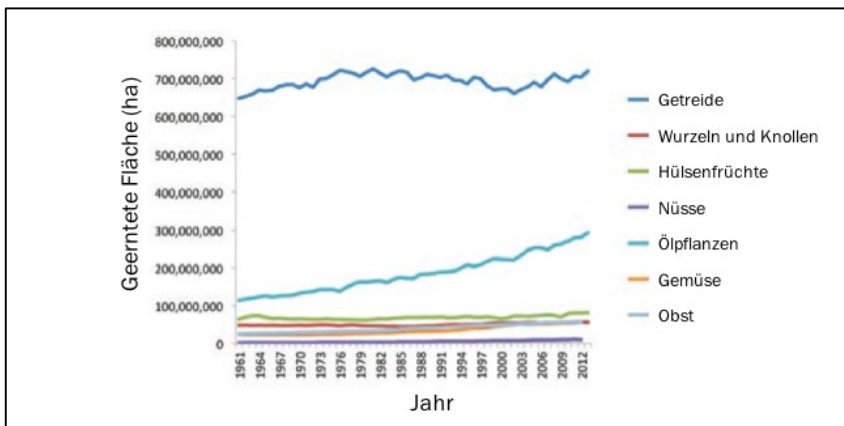


Abbildung 9: Anbaufläche verschiedener Nutzpflanzen. Hülsenfrüchte machen im Vergleich zu Getreide nur einen geringen Anteil aus (FAO 2016d).

Weiterhin könnten neben den etablierten Getreidearten solche Arten vermehrt angebaut werden, die von Natur aus einen höheren Gehalt an Proteinen mit hoher biologischer Wertigkeit besitzen. Dazu gehören vor allem Hülsenfrüchte wie Bohne, Linse, Erbse und Lupine. Der Proteingehalt dieser, zu den Leguminosen gehörenden Pflanzenarten, ist meist um ein Vielfaches höher und ihr Kohlenhydratgehalt dafür niedriger als der von Getreide (Tabelle 7). Hinzu kommen weitere gesundheitsfördernde Eigenschaften wie ein hoher Faser- und ein niedriger Fettgehalt. Ein teilweiser Ersatz von kohlenhydratreichem Getreide und Getreideprodukten durch Hülsenfrüchte in der Ernährung könnte sich somit auch positiv auf die Gesundheit auswirken (Rebello et al. 2014; FAO 2016c). Die beim Kochen von Hülsenfrüchten entstehende Flüssigkeit wurde kürzlich als Ersatz für tierisches Eiweiß in der Lebensmittelbe- und -verarbeitung beschrieben. Das sog. Aquafaba kann als Emulgator, Bindemittel, Verdickungsmittel und Treibmittel verwendet werden. Auch als Geliermittel könnte es Anwendung finden. Allerdings sind Inhaltsstoffe und Eigenschaften von Aquafaba noch Gegenstand von Untersuchungen⁶.

Tabelle 7: Proteingehalt und Gehalt an anderen Nährstoffen in den wichtigsten Getreiden, Leguminosen und Ölpflanzen. (Verschiedene Quellen, u.a. Day 2013)

	Proteingehalt	Kohlenhydrate	Fett
Weizen (Mehl)	8-15%	80%	1- 2%
Reis	7- 9%	90%	unter 1%
Mais	9-12%	70-75%	5%
Gerste (geschält)	8-15%	60-64%	3%
Sorghum	9-17%	70-75%	2%
Sojabohne	35-40%	30%	20%
Erbse	20-30%	70-75%	3%
Bohne	ca. 21%	52-60%	7%
Linse	ca. 21%	52-62%	2%
Kichererbse	20-25%	60%	7%
Lupine	35-40%	35-40% (ohne Stärke)	10%
Raps	17-26%	12-30% (ohne Stärke)	40%

Durch ihre einzigartige Symbiose mit Knöllchenbakterien, die in den Wurzeln der Pflanzen Stickstoff aus der Luft binden, haben Leguminosen zusätzlich einen positiven Einfluss auf die Bodenqualität. Die bisher untergeordnete Rolle von Leguminosen in der Landwirtschaft und in der Züchtung hat dazu geführt, dass ein großes Potential für die Verbesserung von Ernährung und Klima ungenutzt gelassen wurde (Foyer et al. 2016). Ein

⁶ Mehr Informationen zu Eigenschaften und Verwendung von Aquafaba bietet die Homepage www.aquafaba.com

vermehrter Anbau von Leguminosen und Einsatz als Futter- und Nahrungsmittel wird deshalb inzwischen aus- gelobt; so zum Beispiel auch anlässlich des „Jahres der Hülsenfrüchte 2016“ (FAO 2016a). Auf europäischer Ebene haben verschiedene Arbeitsgruppen das Problem identifiziert und Potentiale zu einer Steigerung der Leguminosen-Proteinproduktion in Europa analysiert (u. a. EIP AGRI 2014).

Theoretisch wären auch in Europa angebaute Sojabohnen eine Alternative zu Importen aus nicht nachhaltigem Anbau in Südamerika und anderen Regionen. Bisher ist die Produktion in Europa jedoch sehr begrenzt, vor allem wegen des geringen Ertrages. Fortschritte in der Züchtung könnten dieses Problem eventuell lösen und eine Ausweitung des Anbaus von Soja auch in Europa ermöglichen (Hahn und Würschum 2014). Basierend auf einer *life cycle analysis* (LCA) könnte der Ersatz von südamerikanischem durch europäisches Sojaschrot etwa 126kg CO₂-Äquivalente pro Tonne Schrot einsparen (De Boer et al. 2014). Da Proteingehalt und -wertigkeit in Sojabohnen sehr hoch sind, wäre vor allem auch ein vermehrter direkter Verzehr im Nahrungsmittel sinnvoll. Allerdings spielt die Verwendung von Soja als Proteinquelle für die menschliche Ernährung im Vergleich zur Verwendung in der Tierfütterung bisher kaum eine Rolle. Obwohl es weltweit das mit Abstand meistgenutzte pflanzliche Protein ist, werden nur etwa 2% des Sojas direkt zur Produktion von Lebensmitteln verwendet (Goldsmith 2015).

Auf dem Gebiet pflanzlicher Alternativen für Fleisch haben sich in den letzten Jahren vor allem in den USA neue Firmen mit innovativen Ansätzen hervorgetan. Sie nutzen zum Teil neueste biotechnologische Verfahren, um Mischungen pflanzlicher Proteine eine fleischähnliche Anmutung, Textur und Geschmack zu verleihen. Es wird dabei zum Beispiel auf das in den Wurzeln von Sojabohnen vorkommende Leghämoglobin zurückgegriffen, das in seinen Eigenschaften dem Hämoglobin im Blut von Tieren ähnelt und den Produkten damit fleischähnliche Erscheinung und Geschmack verleiht. Ziel dieser Konzepte ist es, neben Veganern und Vegetariern vor allem auch die breite Masse der durchschnittlichen Konsumenten zu erreichen. Firmen, die sich auf diese neuartigen veganen Produkte spezialisiert haben, konnten zum Teil exorbitante Summen von renommierten Investoren für die Finanzierung einwerben.

Neben pflanzlichen kommen verschiedene nicht-pflanzliche alternative Proteinquellen für die menschliche Ernährung in Frage. Diese zeichnen sich, im Vergleich zu pflanzlichen Quellen, oft sogar durch eine höhere biologische Wertigkeit aus. Im Vergleich zur Produktion konventioneller, tierischer Nahrungsmittel weisen sie in der Regel auch eine höhere Ressourceneffizienz und/oder geringere negative Auswirkungen auf Umwelt, Klima und menschliche Gesundheit auf.

Insekten

Insekten sind eiweißreich und stellen für ca. zwei Milliarden Menschen, vor allem in Asien, Australien, Zentral- und Südamerika, einen Bestandteil der normalen Ernährung dar. Die Verwendung von Insekten für Nahrungsmittel in Europa und Nordamerika wird seit einigen Jahren sowohl in der Wissenschaft als auch in meist kleinen Unternehmen vorangetrieben. Auch in der Gourmet-Küche werden Insekten vermehrt in Speisen eingesetzt (siehe u. a. Van Huis et al., 2014; Die Welt 2016). Allerdings besteht noch vielfacher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die Verarbeitung und Zubereitung von Lebensmitteln aus Insekten an die Bedürfnisse der Verbraucher und der Lebensmittelindustrie sowie den Rechtsrahmen anzupassen (VTT 2017).

Etwa 1.900 Insektenarten sind essbar und werden von etwa 3.000 ethnischen Gruppen in 113 verschiedenen Ländern als Proteinquelle genutzt (MacEvilly 2000). Als ein Argument für eine Unbedenklichkeit der Einführung dieser Tiergruppe in die westliche Diät kann dies jedoch nur teilweise angeführt werden, da es sich fast ausschließlich um aus der Wildnis gefangene Insekten handelt (DeFoliart 1995; Van der Spiegel et al. 2013). Zwar gibt es erste toxikologische Studien an für den Verzehr gezüchteten und gehaltenen Insekten, aber noch gibt es eklatante Lücken (EFSA 2015; EPRS 2016a, b) zum Beispiel zu potentiellen Allergenen und die mögliche

Übertragung gefährlicher mikrobieller oder parasitärer Erreger (Belluco et al. 2013). Kritische Forscher geben außerdem zu bedenken, dass wie in der Massenhaltung anderer Tierarten auch bei Insekten Antibiotika angewendet werden müssen, um die Ausbreitung von Zoonosen zu verhindern (Die Welt 2016). Für die Etablierung von Insekten als Proteinquelle in der menschlichen Ernährung sind in Europa auch Anpassungen der Gesetzgebung notwendig. Insekten gelten zum Beispiel in Europa als „Novel Food“ (Regulation 2015/2283), d. h. als Nahrungsmittel, die in Europa vor 1997 nicht signifikant zur menschlichen Ernährung beigetragen haben. Nahrungsmittel, die unter diese Regelung fallen, müssen aufwändige Nachweise zur Unbedenklichkeit erbringen, bevor sie zugelassen und in den Verkehr gebracht werden. Solche regulatorischen Hürden für die Zulassung neuer und ggf. nachhaltigerer Alternativen zum momentanen, ressourcen-intensiven Konsum sollten die Sicherheit für den Verbraucher belegen, aber nicht unverhältnismäßig hoch sein. Auch Regeln bezüglich Definitionen und Regulierung der Haltung und Verarbeitung müssen teilweise neu erarbeitet werden (Nieuwland 2016).

In vielen Ländern, zum Beispiel in Europa und Nordamerika, gibt es kulturelle Vorbehalte gegen den Verzehr von Insekten (Yen 2009). Durch die Globalisierung besteht das Risiko, dass das westliche Ideal der Ernährung und damit gar eine Schmähung von Insekten als Nahrungsmittel auch in anderen Ländern übernommen wird, statt die Nutzung in Europa zu fördern (Yen 2009). Andererseits gibt es zahlreiche Initiativen, um einen gesellschaftlichen Diskurs zu fördern, und erste Produkte in Europa auf den Markt zu bringen⁷.

Ein Vorteil der Produktion von Insekten könnte sein, dass für ihre Fütterung biologische Abfälle, wie zum Beispiel Lebensmittelreste, verwendet werden können und dadurch eine Kaskadennutzung ermöglicht würde. Auch hier sind Studien zur Effizienz und Lebensmittelsicherheit nötig sowie eine entsprechende Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen.

Algen

Algen werden grob in Makro- und Mikroalgen unterteilt. Sowohl zu den marinen Makroalgen (auch Seegras oder Seetang) als auch den Mikroalgen (z. B. Spirulina⁸ und Chlorella) gehören eine Reihe von genießbaren Arten mit guten Eigenschaften für den Einsatz in der menschlichen Ernährung. Sie enthalten gesundheitsfördernde Stoffe, wie zum Beispiel einen hohen Anteil an Ballaststoffen, ungesättigten Fettsäuren und Vitaminen, deren Konzentration durch Zuchtwahl weiter erhöht werden kann. Der Proteingehalt vieler Algen liegt ähnlich hoch oder höher, als in anderen pflanzlichen Quellen wie Soja oder in tierischen Produkten wie Eiern (Fleurence 1999; Becker 2007, Holdt und Kraan 2011). Algen werden bereits als Futtermittel genutzt, aber in der menschlichen Ernährung finden sie meist nur als Nahrungsergänzungsmittel Anwendung und weniger als wertvolle Proteinquelle.

Um Algen zu einer wettbewerbsfähigen, nachhaltigeren und gesunden Alternative zu tierischen Proteinen zu machen, sind noch technische Fortschritte in der Produktion sowie Studien zum Nachweis ihrer gesundheitlichen Unbedenklichkeit nötig (Draaisma et al. 2013; Enzing et al. 2014).

Die Produktion von Nahrung aus Algen anstatt aus tradierten Nutzpflanzen hat das Potential, große Mengen an Treibhausgas-Emissionen einzusparen, vor allem durch die Einsparung bei Landnutzung. Zusätzlich würde besonders die Produktion in mariner Aquakultur aber auch in geschlossenen Systemen auf dem Land den Wasserfußabdruck deutlich verringern. Allerdings stellt der hohe Nährstoffbedarf eine Herausforderung für eine Produktion im großen Maßstab dar (Walsh et al. 2016). Ein bioökonomisch sinnvoller Ansatz könnte die

⁷ Interessante Ergebnisse zur Einstellung von Verbrauchern gegenüber dem Verzehr von Insekten und den soziokulturellen Gründen finden sich in Verbeke (2015), Tan et al. (2016), House (2016), Le Goff und Delarue (2016) und Schouteten et al. (2016).

⁸ Bei Spirulina handelt es sich um eine Blaualge, also um ein Bakterium. Sie wird im Zusammenhang mit Ernährung allerdings meist zu den Algen gezählt.

Verwendung von nährstoffreichen Abwässern für die Düngung von Algen in geschlossenen Systemen sein (Pittman et al. 2011). Für eine nachhaltige Produktion am besten geeignet sind demnach Standorte, an denen ausreichend Wasser, CO₂, geeignete Abwässer und Elektrizität mit niedrigem CO₂-Fußabdruck verfügbar sind (Walsh et al. 2016). Eine kombinierte Produktion von Algen für Biokraftstoff, Nahrungs- und Futtermittel könnte die Effizienz zusätzlich steigern. Bei der Umsetzung solcher Konzepte gibt es jedoch noch großen Forschungsbedarf (Gerber et al. 2016).

Zahlreiche Auswirkungen, die bei einer möglichen Erweiterung der Produktion von Algen für die menschliche Ernährung zu erwarten sind, lassen sich am besten mit Simulationen abschätzen. Dabei sind Umweltrelevanz, wirtschaftliche Erwägungen sowie zum Beispiel die Wahl von Materialien und Energiequellen und die Akzeptanz durch Verbraucher wichtige Determinanten und Erfolgsfaktoren⁹.

Aquakultur

In vielen asiatischen Ländern, darunter in bevölkerungsreichen Staaten wie China und Indonesien, stellt die Fischzucht bereits die größte Proteinquelle dar. In Amerika und Europa steigt der Konsum von Produkten aus der Aquakultur um mäßige 1% bis 2%, weltweit jedoch um etwa 8% pro Jahr (WOR 2013). Es bestehen verschiedene Formen der Aquakultur im Meer (marine Aquakultur oder Marikultur) und in Süßgewässern (Teichwirtschaft). Hinzu kommen Kreislaufsysteme, die nicht mit natürlichen Gewässern in Verbindung stehen. Diese sind zwar technisch aufwändiger, bieten jedoch eine größere Unabhängigkeit von Umwelteinflüssen und die Möglichkeit der Kontrolle von Wasserqualität und anderen Parametern. In mariner Aquakultur gehören zu den am häufigsten genutzten Fischarten Lachs und Pangasius, während in der Teichwirtschaft Forellen, Karpfen und Tilapien produziert werden. Insgesamt werden in der Aquakultur über 150 Fischarten genutzt.

Fische haben eine effizientere Futtermittelverwertung und Proteinkonversion als Warmblüter, wie z. B. Schweine und Rinder, und in der Regel auch einen höheren nutzbaren Muskelanteil. Nachhaltige Formen von Aquakultur können sowohl den Nährstoff- und Wasserverbrauch als auch den Umwelt- und Klima-Fußabdruck der Proteinproduktion senken. In einem Land wie Deutschland, das große Teile seines Niederschlags ungenutzt abfließen lässt, könnte bisher ungenutztes Wasser eine Ausweitung der Aquakultur mit einem geringen Wasser-Fußabdruck ermöglichen (BÖR 2014a). Aktuell wird an der Umsetzung von Systemen geforscht, in denen Fische, Pflanzen und Mikroorganismen einen Nährstoffkreislauf bilden (u. a. Suhl et al. 2016). Bisher ist diese Aquaponik genannte Kombination von Fisch- und Pflanzenproduktion noch sehr energieintensiv und nicht wirtschaftlich (Edwards 2015), es wird jedoch intensiv an deren Optimierung gearbeitet.

Fische aus Aquakultur könnten den Wildfang vieler Arten weitestgehend ersetzen und so die marine Biodiversität schonen. Allerdings ist das nicht für alle Fischarten der Fall. Der begehrte und gleichzeitig stark bedrohte Thunfisch ist bisher beispielsweise nur schwer in Aquakultur zu halten und zu vermehren. Nicht nur Fisch, sondern auch andere Meerestiere und Algen können in Aquakultur produziert werden. Aquakultur in urbanen Gebieten oder auf degradierten Böden könnte zusätzlich bestehende Raumnutzungskonflikte mindern und dadurch natürliche Ökosysteme schonen. Allerdings birgt eine nicht standortgerechte, nicht nachhaltige Aquakulturproduktion auch Risiken für Mensch, Tier und Umwelt (BÖR 2012). Übermäßiger Einsatz von Antibiotika und Nährstoffeintrag in Gewässer sind zwei der Hauptprobleme. Bei geschlossenen Systemen ist dagegen eine effiziente und nachhaltige Energieversorgung eine Herausforderung. Hier ist die Nutzung der Abwärme von Biogasanlagen eine mögliche Lösung. Neben der nötigen Zufuhr von Wärme gestaltet sich ein Ausbau der Aquakultur in Deutschland noch aus anderen Gründen schwierig. Die restriktive Vergabe von Wasserrechten sorgt dafür, dass für eine Steigerung der Produktion vor allem eine Intensivierung bestehender Anlagen und die Errichtung standortunabhängiger Kreislaufanlagen nötig ist (BÖR 2012). Hier sind technische Innovationen

⁹ Ein Beispiel für ein solches Projekt, das Markteffekte, Verbraucherakzeptanz und Folgen für die globale Biomassebilanz der Produktion von Mikroalgen untersucht, ist an der Universität Hohenheim angesiedelt. Siehe <https://idw-online.de/de/news675976>

wichtig, um Wasser- und Nährstoffkreisläufe zu optimieren. Auch alternative Futtermittel sind eine Möglichkeit, die Effizienz und Nachhaltigkeit von Aquakultur zu steigern. Denn bisher werden Fische in Aquakultur meist mit Fischmehl gefüttert, für dessen Herstellung wiederum Wildfang betrieben wird. Deutschland erreicht zurzeit durch heimische Aquakultur nur eine Selbstversorgung von einigen Prozent am nationalen Konsum von Fisch.

Speisepilze

Speisepilze sind als proteinhaltige Lebensmittel seit langem bekannt und Teil der menschlichen Ernährung in vielen Regionen der Erde. Als heterotrophe Organismen betreiben Pilze keine Photosynthese und benötigen deshalb kein Licht zum Wachsen. Sie werden auf einem Substrat mit einer Kohlenstoffquelle und ausreichend Nährstoffen gezüchtet bzw. kultiviert. Verschiedenste Reststoffe eignen sich als Substrat für die Kultivierung von Pilzen, was sie zu überaus interessanten Komponenten für eine Kaskadennutzung macht. Kaffeesatz eignet sich zum Beispiel als Bestandteil von Substrat und kann in der Produktion von Pilzen verwendet werden. Pilze sind zudem in der Lage, Lignocellulose enzymatisch abzubauen. Deshalb werden zur Kultivierung von Speisepilzen verschiedene Reststoffe als Substrat verwendet, beispielsweise mit Rückständen aus Bierbrauereien versetztes Stroh (Pant et al. 2006). Auch Baumwollabfälle und Nussschalen eignen sich. Die durch diese Biokonversion erzeugte Kaskadennutzung wirkt sich positiv auf die Nachhaltigkeitsbilanz der Produktion von Pilzen als Proteinquelle aus und hat eine gesteigerte Wertschöpfung der ansonsten schwer zu verarbeitenden Lignocellulose zur Folge (Philippoussis et al. 2001).

Seit den 1980er Jahren wird zudem „Pilzprotein“ aus Zellkultur gewonnen und in den USA und mehreren europäischen Ländern, darunter seit 2012 auch Deutschland, verkauft¹⁰. Da es sich dabei um mikroskopische Pilze handelt, wird dieses Protein zusammen mit anderem mikrobiellen Protein im nächsten Abschnitt behandelt.

Mikrobielles Protein

Die Produktion von Protein durch Mikroorganismen, sog. Single Cell Protein (SCP), ist eine weitere interessante Möglichkeit, hochwertiges Protein mit einem potentiell niedrigen Umweltfußabdruck bereitzustellen (Ravindra 2000). Zusammengefasst werden unter diesem Begriff Proteine aus Hefen, einzelligen Algen (Mikroalgen), Pilzen und Bakterien. Die Qualität des gewonnenen Proteins variiert je nach Organismus, liegt allgemein aber über dem von FAO und WHO empfohlenen Wert für die menschliche Ernährung (bezogen auf eine ausgeglichene Aminosäure-Zusammensetzung; Matassa et al. 2016). Was den Verbrauch an Wasser, Fläche und Ressourcen betrifft, kann die Produktion mikrobiellen Proteins eine sehr effiziente Alternative zu tierischen Nahrungs- und Futtermitteln sein. Die Produktion durch photosynthetische Mikroorganismen (Mikroalgen) hat den Vorteil, dass sie Sonnenstrahlung als Energiequelle nutzt, jedoch den Nachteil eines hohen Flächenbedarfs. Die Produktion von Bakterien oder Mikroalgen ohne Lichteintrag hat hingegen einen sehr niedrigen Flächenanspruch, benötigt jedoch die Zufuhr einer anderen Energiequelle, zum Beispiel Zucker (Matassa et al. 2016). Für dessen Generierung können allerdings auch erneuerbare bzw. bisher ungenutzte Quellen verwendet werden, wie landwirtschaftliche Reststoffe und Lebensmittelabfälle (Ravindra 2000; Gao et al. 2012; Zeng et al. 2017). Auch klimaschädliches Methan kann als Substrat für einige Mikroorganismen genutzt werden¹¹. Könnten aufgereinigte industrielle Abgase als Kohlenstoffquelle genutzt werden, würde die Produktion sogar einen negativen CO₂-Fußabdruck erreichen¹².

¹⁰ Unter dem Markennamen Quorn® (Wiebe 2004).

¹¹ Methan wurde erstmals kommerziell zur Produktion von mikrobiellem Protein genutzt von *The Imperial Chemical Industries* (Westlake 1986).

¹² Eine Vielzahl von Ansätzen, die CO₂ als Kohlenstoffquelle nutzen, um über mikrobielle Prozesse Polymere, Biokraftstoffe oder auch Proteine herzustellen, befindet sich in der Entwicklung und Erprobung. Sie werden oft unter dem Begriff „carbon capture and utilization“ (CCU) zusammengefasst.

Eine weitere Herausforderung ist es, mikrobielles Protein in eine vom Verbraucher akzeptierte, schmackhafte Form zu bringen (Becker 2007) und die Produkte zu vermarkten. Bisher findet mikrobielles Protein vor allem Anwendung in der Tierfütterung, wo es den Einsatz von Nahrungsmittelpflanzen ersetzen kann sowie in der Kosmetik oder in Form von speziellen Nahrungsmitteln. SCP enthält wenig Fett und viel Ballaststoffe und es werden ihm positive Effekte auf die menschliche Gesundheit zugeschrieben (Denny et al. 2008), u. a. auf die Gewichtsentwicklung (Bottin et al. 2016). Pilzprotein hat den zusätzlichen Vorteil, dass es durch Fermentation und Aufbereitung in Geschmack, Konsistenz und Struktur Fleisch sehr ähnlich sein kann (Boland et al. 2013). Allerdings enthalten Pilze weniger Eisen und Vitamin B₁₂ als rotes Fleisch (Denny et al. 2008).

In-vitro-Fleisch

Neue Ansätze bieten Verfahren, Fleisch aus Stammzellen von Nutztieren (Rind und Huhn) in einem geeigneten Medium („*in vitro*“) zu generieren, um so langfristig die Nutztierhaltung zu ersetzen¹³. Dieser Ansatz wird in der Forschung schon seit längerem verfolgt, doch erst in den letzten Jahren wurden aufgrund von Fortschritten in der Zellkulturtechnik und der Molekularbiologie Durchbrüche in der Umsetzung erzielt. Forschern aus den Niederlanden gelang 2013 die Synthese einer *in-vitro* kultivierten „Bulette“ aus Stammzellen in Nährlösung¹⁴. Seitdem wurde die Technik weiter verbessert. Erste Unternehmen haben Produkte aus In-vitro-Ansätzen präsentiert, beispielsweise ein in Zellkulturen gezüchtetes Hühnerfleisch oder Fisch¹⁵. Noch gibt es allerdings zahlreiche technische Hürden auf dem Weg zur wirtschaftlichen Massenproduktion (Van der Weele und Tramper 2014).

Zu ihrer Einstellung gegenüber In-vitro-Fleisch als Alternative zu konventionellem Fleisch gefragt, reagieren viele Menschen mit Skepsis. Gründe dafür sind die Unnatürlichkeit der Produktion, GVO-bezogene Ängste¹⁶ und Bedenken hinsichtlich Geschmack und gesundheitlicher Auswirkungen. Die Vorteile hinsichtlich Tierwohl und der Verminderung der negativen Auswirkungen von Tierhaltung auf die Umwelt werden jedoch durchaus erkannt (Verbeke et al. 2015a). Allerdings sind alle bisher durchgeführten Erhebungen zur Akzeptanz von In-vitro-Fleisch durch zukünftige Verbraucher rein hypothetisch (Verbeke et al. 2015b), da aufgrund des hohen Aufwands und enormer Herstellungskosten bisher keine größeren Mengen dieser Produkte zur Verfügung stehen.

Die Effizienz und Nachhaltigkeit der Produktion mit In-vitro-Ansätzen wird maßgeblich von den Produktionsbedingungen abhängen, wie z. B. dem Medium zur Kultivierung und dessen Zusammensetzung (Post 2012). Schätzungen zufolge würde die Produktion von In-vitro Fleisch, verglichen mit der von Rindfleisch, etwa die Hälfte an Energie benötigen, also ähnlich viel wie die von Schaf-, Schweine- und Hühnerfleisch (Tuomisto und Teixeira de Mattos 2011). Einsparungen erwartet man auch hinsichtlich der Nutzung von Fläche und Wasser sowie beim Ausstoß von Treibhausgasen. Ein zentrales Argument für diese Technologie ist allerdings das Umgehen der Tierhaltung und -schlachtung für die Fleischproduktion, also eine aus dem Tierschutz erwachsene Motivation.

¹³ Eine Finanzierungs-, Informations- und Kooperationsplattform zu „cellular agriculture“ ist New Harvest: http://www.new-harvest.org/about#mission_vision

¹⁴ Spiegel Online. „Wissenschaftler präsentieren ersten Labor-Burger“. Nina Weber, 5. August 2013. Verfügbar unter <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/fleisch-aus-der-petrischale-testesser-verzehren-labor-burger-a-914802.html> [09.08.2017]

¹⁵ AgFunder News. „Scale is the real barrier for cultured meat“. Verfügbar unter <https://agfundernews.com/scale-real-barrier-cultured-meat.html> [14.06.2017]
The Wall Street Journal. „Startup Serves Up Chicken Produced From Cells in Lab“. Von Jacob Bunge, 15. März 2017. Verfügbar unter http://www.wsj.stfi.re/articles/startup-to-serve-up-chicken-strips-cultivated-from-cells-in-lab-1489570202?sf=vlvkl0&utm_content=buffer9b235&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer#ab [30.03.2017]

¹⁶ Tatsächlich ist allerdings für In-vitro-Fleisch keine Gentechnik nötig.

4.3. Optimierte Produktion tierischer Nahrungsmittel

Neben einer Reduktion des Konsums tierischer Lebensmittel und deren Ersatz durch alternative Proteinquellen stellt die Verbesserung der Produktionssysteme eine Möglichkeit zur Minderung oder Verhinderung des Proteinproblems dar (siehe auch Buckwell et al. 2017). Vor allem Fortschritte in den Bereichen der Digitalisierung, Automatisierung und Biotechnologie können die Effizienz der Produktion steigern und für mehr Nachhaltigkeit sorgen.

Optimierte Futtermittel

In der Tierfütterung ist die Mischung mehrerer pflanzlicher Proteine Standard, da einzelne pflanzliche Proteine meist einen Mangel an einer oder mehreren essentiellen Aminosäuren aufweisen (s. o.). Um einen entsprechenden Ansatz von Masse in der Tierernährung zu erreichen, wird in nicht-optimierten Anzuchtbetrieben eine gewisse Überversorgung mit Proteinen akzeptiert, um den Mindestbedarf an kritischen Aminosäuren zu decken. Dies führt neben der geringen Effizienz zu erhöhten Stickstoffemissionen¹⁷, da diese hauptsächlich vom Gesamtproteingehalt des Futters abhängen. In der modernen Landwirtschaft wird dieser Problematik inzwischen mit der Beimischung einzelner, essentieller Aminosäuren zum Futter begegnet. Der Gesamtproteingehalt und die damit verbundenen Stickstoffemissionen können dadurch signifikant verringert werden (Rotz 2004; Gloaguen et al. 2014; Liu et al. 2017). Aminosäuren für die Fütterung werden teilweise chemisch, jedoch auch mittels biotechnologischer, fermentativer Verfahren gewonnen (u. a. Kircher und Pfefferle 2001; Hermann 2003). Der Weltmarkt liegt für einzelne Aminosäuren wie DL-Methionin oder L-Lysin für Futtermittel bei etwa einer Million Tonnen pro Jahr (Schüler 2016). Diese Maßnahme der Zusetzung einzelner Aminosäuren zum Futter wird von den Betrieben des ökologischen Landbaus bislang nicht genutzt, die damit weniger umweltverträglich als möglich produzieren.

Weitere Steigerungen in der Effizienz kann die Präzisionsfütterung bringen, die vor allem mit Hilfe moderner digitaler Methoden eine optimale Futterzufuhr der Tiere auf Basis individueller Bedürfnisse ermöglichen soll (Kebreab et al. 2012). Dadurch können auch Futtermittel eingespart werden.

Durch Fortschritte in der Pflanzenzucht könnten Futterpflanzen erzeugt werden, die eine höhere Wasser- und Nährstoffnutzungseffizienz aufweisen und so die Gesamteffizienz der tierischen Produktion erhöhen. Weiterhin kann eine durch Züchtung optimierte Aminosäure-Zusammensetzung zu höheren Protein-Konversionsraten führen (Kingston-Smith et al. 2013).

Alternative Proteinquellen für Futtermittel

Alternative pflanzliche Proteinquellen können nicht nur dem direkten Verzehr durch den Menschen dienen, sondern auch für die Tierfütterung genutzt werden und dabei Fischmehl und Sojaschrot ersetzen. Proteinreicher Rapschrot fällt bei der Ölgewinnung sowie bei der Herstellung von Biokraftstoff als Reststoff an und wird bereits heute in großem Umfang als Futtermittel, vor allem bei Wiederkäuern, eingesetzt. In Europa produzierter Rapschrot und Rapskuchen gelten als zunehmend attraktive Alternativen zu importiertem Sojaschrot, wenn die Preise für Letzteren steigen oder Importe verteuert würden¹⁸. Im Rahmen einer Optimierung könnten die bereits anfallenden Rückstände jedoch noch besser genutzt werden. So können die bei der Bioethanolher-

¹⁷ Der im Protein gebundene Stickstoff wird über den Urin der Tiere ausgeschieden und erhöht damit den Stickstoffgehalt der Gülle.

¹⁸ Topagrar. „Rapskuchen – eine kostengünstige Alternative“. 2.12.2016. Verfügbar unter <https://www.topagrar.com/news/Acker-Agrarwetter-Ackernews-Rapskuchen-eine-kostenguenstige-Alternative-5931250.html> [27.03.2017]

stellung anfallenden Getreiderückstände (Trockenschlempe) beispielsweise zu Pellets gepresst als Futtermittel eingesetzt werden. Durch die Ergänzung mit einzelnen Aminosäuren könnte die defizitäre Aminosäurezusammensetzung dieser Getreiderückstände ausgeglichen werden.

Insekten haben großes Potential für die Nutzung in der Tierernährung, u. a. aufgrund ihres Nährstoffgehaltes, hoher Proteinwertigkeit, hoher Protein-Konversionsrate und der prinzipiellen Möglichkeit, Lebensmittelabfälle für die Fütterung zu nutzen (Veldkamp et al. 2012; FAO und WUR 2013). Insekten könnten vor allem ein nachhaltigerer und effizienterer Ersatz für Fischmehl sein, aber aufgrund der besseren Aminosäure-Zusammensetzung ihrer Proteine auch pflanzliche Futtermittel ergänzen. Allerdings sind noch Optimierungen in der Produktion, Verarbeitung und Haltung nötig, um eine flächendeckende Umsetzung zu gewährleisten (Makkar et al. 2014). Auch umfassende Studien zur toxikologischen Unbedenklichkeit, die Verbesserung der Akzeptanz von Insekten als Futtermittel durch Bauern und Verbände sowie legislative Anpassungen sind nötig (EFSA 2015; EPRS 2016b). Am 13. Dezember 2016 sprach sich die EU-Kommission für eine Erlaubnis der Beimischung von Insektenproteinen zur Fischfütterung ab Juli 2017 aus (EC 2016, aber auch nur auf der Grundlage ihrer Produktion mit konventionellen Futterquellen. Vor allem auch für Hühner, die von Natur aus Insekten fressen, könnten diese in Zukunft eine geeignete alternative Proteinquelle darstellen.

Mikroalgen sind eine weitere alternative Proteinquelle für die Tierfütterung, mit einer oft besseren Aminosäure-Zusammensetzung und höherem Nährstoffgehalt als pflanzliche Quellen (Becker 2007; Lum et al. 2013). Zusätzlich werden die in marinen Algen enthaltenen, gesundheitsförderlichen Omega-3 Fettsäuren durch die Tiere aufgenommen. Genau wie bei Fisch, führt dies auch in Fleisch, Eiern und Milch zu einem erhöhten Gehalt an Omega-3 Fettsäuren und im Zielorganismus zu einem niedrigeren Gehalt an Cholesterin (Papadopoulos et al., 2002; Sardi et al. 2006; Rajesha et al. 2011). Allerdings ist die Verwendung von Algen durch unerwünschte Nebeneffekte bisher oft begrenzt, bei Geflügel z. B. auf einen Anteil von ca. 5% bis 10% an der Gesamtfütterung, da sonst unerwünschte Verfärbungen von Fleisch und Eiern auftreten (Spolaore et al. 2006). Zu den technischen Herausforderungen zählen die nötige Erhöhung von Effizienz und Produktivität sowie die Verhinderung der Kontamination in der Produktion von Biomasse aus Algen (Enzing et al. 2014). Züchtung sowie biotechnologische Verfahren könnten die Eignung von Algen für den Einsatz als Futtermittel jedoch weiter verbessern. Ein weiterer Vorteil von Mikroalgen ist die mögliche Verwendung von Abwässern als Nährlösung. Rückstände aus der Produktion von Biokraftstoffen können ebenfalls als Nährstoffquelle für die Fütterung genutzt werden (Gatrell et al. 2014). Auch mikrobielles Protein aus Pilzen und Bakterien ist eine mögliche Alternative für die Fütterung. Allerdings ist zu beachten, dass auch Schwermetalle und andere bedenkliche Kontaminanten in Algen enthalten sein können, die über die Tiere in die menschliche Nahrung gelangen könnten. Wie bei Insekten als Futtermittel muss deshalb auch bei Algen die toxikologische Unbedenklichkeit erwiesen und ständig geprüft werden.

Nebenprodukte der landwirtschaftlichen Produktion und aus der Produktion von Biokraftstoffen können ebenfalls als Tierfutter verwendet werden (Capper et al. 2013). Eine Kombination dieser Ressourcen, die sonst als Abfall keine weitere Verwendung finden, mit der gezielten Supplementierung mit einzelnen freien Aminosäuren, könnte signifikante Effekte in der Tierfütterung erreichen und den Verbrauch von Getreidesamen verringern (Wu et al. 2014).

Alternative Futtermittel sind aber nicht *a priori* besser als konventionelle Futtermittel. So kommt eine Analyse zum Beispiel zu dem Schluss, dass ein teilweiser Ersatz von Sojaschrot im Tierfutter durch Insekten oder Algen den CO₂-Fußabdruck beim aktuellen Stand der Technik deutlich erhöhen könnte (De Boer et al. 2014). Dies ist vor allem dem Energieaufwand für die Klimatisierung und der erforderlichen Trocknung nach der Ernte zuzuschreiben. Ganzheitliche Analysen sind somit zwingend nötig, um eine sachgerechte Bewertung von Effizienz und Nachhaltigkeit vornehmen zu können.

Technischer Fortschritt und Digitalisierung

Moderne Technologien können die Tierhaltung ebenfalls effizienter, nachhaltiger und tierfreundlicher gestalten. Der Ansatz des *Precision-Livestock-Farming* (PLF) verfolgt beispielsweise das Ziel, Wirtschaftlichkeit mit Umweltverträglichkeit und Tiergesundheit bzw. Tierwohl zu verbinden. Möglich gemacht werden soll dies durch das Monitoring, Management und die Kontrolle aller Aspekte der Tierhaltung mit Hilfe neuester Sensortechnik, die u. a. Wachstum, Tierverhalten und Emissionen misst (Wathes et al. 2008). Krankheiten können so frühzeitig erkannt und Tiere nach individuellen Bedürfnissen gefüttert werden. Ein Beispiel für biotechnologische Innovation zur Verringerung des Klima-Fußabdruckes sind Biofilter, die mit Hilfe von Mikroorganismen klimaschädliche Gase aus der Abluft der Tierhaltung filtern (Kafle et al. 2015).

In den industrialisierten Ländern finden viele technische Innovationen wie Automatisierung und Digitalisierung bereits Anwendung und steigern die Effizienz und Nachhaltigkeit von Produktionsverfahren. In den Entwicklungsländern könnte entsprechender technischer Fortschritt helfen, die im Vergleich zu den Industrieländern viel geringere Produktivität zu steigern und dadurch zum Wohlstand von Kleinbauern beizutragen. Gleichzeitig könnten die Effizienz im Umgang mit Wasser und Futtermitteln erhöht und negative Auswirkungen auf die Umwelt gemindert werden. Beispiele sind hier für Industrieländer oft selbstverständliche Technologien wie ein flächendeckendes System der Wettervorhersage. Aber auch neuere Techniken könnten schon bald helfen: beispielsweise Mobiltelefon-Applikationen, die mittels Bilderkennungssoftware Schädlingsbefall, Krankheiten und Nährstoffmangel von Nutzpflanzen diagnostizieren¹⁹.

Entkopplung von Raumnutzungskonflikten

Landwirtschaft für die menschliche Ernährung und der Anbau von Futtermitteln konkurrieren mit natürlichen Ökosystemen, wirtschaftlich genutztem Wald und auch immer mehr mit dem Anbau von Energiepflanzen um die weltweit verfügbaren Flächen. Da fast alle fruchtbaren Flächen bereits erschlossen sind, verschärfen sich diese Raumnutzungskonflikte immer weiter. Eine teilweise Verminderung dieser Problematik könnte durch den Anbau von Pflanzen in urbanen Gebieten erreicht werden. Dies hätte zusätzliche Vorteile wie kurze Transportwege, die Generierung von Arbeitsplätzen in Städten, ein Beitrag zur Klimaverbesserung in Städten und die Re-Integrierung der Nahrungsproduktion in sozio-ökologische Strukturen. Vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern könnte urbane Landwirtschaft auch zur Ernährungssicherung in wachsenden Großstädten beitragen (Redwood 2009). Um den Anbau von Pflanzen in Städten möglichst effizient zu gestalten, wird seit einiger Zeit an neuen technischen Lösungen gearbeitet. Moderne, energieeffiziente Beleuchtungstechnik und Temperierung ermöglichen eine von der Umwelt weitgehend unabhängige Pflanzenproduktion (indoor farming). Hydroponische Systeme²⁰ brauchen zudem keine Erde als Trägersubstrat. Ein auf diese Weise gestalteter Pflanzenanbau hätte den Vorteil, dass er in der Höhe erweiterbar oder gar „stapelbar“ wäre und dadurch weniger Fläche in Anspruch nehmen würde (vertical farming; Despommier 2011). Unabhängig davon, ob damit der Konsum tierischer Nahrungsmittel reduziert oder die Produktion effizienter und umweltfreundlicher gestaltet wird, stellt urbane Landwirtschaft eine Möglichkeit dar, den Raumnutzungskonflikt um fruchtbaren Boden zu reduzieren. Auch urbane Aquakultur kann zu einer nachhaltigeren Proteinversorgung der städtischen Bevölkerung beitragen (Smit et al. 1996).

¹⁹ Ein Beispiel für eine solche Applikation ist „Plantix“ von der Firma peat, die auf der CeBIT 2017 den Innovation Award gewonnen hat.

²⁰ Hydroponik (oder auch Hydrokultur) bezeichnet die Anzucht von Pflanzen in einem anorganischen Substrat, statt Erde, in dem sie über Wasser ständig mit Nährstoffen versorgt werden.

Hochwertige Nutzung von Nebenprodukten und Reststoffen

Eine Effizienzsteigerung in der Produktion tierischer Nahrungsmittel kann auch durch die hochwertigere Nutzung ihrer Nebenprodukte erreicht werden. Vermeintliche Abfälle können durch innovative Verfahren in der Bioökonomie Anwendung finden und in Kreisläufe eingegliedert werden. Federn von Hühnern können zum Beispiel mit einem biotechnologischen Verfahren fermentiert und zu einem proteinreichen Futtermittel mit hoher biologischer Wertigkeit umgewandelt werden (Bertsch und Coello 2005). Auch andere Verwendungen für Proteine können die Wertschöpfung erhöhen (Boland et al. 2013). Ein Beispiel ist Molkenprotein, das als Nebenerzeugnis in großen Mengen in der Milchindustrie anfällt und in der Vergangenheit als Abfall gesehen wurde, heute aber einen hochwertigen und nachgefragten Nahrungsmittelzusatz darstellt (Smithers 2008). Die in Fell, Haaren und Hufen enthaltenen Polymere Collagen, Keratin und Elastin fallen in großen Mengen als Abfall bei der Schlachtung von Nutztieren an, können aber als Nanofasern für zahlreiche Anwendungen genutzt werden. Keratin bindet z. B. Formaldehyd und Schwermetalle und kann deshalb bei der Reinigung von Gebäudeluft nützlich sein. Die Emissionen aus der Tierhaltung können durch Rückgewinnung als Biogas nutzbar gemacht werden. Durch eine Substitution fossiler Brennstoffe kann die Tierhaltung auch indirekt zu einem verbesserten CO₂-Fußabdruck beitragen.

Die Nutzung und Weiterverarbeitung von Nebenprodukten und Abfällen erhöht die Effizienz der gesamten Produktion und steigert die Wertschöpfung. Allerdings vermindert sie die negativen Auswirkungen auf Umwelt, Klima und menschliche Gesundheit im Vergleich zu anderen Maßnahmen nur geringfügig. Hinzu kommt, dass hochwertige Ersatzprodukte für z. B. Leder bereits heute pflanzenbasiert oder durch mikrobielle Prozesse hergestellt werden können und deshalb in Zukunft nicht mehr durch Tiere produziert werden müssen²¹.

Fortschritte in der Tierzucht

Die Tierzucht ist ein wichtiger Faktor in der Steigerung von Effizienz und Produktivität der Produktion tierischer Nahrungsmittel. Aber auch zur Verbesserung des Tierwohls sowie zur Verminderung der negativen Folgen der Tierhaltung für Umwelt und Klima kann die moderne Tierzucht beitragen. Dazu ist ein umfassenderes Verständnis von Genotyp-Umwelt-Interaktionen nötig, ermöglicht durch moderne Analysentechniken (siehe auch BÖR 2015). Vor allem auch für die Zukunftsfähigkeit der diversen und sich im Wandel befindlichen landwirtschaftlichen Systeme vieler Entwicklungsländer spielt die Tierzucht eine wichtige Rolle (Marshall 2014). Die weltweit gegebene enorme Vielfalt verschiedener Rassen kann hier genutzt und sollte deshalb erhalten werden.

Vermeidung von Verlusten

Etwa 20% des weltweit produzierten Fleisches, 20% der Milchprodukte und 35% des Fisches gehen während des Produktions- und Konsumprozesses verloren (FAO 2012b). In Entwicklungsländern sind die größten Verluste während der Ernte, Lagerung und Verarbeitung zu verzeichnen. Dies hat größtenteils technologische und strukturelle Gründe. In den Industrieländern entstehen hingegen auch große Verluste in den Haushalten, vorwiegend durch weggeworfene Nahrungsmittel (FAO 2011). Die Autoren einer aktuellen Studie zu den Verlusten innerhalb der gesamten Nahrungsmittelproduktions- und -nutzungskette definieren die Verluste auf der Konsumseite noch umfassender. Vergleicht man die tatsächliche mit der optimalen Proteinzufuhr beim Menschen, so werden global rund 30% zu viel konsumiert. Diese Menge kann auch als Verschwendung betrachtet werden.²² (Alexander et al. 2017).

²¹ Beispiele sind hier Collagen aus Zellkultur und Ananasblätter für die Herstellung von Leder.

²² Zugrundegelegt wurde von Alexander et al. (2017) ein Proteinbedarf von 52 g pro Person und Tag und alles über diesem Wert wurde als übermäßiger Konsum definiert, nach Blair und Sobal (2006).

Die Vermeidung von Verlusten birgt somit großes Potential zur Optimierung der Produktion tierischer Nahrungsmittel insgesamt und zur Verminderung ihrer negativen Folgen. Die vermeidbaren Lebensmittelabfälle in Deutschland entsprechen beispielsweise Emissionsmengen von etwa 12 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr (WBA und WBW 2016). Neben der Vermeidung ist die Rückgewinnung wertvoller Stoffe aus Lebensmittelabfällen eine Möglichkeit, Verluste zu verringern. Verschiedene Verfahren hierzu werden erforscht und befinden sich in der Entwicklung (Galanakis 2012). Auch könnten Lebensmittelabfälle als Substrat, z. B. für die Insektenproduktion dienen. Verluste von Nahrungsmitteln und deren Vermeidung sind ein wichtiger Themenkomplex, der hier aber nicht weiter vertieft werden kann.

Verluste entstehen auch durch eine geringe oder nicht optimierte Verwertung tierischer Produkte. So werden beispielsweise in Industrieländern hauptsächlich Filets und hochwertige Stücke als Frischfleisch verkauft. Vermutlich minderwertige Teile, wie z. B. Innereien werden für Haustierfutter oder Zwischenprodukte der Lebensmittelindustrie verwendet. Diese könnten jedoch auch direkt zu hochwertigen Lebensmitteln verarbeitet werden.

Es wird auch berichtet, dass überschüssige bzw. nicht nachgefragte Fleischqualitäten aus EU-Ländern in Entwicklungsländer exportiert werden und dort zu Wettbewerbsverzerrungen führen. Einheimische Landwirte dort können mit den niedrigen Preisen oft nicht konkurrieren²³. Sozioökonomische Folgeschäden solcher globalen Zusammenhänge der Märkte sollten unbedingt bedacht und ebenfalls als Kosten der heimischen Produktion einbezogen werden.

²³ Siehe u. a. Süddeutsche Zeitung, 29. Dezember 2016, <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/freihandel-eu-importe-torpedieren-afrikas-wirtschaft-1.3314106>

5. Fazit

Die ausreichende Versorgung einer wachsenden Weltbevölkerung mit gesunden und schmackhaften Lebensmitteln ist eine der zentralen Herausforderungen der kommenden Dekaden. Dies gilt in besonderem Maße für proteinreiche Nahrungsmittel. Bestehende Systeme müssen produktiver und effizienter gemacht werden und durch neue und nachhaltiger erzeugte Proteine ergänzt werden. Die Bioökonomie kann hierzu entscheidende Beiträge leisten. Im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ fördert das BMBF mit der Ausschreibung zu „Agrarsysteme der Zukunft“ die Erarbeitung von Zukunftsszenarien sowie Forschungsprojekten, die sich u. a. damit beschäftigen, wie der global steigende Bedarf an Nahrungsmitteln und nachwachsenden Ressourcen zukünftig gedeckt werden kann. Auch die Potentiale alternativer und unkonventioneller Nahrungsquellen (z. B. Mikroorganismen, Insekten, Algen) und Produktionssysteme (Vertical Farming, Aquaponik) sollen dabei beleuchtet werden (BMBF 2016).

In seinen Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Forschungsstrategie benennt der Bioökonomierat eine gesundheitsförderliche Ernährung und ein nachhaltiges Ernährungssystem als wichtiges Handlungsfeld und empfiehlt vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels, die Ressourcen-Fußabdrücke und Emissionen in der Land- und Fischereiwirtschaft deutlich zu reduzieren (BÖR 2016). Gleichzeitig müssen die Ansprüche der Verbraucher an bessere Ernährungsangebote berücksichtigt werden. Die Entwicklung von nachhaltig erzeugten und gesundheitsförderlichen Lebensmitteln, auch auf Basis neuer Proteinquellen, spielt dabei eine wichtige Rolle in der Sicherung der Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung (BÖR 2016).

Innovative Nahrungsmittel und Technologien sind aber auch ein interessanter Wachstumsmarkt in den Industrieländern. Die deutsche Lebensmittelindustrie hat bisher nur vereinzelt Innovationen im Bereich der alternativen Proteine zur Marktreife entwickelt. International gelten Start-ups und Investoren in den USA, Israel, Frankreich und den Niederlanden als Vorreiter der Lebensmittelinnovationen für alternative Produkte. Es stellt sich die Frage, welche innovationspolitischen Maßnahmen und Anreizstrukturen sinnvoll sind, um die Wettbewerbsfähigkeit deutscher F&E und Unternehmen in diesem Zukunftsmarkt zu stärken.

Die in diesem Hintergrundpapier zusammengestellten Befunde und die sich ergebenden Fragen sollen als Diskussionsgrundlage dienen, um daraus Forschungsbedarf abzuleiten und politische Handlungsempfehlungen zu formulieren. Dabei gilt es nicht nur auf der Produktionsseite einen ressourcenintensiven Konsum in den industrialisierten Gesellschaften durch effektive Maßnahmen zu ändern, sondern gleichermaßen das Konsumverhalten nachhaltig zu verändern. Zu beachten bleibt hierbei die in der Welt nach wie vor existierenden extremen Unterschiede im Zugang zu ausreichender und gesunder Nahrung, was verantwortungsvoll in die Zielbetrachtung einfließen muss.

Referenzen

- Alexander, P., Brown, C., Arneth, A., Finnigan, J., Moran, D. et al. 2017. Losses, inefficiencies and waste in the global food system. *Agricultural Systems*, 153, 190-200.
- Becker, E. W. 2007. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25(2), 207-210.
- Bellarby, J., Tirado, R., Leip, A., Weiss, F., Lesschen, J. P., Smith, P. 2013. Livestock greenhouse gas emissions and mitigation potential in Europe. *Global Change Biology*, 19(1), 3-18.
- Belluco, S., Losasso, C., Maggioletti, M., Alonzi, C. C., Paoletti, M. G., Ricci, A. 2013. Edible insects in a food safety and nutritional perspective: a critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(3), 296-313.
- Bertsch, A., Coello, N. 2005. A biotechnological process for treatment and recycling poultry feathers as a feed ingredient. *Bioresource Technology*, 96(15), 1703-1708.
- BfR. 2012. Bundesinstitut für Risikobewertung. Zoonosen und Lebensmittelsicherheit. BfR-Symposium am 13. und 14. November 2012. Verfügbar unter: http://www.bfr.bund.de/de/veranstaltung/bfr_symposium_zoonosen_und_lebensmittelsicherheit-131595.html [24.03.2017]
- Blair, D., Sobal, J. 2006. Luxus consumption: Wasting food resources through overeating. *Agriculture and Human Values*, 23(1), 63-74.
- BMBF. 2016. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Agrarsysteme der Zukunft. Verfügbar unter <https://www.agrarsysteme-der-zukunft.de/de/agrarsysteme/startseite/> [24.03.2017]
- BMEL. 2014. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Eiweißpflanzenstrategie. Verfügbar unter http://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Ackerbau/_Texte/Eiweisspflanzenstrategie.html [27.03.2017]
- BMEL. 2017. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Deutschland, wie es isst. Der BMEL-Ernährungsreport 2017. Verfügbar unter <http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Ernaehrungsreport2017.pdf> [24.03.2017]
- BMUB. 2015. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Klimaschutzbericht 2015. Zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung. Verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutzbericht_2015_bf.pdf [24.03.2017]
- Boland, M. 2013. Global Food Supply: The world's need for Protein. Riddet Institute, Neuseeland. Präsentation. Verfügbar unter <http://www.riddet.ac.nz/sites/default/files/content/2013%20Protein%20supply%20Mike%20Boland.pdf> [24.03.2017]
- Boland, M., Rae A.N., Vereijken J.M., Meeuwissen, M.P.M., Fischer, A.R.H. et al. 2013. The future supply of animal-derived protein for human consumption. *Trends in Food Science & Technology*, 2013 (29), S. 62-73.
- BÖR. 2010. Bioökonomierat. Herausforderungen für eine zukunftsfähige Erzeugung von Lebensmitteln tierischer Herkunft. Berichte aus dem Bioökonomierat. Schwerin, M. et al. Verfügbar unter <http://biooekonomierat.de/fileadmin/templates/publikationen/berichte/Berichte03-Tier.pdf> [24.03.2017]
- BÖR. 2012. Bioökonomierat. Berichte aus dem Bioökonomierat 05. Welchen Beitrag kann die Aquakultur in Deutschland zur Bioökonomie leisten? Verfügbar unter <http://biooekonomierat.de/fileadmin/templates/publikationen/berichte/Berichte05-Aquakultur.pdf> [24.03.2017]
- BÖR. 2014a. Bioökonomierat. BÖRMEMO 01: Landwirtschaft in Deutschland – ihre Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit der Bioökonomie. Verfügbar unter http://biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/berichte/BOER-MEMO_LW.pdf [24.03.2017]
- BÖR. 2014b. Bioökonomierat. BÖRMEMO 03: Beitrag der Pflanzenforschung zur Deckung des Rohstoffbedarfs. Verfügbar unter http://biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/berichte/BOER_MEMO_Pflanzenforschung.pdf [24.03.2017]
- BÖR. 2014c. Bioökonomierat. Förderkonzept des Bioökonomierates: Lebensmittelkonsum, Ernährung und Gesundheit. Verfügbar unter http://biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/empfehlungen/Empfehlungen_Ernaehrung.pdf [24.03.2017]
- BÖR. 2015. Bioökonomierat. Hintergrundpapier: Nachhaltige Bereitstellung von biobasierten agrarischen Rohstoffen. Verfügbar unter http://biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/berichte/Hintergrundpapier_Rohstoffe_final.pdf [24.03.2017]
- BÖR. 2016. Weiterentwicklung der „Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030“. Empfehlungen des Bioökonomierates. Verfügbar unter: http://biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/empfehlungen/181116_Ratsempfehlungen_fu__r_die_Weiterentwicklung_der_Forschungsstrategie_final.pdf [24.03.2017]

- Bottin, J. H., Swann, J. R., Cropp, E., Chambers, E. S., Ford, H. E. et al. 2016. Mycoprotein reduces energy intake and postprandial insulin release without altering glucagon-like peptide-1 and peptide tyrosine-tyrosine concentrations in healthy overweight and obese adults: a randomised-controlled trial. *British Journal of Nutrition*, 116(02), 360-374.
- Bouvard, V., Loomis, D., Guyton, K. Z., Grosse, Y., Ghissassi, F. E. et al. 2015. Carcinogenicity of consumption of red and processed meat. *The Lancet. Oncology*, 16(16), 1599-1600.
- Breslau, N.A., Brinkley, L., Hill, K.D., Pak, C.Y. 1988. Relationship of Animal Protein-Rich Diet to Kidney Stone Formation and Calcium Metabolism. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 66(1), 140-146.
- Brown, K. H., Wuehler, S. E., Peerson, J. M. 2001. The importance of zinc in human nutrition and estimation of the global prevalence of zinc deficiency. *Food and Nutrition Bulletin*, 22(2), 113-125.
- Bryngelsson, D., Wirsenius, S., Hedenus, F., Sonesson, U. 2016. How can the EU climate targets be met? A combined analysis of technological and demand-side changes in food and agriculture. *Food Policy*, 59, 152-164.
- Buckwell, A., Capodici, G.L., Dijkhuizen, A., De Graeff, R., Frabetti, E. et al. 2017. Ein nachhaltiger Nutztiersektor in Europa: Eine Frage von Ernährungssicherheit, Klima und Innovation. Verfügbar unter: https://www.elanco.de/pdfs/product-and-services-public-assets/nachhaltiger-nutztiersektor-in-europa_final_20170115.pdf [24.03.2017]
- BVDF. 2015. Bundesverband der Deutschen Fleischwarenindustrie e.V. Fleischverzehr je Kopf der Bevölkerung. Verfügbar unter http://www.bvdf.de/in_zahlen/tab_05 [24.03.2017]
- Cafaro, P. J., Primack, R. B., Zimdahl, R. L. 2006. The fat of the land: Linking American food overconsumption, obesity, and biodiversity loss. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 19(6), 541-561.
- Capper, J.L., L. Berger, M.M. Brashears, et al. 2013. Animal feed vs. human food: challenges and opportunities in sustaining animal agriculture toward 2050. *Council Agric. Sci. Technol.* 53, 1-16.
- Cervantes-Pahm, S. K., Liu, Y., Stein, H. H. 2014. Digestible indispensable amino acid score and digestible amino acids in eight cereal grains. *British Journal of Nutrition*, 111(9), 1663-1672.
- Chatzav, M., Peleg, Z., Ozturk, L., Yazici, A., Fahima, T., Cakmak, I., Saranga, Y. 2010. Genetic diversity for grain nutrients in wild emmer wheat: potential for wheat improvement. *Annals of Botany*, 105(7), 1211-1220.
- Cordell, D., Drangert, J. O., White, S. 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292-305.
- David, L. A., Maurity, C. F., Carmody, R. N., Gootenberg, D. B., Button, J. E. et al. 2014. Diet rapidly and reproducibly alters the human gut microbiome. *Nature*, 505(7484), 559-563.
- Day, L. 2013. Proteins from land plants-potential resources for human nutrition and food security. *Trends in Food Science & Technology*, 32(1), 25-42.
- De Boer, H. C., van Krimpen, M. M., Blonk, H., Tyszler, M. 2014. Replacement of soybean meal in compound feed by European protein sources: effects on carbon footprint (No. 819). Wageningen UR Livestock Research.
- De Vries, M., De Boer, I. J. M. 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128(1), 1-11.
- DeFoliart, G. R. 1995. Edible insects as minilivestock. *Biodiversity & Conservation*, 4(3), 306-321.
- Denny, A., Aisbitt, B., Lunn, J. 2008. Mycoprotein and health. *Nutrition bulletin*, 33(4), 298-310.
- Despommier, D. 2011. The vertical farm: controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 6(2), 233-236.
- DGE. 2016a. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Protein. Verfügbar unter <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/protein/> [24.03.2017]
- DGE. 2016b. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. Vollwertig essen und trinken nach den 10 Regeln der DGE. Verfügbar unter <https://www.dge.de/ernaehrungspraxis/vollwertige-ernaehrung/10-regeln-der-dge/> [24.03.2017]
- Die Welt. 2016. Wie wäre es mit Müsli mit Cranberries und Grillen? 29.12.2016. Verfügbar unter: <https://www.welt.de/wissenschaft/article160616858/Wie-waere-es-mit-Muesli-mit-Cranberries-und-Grillen.html> [24.03.2017]
- Draaisma, R. B., Wijffels, R. H., Slegers, P. E., Brentner, L. B., Roy, A. et al. 2013. Food commodities from microalgae. *Current Opinion in Biotechnology*, 24(2), 169-177.
- DVT. 2017. Deutscher Verband Tiernahrung e.V. Die Bedeutung der eiweißliefernden Rohstoffe für die tierische Veredlungswirtschaft in Deutschland. Bonn/Berlin. Verfügbar unter https://www.dvtiernahrung.de/fileadmin/Dokumente_ab_07_2013/Presse/2017_03_28_DVT-Pk_Eiwei%C3%9Fversorgung-GVO.pdf [04.04.2017]
- EC. 2016. Europäische Kommission. Standing Committee on Plants, Animals, Food and Feed Section Biological Safety of the Food Chain. Verfügbar unter: http://ec.europa.eu/food/sites/food/files/safety/docs/reg-com_bio-sec_20161213_agenda.pdf [24.03.2017]
- Edwards, P. 2015. Aquaculture environment interactions: past, present and likely future trends. *Aquaculture*, 447, 2-14.

- EFSA. 2014. European Food Safety Authority. Fact sheet "Die EFSA erklärt Zoonosen: Antibiotikaresistenz". Verfügbar unter <https://www.efsa.europa.eu/de/corporate/pub/topicsfactsheetsfactsheetamr>
- EFSA. 2015 European Food Safety Authority. Scientific Committee. Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. EFSA Journal, 13(10).
- EIP AGRI. 2014. Focus Group Protein Crops: Final report. Verfügbar unter https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/fg2_protein_crops_final_report_2014_en.pdf [24.03.2017]
- Enzing, C., Ploeg, M., Barbosa, M., Sijtsma, L. 2014. Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe. IPTS Institute for Prospective technological Studies, JRC, Seville.
- EPRS. 2016a. European Parliamentary Research Service. Insects - soon to be a regulated food? Verfügbar unter: http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2016/583830/EPRS_ATA%282016%29583830_EN.pdf [24.03.2017]
- EPRS. 2016b. European Parliamentary Research Service. Insects as a sustainable source of protein for animal feed. Verfügbar unter http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2016/586642/EPRS_ATA%282016%29586642_EN.pdf [24.03.2017]
- Ertl, P., Knaus, W., Zollitsch, W. 2016. An approach to including protein quality when assessing the net contribution of livestock to human food supply. animal, 10(11), 1883-1889.
- Evans, A. 2009. The feeding of the nine billion. Global Food Security for the 21st century. A Chatham House Report. London, UK. Verfügbar unter <http://www.appg-agscience.org.uk/linkedfiles/ChathamHouseFood%20SecurityJan09.pdf> [27.03.2017]
- Eyerund T. 2015. Fleischkonsum in Deutschland und Europa. Ausgewählte Zahlen und Fakten. Institut der Deutschen Wirtschaft Köln. Verfügbar unter <http://www.iwkoeln.de/studien/iw-reports/beitrag/theresa-eyerund-fleischkonsum-in-deutschland-und-europa-259833> [24.03.2017]
- FAO und ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy
- FAO und WUR. 2013. Edible insects: future prospects for food and feed security. Rome, FAO.
- FAO. 1999. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Duckweed: A tiny aquatic plant with enormous potential for agriculture and environment. Autor: Leng, R.A. Rome, 1999. Verfügbar unter <http://www.fao.org/ag/AGInfo/resources/documents/DW/Dw2.htm> [24.03.2017]
- FAO. 2009. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Food and Agriculture. Rome, 2009. Verfügbar unter <http://www.fao.org/docrep/012/i0680e/i0680e00.htm> [09.06.2017]
- FAO. 2011. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global Food Losses and Food Waste. Extent, Causes and Prevention. Rome, 2011. Verfügbar unter: <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e.pdf> [24.03.2017]
- FAO. 2012a. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Daten erhoben im August 2012. Verfügbar unter: <http://faostat.fao.org/>, Abbildung 3 Verfügbar unter https://na.unep.net/geas/getunepagewitharticleidsript.php?article_id=92 [24.03.2017]
- FAO. 2012b. SAVE FOOD: Global Initiative on Food Loss and Waste Reduction. Verfügbar unter <http://www.fao.org/save-food/resources/keyfindings/infographics/meat/en/> [24.03.2017]
- FAO. 2013. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO Expert Consultation, Dietary Protein Quality Evaluation in Human Nutrition, FAO food and nutrition paper 92. Verfügbar unter http://www.nutrinform.com/biblioteca/libros_digitaless/fao_protein_quality.pdf [08.08.2017]
- FAO. 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Food Insecurity in the World 2015. Rome, 2015. Verfügbar unter <http://www.fao.org/3/a-i4646e.pdf> [24.03.2017]
- FAO. 2016a. Food and Agriculture Organization of the United Nations. International year of pulses. Verfügbar unter: <http://iyp2016.org/> [24.03.2017]
- FAO. 2016b. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The FAO action plan on antimicrobial resistance. Rome: 2016. Verfügbar unter <http://www.fao.org/3/a-i5996e.pdf> [24.03.2017]
- FAO. 2016c. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Health benefits of pulses. Verfügbar unter: <http://www.ahgingos.org/documents/Documents/2016/HEALTH%20BENEFITS%20OF%20PULSES.pdf> [24.03.2017]
- FAO. 2016d. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Influencing food environments for healthy diets. Verfügbar unter <http://www.fao.org/3/a-i6484e.pdf> [24.03.2017]
- Fearnside, P. M. 2001. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. Environmental Conservation, 28(01), 23-38.
- Fleischatlas. 2014. Heinrich-Böll-Stiftung, Bund für Umwelt- und Naturschutz Deutschland und Le Monde diplomatique. Verfügbar unter <https://www.boell.de/de/2014/01/07/fleischatlas-2014> [12.06.2017]

- Fleurence, J. 1999. Seaweed proteins: biochemical, nutritional aspects and potential uses. *Trends in Food Science & Technology*, 10(1), 25-28.
- Forum for the Future. 2016. What is the role of plant-based foods in future diets? Verfügbar unter https://www.forumforthefuture.org/sites/default/files/files/Role_of_plant_based_diets_Oct16_FINAL_2%281%29.pdf [24.03.2017]
- Foyer, C. H., Lam, H. M., Nguyen, H. T., Siddique, K. H., Varshney, R. K., Colmer, T. D. et al. 2016. Neglecting legumes has compromised human health and sustainable food production. *Nature Plants*, 2, 16112.
- Galanakis, C. M. 2012. Recovery of high added-value components from food wastes: conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends in Food Science & Technology*, 26(2), 68-87.
- Gao, Y., Li, D., Liu, Y. 2012. Production of single cell protein from soy molasses using *Candida tropicalis*. *Annals of Microbiology*, 62(3), 1165-1172.
- Gatrell, S., Lum, K., Kim, J., Lei, X. G. 2014. Nonruminant Nutrition Symposium: Potential of defatted microalgae from the biofuel industry as an ingredient to replace corn and soybean meal in swine and poultry diets. *Journal of Animal Science*, 92, 1306-1314.
- Gerber, L. N., Tester, J. W., Beal, C. M., Huntley, M. E., Sills, D. L. 2016. Target cultivation and financing parameters for sustainable production of fuel and feed from microalgae. *Environmental science & technology*, 50(7), 3333-3341.
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C. et al. 2013. Tackling climate change through livestock.
- Gibbs, E. P. J. 2014. The evolution of One Health: a decade of progress and challenges for the future. *Veterinary Record*, 174(4), 85-91.
- Giovannucci, E., Rimm, E. B., Stampfer, M. J., Colditz, G. A., Ascherio, A. et al. 1994. Intake of fat, meat, and fiber in relation to risk of colon cancer in men. *Cancer Research*, 54(9), 2390-2397.
- Givens, D. I. 2005. The role of animal nutrition in improving the nutritive value of animal-derived foods in relation to chronic disease. *Proceedings of the Nutrition Society*, 64(03), 395-402.
- Gloaguen, M., Floc'h, L., Corrent, E., Primot, Y., Van Milgen, J. 2014. The use of free amino acids allows formulating very low crude protein diets for piglets. *Journal of Animal Science*, 92(2), 637-644.
- Goldsmith, P.D. 2015. Economics of Soybean Production, Marketing and Utilization. In: Soybeans – Production, Processing and Utilization. Johnson, L.A., White P.J., Galloway R. (Eds.). pp 107. Elsevier.
- González, A. D., Frostell, B., Carlsson-Kanyama, A. 2011. Protein efficiency per unit energy and per unit greenhouse gas emissions: potential contribution of diet choices to climate change mitigation. *Food Policy*, 36(5), 562-570.
- Gossard, M. H., York, R. 2003. Social structural influences on meat consumption. *Human Ecology Review*, 10(1), 1-9.
- Grau, H. R., Aide, M. 2008. Globalization and land-use transitions in Latin America. *Ecology and Society*, 13(2), 16.
- Greenland D, Gregory PJ, Nye PH. Land resources and constraints to crop production. In: Riley R, ed. *Feeding a World Population of more than Eight Million*. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- Haddad, L., Hawkes, C., Webb, P., Thomas, S., Beddington, J., Waage, J., Flynn, D. 2016. A new global research agenda for food. *Nature*, 540, 30-32.
- Hahn, V., Würschum, T. 2014. Molecular genetic characterization of Central European soybean breeding germplasm. *Plant Breeding*, 133(6), 748-755.
- Hawkes, C., Smith, T.G., Jewell, J., Wardle, J., Hammond, R.A. et al. 2015. Smart food policies for obesity prevention. *The Lancet*. 385: 2410-21.
- Herforth, A., Ahmed, S. 2015. The food environment, its effects on dietary consumption, and potential for measurement within agriculture-nutrition interventions. *Food Security*. 7(3): 505-520.
- Hermann, T. 2003. Industrial production of amino acids by coryneform bacteria. *Journal of Biotechnology*, 104(1), 155-172.
- Herrero, M., Havlík, P., Valin, H., Notenbaert, A., Rufino, M. C. 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.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K. 2007. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), 35-48.
- Holdt, S. L., Kraan, S. 2011. Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology*, 23(3), 543-597.
- Houdebine, L. M. 2009. Production of pharmaceutical proteins by transgenic animals. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases*, 32(2), 107-121.
- House, J. 2016. Consumer acceptance of insect-based foods in the Netherlands: academic and commercial implications. *Appetite*, 107, 47-58.

- IFPRI. 2009. International Food Policy Research Institute. Food Policy Report. Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation (Vol. 21). Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T. et al., Washington DC, USA. Verfügbar unter http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/rome2007/docs/Impact_on_Agriculture_and_Costs_of_Adaptation.pdf [27.03.2017]
- IFPRI. 2015. International Food Policy Research Institute. Global nutrition report: actions and accountability to advance nutrition and sustainable development. Washington DC, USA. Verfügbar unter http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/raf/uploads/files/129654.pdf [27.03.2017]
- IFPRI. 2016. International Food Policy Research Institute. Global Nutrition Report: From Promise to Impact. Washington DC, USA. Verfügbar unter <http://www.ifpri.org/publication/global-nutrition-report-2016-promise-impact-ending-malnutrition-2030> [27.03.2017]
- Irrazábal, T., Belcheva, A., Girardin, S. E., Martin, A., Philpott, D. J. 2014. The multifaceted role of the intestinal microbiota in colon cancer. *Molecular Cell*, 54(2), 309-320.
- Kafle, G. K., Chen, L., Neibling, H., He, B. B. 2015. Field evaluation of wood bark-based down-flow biofilters for mitigation of odor, ammonia, and hydrogen sulfide emissions from confined swine nursery barns. *Journal of Environmental Management*, 147, 164-174.
- Kebreab, E., Hansen, A. V., Strathe, A. B. 2012. Animal production for efficient phosphate utilization: from optimized feed to high efficiency livestock. *Current Opinion in Biotechnology*, 23(6), 872-877.
- Kingston-Smith, A. H., Marshall, A. H., Moorby, J. M. 2013. Breeding for genetic improvement of forage plants in relation to increasing animal production with reduced environmental footprint. *animal*, 7(s1), 79-88.
- Kircher, M., Pfefferle, W. 2001. The fermentative production of L-lysine as an animal feed additive. *Chemosphere*, 43(1), 27-31.
- Klümper, W., Qaim, M. 2014. A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. *PLoS One*, 9(11), e111629.
- Koeth, R. A., Wang, Z., Levison, B. S., Buffa, J. A., Org, E., et al. 2013. Intestinal microbiota metabolism of L-carnitine, a nutrient in red meat, promotes atherosclerosis. *Nature Medicine*, 19(5), 576-585.
- Laborpraxis. 2017. Bühler und Protix gründen Joint Venture für industrielle Insekten-Produktion. 16.1.2017. Verfügbar unter <http://www.laborpraxis.vogel.de/bioanalytik-pharmaanalytik/articles/573465/?cmp=nl-102&uud=1299BBC5-85A5-4927-B18DDB1E18A48901> [24.03.2017]
- Lal, R. 2009. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. *Food Security*, 1(1), 45-57.
- Larsson, S. C., Orsini, N. 2013. Red meat and processed meat consumption and all-cause mortality: a meta-analysis. *American Journal of Epidemiology*, kwt261.
- Le Goff, G., Delarue, J. 2016. Non-verbal evaluation of acceptance of insect-based products using a simple and holistic analysis of facial expressions. *Food Quality and Preference*. 56, 285-293
- Le, Q. B., Nkonya, E., Mirzabaev, A. 2014. Biomass Productivity-Based Mapping of Global Land Degradation Hotspots. ZEF-Discussion Papers (193). Zentrum für Entwicklungsforschung (ZEF), Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn, Deutschland.
- Lesschen, J. P., Van den Berg, M., Westhoek, H. J., Witzke, H. P., Oenema, O. 2011. Greenhouse gas emission profiles of European livestock sectors. *Animal Feed Science and Technology*, 166, 16-28.
- Liu, S., Ni, J. Q., Radcliffe, J. S., Vonderohe, C. E. 2017. Mitigation of ammonia emissions from pig production using reduced dietary crude protein with amino acid supplementation. *Bioresource Technology*, 233, 200-208.
- Lum, K. K., Kim, J., Lei, X. G. 2013. Dual potential of microalgae as a sustainable biofuel feedstock and animal feed. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 4(1), 1.
- MacEvilly C. 2000. Bugs in the system. *Nutrition Bulletin* 25:267-268.
- Makkar, H. P., Tran, G., Heuzé, V., Ankers, P. 2014. State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 1-33.
- Marshall K. 2014. Optimizing the use of breed types in developing country livestock production systems: a neglected research area. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 131(5), 329-340.
- Matassa, S., Boon, N., Pikaar, I., Verstraete, W. 2016. Microbial protein: future sustainable food supply route with low environmental footprint. *Microbial biotechnology*, 9(5), 568-575.
- McMichael, A. J., Powles, J. W., Butler, C. D., Uauy, R. 2007. Food, livestock production, energy, climate change, and health. *The Lancet*, 370(9594), 1253-1263.
- Mekonnen, M. M., Hoekstra, A. Y. 2012. A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401-415.
- Melina V, Craig W, Levin S. Position of the academy of nutrition and dietetics: vegetarian diets. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*. 2016;116(12):1970-80.

- Mensink G., Lage Barbosa, C., Brettschneider A.-K. 2016. Verbreitung der vegetarischen Ernährungsweise in Deutschland. *Journal of Health Monitoring* 2016(2). Verfügbar unter http://www.rki.de/DE/Content/Gesundheitsmonitoring/Gesundheitsberichterstattung/GBEDownloadsJ/JoHM_2016_02_ernaehrung.pdf?__blob=publicationFile [24.03.2017]
- Micha, R., Wallace, S. K., Mozaffarian, D. 2010. Red and processed meat consumption and risk of incident coronary heart disease, stroke, and diabetes mellitus a systematic review and meta-analysis. *Circulation*, 121(21), 2271-2283.
- Murray, C. 2014. Metrics for healthy and sustainable food systems. Presentation at the EAT Forum, Stockholm.
- Naylor, R., Steinfeld, H., Falcon, W., Galloway, J., Smil, V., et al. 2005. Losing the links between livestock and land. *Science*, 310(5754), 1621-1622.
- Nieuwland P. 2016. Insects - feasibility study for use as a human food source. TNO Reports. 2016 R11094. Utrecht. Niederlande. Verfügbar unter https://www.luke.fi/scenoprot/wp-content/uploads/sites/5/2016/10/TNO-2016-R11094_Insects-feasibility-study-for-use-as-a-human-food-source.pdf [27.03.2017]
- Nkonya, E., A. Mirzabaev, J. Von Braun (Eds.) 2015. *Economics of Land Degradation and Improvement: A Global Assessment for Sustainable Development*. Dordrecht: Springer.
- O'Keefe, S. J. 2016. Diet, microorganisms and their metabolites, and colon cancer. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*.
- Olmedilla-Alonso, B., Jiménez-Colmenero, F., Sánchez-Muniz, F. J. 2013. Development and assessment of healthy properties of meat and meat products designed as functional foods. *Meat Science*, 95(4), 919-930.
- Pant, D., Reddy, U. G., Adholeya, A. 2006. Cultivation of oyster mushrooms on wheat straw and bagasse substrate amended with distillery effluent. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 22(3), 267-275.
- Papadopoulos, G., Goulas, C., Apostolaki, E., Abril, R. 2002. Effects of dietary supplements of algae, containing polyunsaturated fatty acids, on milk yield and the composition of milk products in dairy ewes. *Journal of Dairy Research*, 69(03), 357-365.
- Pencharz, P., Jahoor, F., Kurpad, A., Michaelsen, K. F., Slater, C. et al. 2014. Current issues in determining dietary protein and amino-acid requirements. *European Journal of Clinical Nutrition*, 68(3), 285-286.
- Pereira, P. M. D. C. C., Vicente, A. F. D. R. B. 2013. Meat nutritional composition and nutritive role in the human diet. *Meat Science*, 93(3), 586-592.
- Philippoussis, A., Zervakis, G., Diamantopoulou, P. 2001. Bioconversion of agricultural lignocellulosic wastes through the cultivation of the edible mushrooms *Agrocybe aegerita*, *Volvariella volvacea* and *Pleurotus* spp. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 17(2), 191-200.
- Pittman, J. K., Dean, A. P., Osundeko, O. 2011. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresource technology*, 102(1), 17-25.
- Post, M. J. 2012. Cultured meat from stem cells: Challenges and prospects. *Meat Science*, 92(3), 297-301.
- Rajasha, J., Madhusudhan, B., Mahadevaswamy, M., Rao, R.J., Ravishankar, G.A. et al. 2011. Flaxseed and Spirulina in designer eggs: A potent blended functional food and a smart food choice. In: Martirosyan, D.M. (ed.), *Functional foods in health and disease*. Food Science Publisher, Richardson (Dallas), TX. pp. 124-139.
- Ravindra, P. 2000. Value-added food: Single cell protein. *Biotechnology Advances*, 18(6), 459-479.
- Rebello, C. J., Greenway, F. L., Finley, J. W. 2014. A review of the nutritional value of legumes and their effects on obesity and its related co-morbidities. *Obesity Reviews*, 15(5), 392-407.
- Redwood, M. (Ed.). 2009. *Agriculture in urban planning: generating livelihoods and food security*. Taylor & Francis, USA.
- Regulation 2015/2283 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on novel foods, amending Regulation (EU) No 1169/2011 of the European Parliament and of the Council and repealing Regulation (EC) No 258/97 of the European Parliament and of the Council and Commission Regulation (EC) No 1852/2001. (2015). *Official Journal of the European Union* 2015/2283
- Ridoutt, B. G., Sanguansri, P., Freer, M., Harper, G. S. 2012. Water footprint of livestock: comparison of six geographically defined beef production systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(2), 165-175.
- Rotz, C. A. 2004. Management to reduce nitrogen losses in animal production. *Journal of Animal Science*, 82, E119-E137.
- Rutherford, S. M., Fanning, A. C., Miller, B. J., Moughan, P. J. 2015. Protein digestibility-corrected amino acid scores and digestible indispensable amino acid scores differentially describe protein quality in growing male rats. *The Journal of nutrition*, jn-114.
- Sands, D. C., Morris, C. E., Dratz, E. A., Pilgeram, A. L. 2009. Elevating optimal human nutrition to a central goal of plant breeding and production of plant-based foods. *Plant Science*, 177(5), 377-389.
- Sardi, L., Martelli, G., Lambertini, L., Parisini, P., Mordenti, A. 2006. Effects of a dietary supplement of DHA-rich marine algae on Italian heavy pig production parameters. *Livestock Science*, 103(1), 95-103.
- Schaafsma, G. 2012. Advantages and limitations of the protein digestibility-corrected amino acid score (PDCAAS) as a method for evaluating protein quality in human diets. *British Journal of Nutrition*, 108, 333-336.

- Schouteten, J. J., De Steur, H., De Pelsmaeker, S., Lagast, S., Juvinal, J. G. et al. 2016. Emotional and sensory profiling of insect-, plant- and meat-based burgers under blind, expected and informed conditions. *Food Quality and Preference*, 52, 27-31.
- Schüler, J. 2016. Die Biotechnologie-Industrie: Ein Einführungs-, Übersichts- und Nachschlagewerk. S. 277-278. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Schwerin, M. 2014. Nachhaltige Nutztierzucht und -haltung: die zukünftigen Herausforderungen. In Schriftenreihe der H. Wilhelm-Schaumann-Stiftung, Innovative Erzeugung, Konversion und Nutzung agrarischer Biomasse – Zukunftsfeld der Bioökonomie: Beitrag zu den Hülseberger Gesprächen 2014 (S. 85-93). H. Wilhelm-Schaumann-Stiftung: Hamburg.
- Semba, R. D. 2016. The Rise and Fall of Protein Malnutrition in Global Health. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 69(2), 79-88.
- Semba, R. D., Shardell, M., Ashour, F. A. S., Moaddel, R., Trehan, I. et al. 2016. Child stunting is associated with low circulating essential amino acids. *EBioMedicine*, 6, 246-252.
- Shepon, A., Eshel, G., Noor, E., Milo, R. 2016. Energy and protein feed-to-food conversion efficiencies in the US and potential food security gains from dietary changes. *Environmental Research Letters*, 11(10), 105002.
- Siegert, W., Boguhn, J., Maurer, H. P., Weiss, J., Zuber, T., Möhring, J., Rodehutschord, M. 2017. Effect of nitrogen fertilisation on the amino acid digestibility of different triticale genotypes in caecectomised laying hens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(1), 144-150.
- Skov, R. L., Monnet, D. L. 2016. Plasmid-mediated colistin resistance (*mcr-1* gene): three months later, the story unfolds. *Euro Surveillance*, 21(9), 30155.
- Smit, J., Nasr, J., Ratta, A. 1996. Urban agriculture: food, jobs and sustainable cities. New York, USA, 2, 35-37.
- Smith, J., Sones, K., Grace, D., MacMillan, S., Tarawali, S. et al. 2013. Beyond milk, meat, and eggs: Role of livestock in food and nutrition security. *Animal Frontiers*, 3(1), 6-13.
- Smithers, G. W. 2008. Whey and whey proteins—from 'gutter-to-gold'. *International Dairy Journal*, 18(7), 695-704.
- Song, Y., Manson, J. E., Buring, J. E., Liu, S. 2004. A Prospective Study of Red Meat Consumption and Type 2 Diabetes in Middle-Aged and Elderly Women The Women's Health Study. *Diabetes Care*, 27(9), 2108-2115.
- Soussana, J. F., Tallec, T., Blanfort, V. 2010. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 4(03), 334-350.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., Isambert, A. 2006. Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87-96.
- Statistisches Bundesamt. 2016. Viehbestand und tierische Erzeugung. Fachserie 3 Reihe 4. Verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/ViehbestandTierischeErzeugung/ViehbestandtierischeErzeugung2030400167004.pdf;jsessionid=AF6B24AEDC1C3A12677B4BB00DDD955.cae4?__blob=publicationFile [08.08.2017]
- Stehfest, E., Bouwman, L., Van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G., Eickhout, B. et al. 2009. Climate benefits of changing diet. *Climatic Change*, 95(1-2), 83-102.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. 2006. *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*. United Nations Food and Agriculture Organization: Rome, 2006; pp 1-408.
- Suhl, J., Dannehl, D., Kloas, W., Baganz, D., Jobs, S. et al. 2016. Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agricultural Water Management*, 178, 335-344.
- Sukhdev, P., May, P., Müller, A. 2016. Fix food metrics. *Nature*, 540, 33-34.
- Tan, H. S. G., van den Berg, E., Stieger, M. 2016. The influence of product preparation, familiarity and individual traits on the consumer acceptance of insects as food. *Food Quality and Preference*, 52, 222-231.
- Tang, M., He, X., Luo, Y., Ma, L., Tang, X. et al. 2013. Nutritional assessment of transgenic lysine-rich maize compared with conventional quality protein maize. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(5), 1049-1054.
- Ten Brink, B., Van der Esch, S., Kram, T., Van Oorschot, M., Alkemade, J. R. M. et al. 2010. Rethinking global biodiversity strategies: exploring structural changes in production and consumption to reduce biodiversity loss. Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL).
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.
- Townsend, A. R., Howarth, R. W. 2010. Fixing the global nitrogen problem. *Scientific American*, 302(2), 64-71.
- Trewavas A. 2002. Malthus foiled again and again. *Nature*, 418: 668-70.
- Tscharntke, T., Clough, Y., Wanger, T. C., Jackson, L., Motzke, I. 2012. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation*, 151(1), 53-59.

- Tuomisto, H. L. Teixeira de Mattos, M. J. 2011. Environmental impacts of cultured meat production. *Environmental science & technology*, 45(14), 6117-6123.
- UBA. 2015. Umweltbundesamt. Gefährdung der Biodiversität. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/gefaehrdung-der-biodiversitaet> [15.06.2017]
- UBA. 2016. Umweltbundesamt. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016. Verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_23_2016_nir_2016_berichterstattung_unter_der_klimarahmenkonvention.pdf [24.03.2017]
- UBA. 2017. Umwelt Bundesamt. Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft und Stickstoffüberschuss Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/landwirtschaft/naehrstoffeintraege-aus-der-landwirtschaft#textpart-1> [15.06.2017]
- UNEP. 2012. United Nations Environment Programme. Growing Greenhouse Gas Emissions Due to Meat Production. Verfügbar unter https://na.unep.net/geas/getunepagewitharticleidscript.php?article_id=92 [24.03.2017]
- USDA. 2016. United States Department of Agriculture. Economic Research Service. Major Factors Affecting Global Soybean and Products Trade Projections. 2. Mai 2016. Verfügbar unter <https://www.ers.usda.gov/amber-waves/2016/may/major-factors-affecting-global-soybean-and-products-trade-projections/> [18.05.2017]
- Van Boeckel, T. P., Brower, C., Gilbert, M., Grenfell, B. T., Levin, S. A. et al. 2015. Global trends in antimicrobial use in food animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(18), 5649-5654.
- Van der Spiegel, M., Noordam, M. Y., Fels-Klerx, H. J. 2013. Safety of novel protein sources (insects, microalgae, seaweed, duckweed, and rapeseed) and legislative aspects for their application in food and feed production. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(6), 662-678.
- van der Weele, C., Tramper, J. 2014. Cultured meat: every village its own factory?. *Trends in Biotechnology*, 32(6), 294-296.
- Van Huis, A., Van Gurp, H., Dicke, M. 2014. *The insect cookbook: food for a sustainable planet*. Columbia University Press.
- Veldkamp T., van Duinkerken G., van Huis A., Lakemond C.M.M., Ottewanger E. et al. 2012. Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets - a feasibility study. Wageningen UR Livestock Research. Niederlande.
- Velu, G., Ortiz-Monasterio, I., Cakmak, I., Hao, Y., Singh, R. P. 2014. Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. *Journal of Cereal Science*, 59(3), 365-372.
- Verbeke, W. 2015. Profiling consumers who are ready to adopt insects as a meat substitute in a Western society. *Food Quality and Preference*, 39, 147-155.
- Verbeke, W., Marcu, A., Rutsaert, P., Gaspar, R., Seibt, B. et al. 2015a. 'Would you eat cultured meat?': Consumers' reactions and attitude formation in Belgium, Portugal and the United Kingdom. *Meat Science*, 102, 49-58.
- Verbeke, W., Sans, P., Van Loo, E. J. 2015b. Challenges and prospects for consumer acceptance of cultured meat. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(2), 285-294.
- Von Braun, J. 2015. *Welternährung und Nachhaltigkeit – Herausforderungen und Strategien für das 21. Jahrhundert*. Carl-von-Carlowitz-Reihe. oekom verlag, München.
- VTT. 2017. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. VTT develops raw materials for meatballs and falafel from mealworms and crickets. 19. Januar 2017. Verfügbar unter <http://www.vttresearch.com/media/news/vtt-develops-raw-materials-for-meatballs-and-falafel-from-mealworms-and-crickets> [24.03.2017]
- Walsh, M. J., Van Doren, L. G., Sills, D. L., Archibald, I., Beal, C. M. et al. 2016. Algal food and fuel coproduction can mitigate greenhouse gas emissions while improving land and water-use efficiency. *Environmental Research Letters*, 11(11), 114006.
- Wathes, C. M., Kristensen, H. H., Aerts, J.-M. Berckmans, D. 2008. Is precision livestock farming an engineer's daydream or nightmare, an animal's friend or foe, and a farmer's panacea or pitfall?. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008(64), S. 2-10.
- WBA und WBW. 2016. Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz und Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik. Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung. Gutachten. Verfügbar unter http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/Klimaschutzgutachten_2016.pdf?__blob=publicationFile [24.03.2017]
- WBA. 2015. Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMEL. Wege zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung: Gutachten. Verfügbar unter http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/Gutachten-Nutztierhaltung.pdf?__blob=publicationFile
- Welch, R. M., Graham, R. D. 2004. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *Journal of Experimental Botany*, 55(396), 353-364.
- Wellesley, L., Happer, C., Froggatt, A. 2015. *Changing Climate, Changing Diets*. Chatham House. Verfügbar unter https://www.chathamhouse.org/sites/files/chathamhouse/publications/research/CHHJ3820%20Diet%20and%20climate%20change%2018.11.15_WEB_NEW.pdf [24.03.2017]

- Westhoek, H., Rood, T., van den Berg, M., Janse, J., Nijdam, D., Reudink, M., Stehfest, E. 2011. The Protein Puzzle. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.
- Westlake, R. 1986. Large-scale Continuous Production of Single Cell Protein. *Chemie Ingenieur Technik*, 58(12), 934-937.
- WHO. 2017. World Health Organisation. Nutrition for older persons. Verfügbar unter <http://www.who.int/nutrition/topics/ageing/en/> [19.05.2017]
- Wiebe, M. G. 2004. Quorn™ Myco-protein-Overview of a successful fungal product. *Mycologist*, 18(01), 17-20.
- Wolf, O., Pérez-Domínguez, I., Rueda-Cantuche, J. M., Tukker, A., Kleijn, R. et al. 2011. Do healthy diets in Europe matter to the environment? A quantitative analysis. *Journal of Policy Modeling*, 33(1), 8-28.
- WOR. 2013. World Ocean Review. Aquakultur – Proteinlieferant für die Welt. Verfügbar unter <http://worldoceanreview.com/wor-2/aquakultur/proteinlieferant-fuer-die-welt/> [09.08.2017]
- World Bank 2014. World Bank International Comparison Program Database, online, accessed 15 September 2015 at <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.CD>. (Zitierung aus Wellesley et al. 2015)
- Wu, G., Bazer, F. W., Cross, H. R. 2014. Land-based production of animal protein: impacts, efficiency, and sustainability. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1328(1), 18-28.
- Yen, A. L. 2009. Edible insects: Traditional knowledge or western phobia?. *Entomological Research*, 39(5), 289-298.
- Young, V. R., Pellett, P. L. 1994. Plant proteins in relation to human protein and amino acid nutrition. *The American journal of clinical*
- Zeng, Y., Bian, D., Xie, Y., Jiang, X., Li, X. et al. 2017. Utilization of food waste hydrolysate for microbial lipid and protein production by *Rhodosporidium toruloides* Y2. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 92(3), 666-673. *Nutrition*, 59(5), 1203S-1212S.
- Zhao, F. J., Shewry, P. R. 2011. Recent developments in modifying crops and agronomic practice to improve human health. *Food Policy*, 36, S94-S101.
- Zhou Z., Tian, W., Wang, J., Liu H., Cao, L. 2012. Food Consumption Trends in China – April 2012. Report submitted to the Australian Government Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. Verfügbar unter <http://www.agriculture.gov.au/SiteCollectionDocuments/agriculture-food/food/publications/food-consumption-trends-in-china/food-consumption-trends-in-china-v2.pdf>