

Nachhaltige Bereitstellung von biobasierten agrarischen Rohstoffen

Aktualisierte Version, April 2015

Backhaus, G.F., Broers, L., Kögel-Knabner, I., Schwerin, M., Thrän, D.
Kontakt über die Geschäftsstelle des Bioökonomierates

Präambel

Das vorliegende Hintergrundpapier ist im Zuge der Recherchearbeiten des Bioökonomierates entstanden. Zweck dieses Papiers ist die Beschreibung des aktuellen Wissensstandes und die Identifikation 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 theoretischen Basis, auf der die Arbeitsschritte und Empfehlungen des Rates aufbauen. Unter Berücksichtigung der dynamischen weltweiten Entwicklung der Bioökonomie, werden die hier zusammengefassten Analysemethoden, Erkenntnisse, Datenquellen und Forschungsagenden ständig aktualisiert und erweitert. Hintergrundpapiere stehen in der Verantwortung der genannten Autoren.

Zusammenfassung

Biobasierte Rohstoffe sind eine der Grundlagen der Bioökonomie. Bei zunehmender Ausdehnung der Bioökonomie können die verschiedenen Verwertungsrichtungen (food, feed, fibre, fuel, flowers, fun) in eine noch stärkere Nutzungskonkurrenz geraten. Daher ist eine Rohstoffstrategie zu entwickeln, die dem Primat „food first“ folgen sollte. Sie hat außerdem die nachhaltige Nutzung der Ressourcenbasis (Boden, Wasser, Nährstoffe, Biodiversität) zu gewährleisten und sollte im Einklang mit den gesellschaftlichen Bedarfvorstellungen stehen. Um diese Ziele zu erreichen, ist dreierlei erforderlich: (i) die nachhaltige und effiziente Produktion biobasierter Rohstoffe zu steigern, (ii) die Verwertung der biobasierten Rohstoffe effizienter und bedarfsgerechter zu gestalten sowie (iii) Rahmenbedingungen zu etablieren, die eine nachhaltige Entwicklung der Bioökonomie national und international absichern. Eine nachhaltige Bereitstellung von biobasierten agrarischen Rohstoffen sollte das Ziel haben, dass Deutschland einen bestmöglichen Beitrag zur Deckung des weltweiten Bedarfs an biobasierten Rohstoffen liefert. Dies beinhaltet:

- Die Steigerung der Produktion biobasierter Rohstoffe: Für die nachhaltige Intensivierung¹ wird

¹ „Sustainable Intensification“ beschreibt eine nachhaltige Landwirtschaft, die den Ertrag steigert, ohne Anbauflächen auszuweiten und ohne die Umwelt zusätzlich zu belasten. ³

eine technologische Weiterentwicklung entlang der gesamten Primärproduktionskette benötigt: Pflanzen- und Tierzüchtung, Pflanzenphysiologie und -ernährung, Pflanzenbau und Tierhaltung, Phytomedizin und Veterinärmedizin sowie Bodenmanagement und Landtechnik. Von besonderer Bedeutung sind die strategische, systematische Verknüpfung der Aktivitäten sowie der Ausbau der Forschungsinfrastruktur. Dazu gehört auch die Entwicklung von neuen Nutzungs- und Erhaltungskonzepten für die funktionale Biodiversität^{II}.

- Effizientere und bedarfsgerechte Verwertung der biobasierten Rohstoffe: Nach wie vor treten hohe Verluste bei der Verwertung auf. Die Erhöhung der Verwertungseffizienz der biogenen Rohstoffe stellt deshalb in allen Verwertungsrichtungen eine wichtige Herausforderung dar. Die Ansatzpunkte hierzu beginnen bereits auf dem Feld bzw. im Stall, erstrecken sich dann über die Lagerhaltung, die Verarbeitung, den Vertrieb bis zur Nutzung durch Verbraucher. Das Spektrum der Lösungsmöglichkeiten umfasst sowohl technologische als auch organisatorische Ansätze.
- Rahmenbedingungen: Die wachsende Erzeugung und Nutzung biobasierter Rohstoffe kann zu einer zunehmenden Belastung der Ökosysteme führen. Der Schutz der Ökosysteme ist daher eine weitere wichtige Forderung an eine nachhaltige Rohstoffstrategie. Hierfür sind unterschiedliche Mechanismen denkbar, z. B. internationale Abkommen zum Schutz entsprechender Flächen, Zertifizierungssysteme für Rohstoffe oder bilaterale Abkommen, in denen individuelle Kriterien festgelegt werden. Die verschiedenen Ansätze sind durch unterschiedliche Vor- und Nachteile gekennzeichnet. Es sollte geprüft werden, inwieweit die jeweiligen Produktions-, Umwelt- und Sozialstandards für alle Einsatzbereiche eingehalten werden können, damit auch die indirekten Landnutzungseffekte berücksichtigt werden. Es ist deshalb geboten, im internationalen Verbund eine Rohstoffstrategie für die Bioökonomie zu entwickeln. Hier besteht umfassender Forschungsbedarf. Dieser betrifft (a) die Abschätzung der Rohstoffmengen, die zur Substitution der fossilen Rohstoffe im stofflichen Bereich benötigt werden, (b) die Analyse der Expansionspotentiale der Weltagrarwirtschaft zur Deckung des Bedarfs im stofflichen und energetischen Bereich, (c) die Entwicklung geeigneter Politikoptionen zur Sicherstellung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung der Bioökonomie (einschließlich Handelsfragen). Die Forschungsarbeiten sollen schwerpunktmäßig die weltweite Situation in den Blick nehmen und dabei die regionale Differenzierung ebenso berücksichtigen wie die Welternährungssituation.

^{II} Die funktionale Biodiversität bezieht sich nicht nur auf die genetische Vielfalt, sondern auch auf den Erhalt von Arten beziehungsweise ihren funktionalen Einfluss auf die Stabilität und Leistung von Ökosystemen.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	4
1.1 ZIELSETZUNG	5
1.2 PRODUKTIVITÄT NACHHALTIG STEIGERN	5
2. NACHFRAGE: ANALYSE DER AKTUELLEN SITUATION	7
2.1 NAHRUNGSMITTEL (FOOD).....	7
2.2 TIERFUTTER (FEED).....	8
2.3 STOFFLICHE NUTZUNG (FIBRE)	9
2.4 ENERGETISCHE NUTZUNG (FUEL)	9
2.5 LEBENSUMFELD- UND FREIZEITGESTALTUNG (FLOWERS, FUN)	10
3. ENTWICKLUNG DER PRODUKTIONSFAKTOREN.....	11
3.1 VERFÜGBARE FLÄCHEN	11
3.2 BODENQUALITÄT	12
3.3 WASSER	12
3.4 BIOTISCHE FAKTOREN	13
3.5 BIODIVERSITÄT	13
3.6 KLIMATISCHE BEDINGUNGEN	14
3.7 NATUR- UND UMWELTSCHUTZ.....	14
3.8 EXTERNE MITTEL ZUR KULTIVIERUNG	15
4. GRUNDLAGEN	16
4.1 NACHHALTIGE STEIGERUNG DER ERTRÄGE	16
4.1.1 <i>Pflanzenzüchtung</i>	17
4.1.2 <i>Individualisierte Tierhaltung</i>	21
4.1.3 <i>Phytomedizin</i>	22
4.1.4 <i>Resilienzforschung</i>	23
4.2 STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ	24
4.3 POLITISCHE UND RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN.....	26
4.4 ROHSTOFFSICHERUNGSSTRATEGIEN.....	27
4.5 STRATEGISCHE BEGLEITMASSNAHMEN	29
5. EMPFEHLUNGEN	30
5.1 STEIGERUNG DER PRODUKTION	30
5.2 NUTZUNGS- UND ERHALTUNGSKONZEPTE DER BIODIVERSITÄT	30
5.3 METHODEN DER ZÜCHTUNGSFORSCHUNG.....	31
5.4 PRÄZISIONSLANDWIRTSCHAFT.....	32
5.5 VERBESSERUNG DER BODENFRUCHTBARKEIT	32
5.6 STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ	33
5.7 POLITISCHE UND RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN.....	33
5.8 DATENBASIS UND MONITORING-STRUKTUR	34
5.9 ALLGEMEINE EMPFEHLUNGEN.....	34

1. Einleitung

Mit der „Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030“ hat die Bundesregierung die Grundlagen für eine biobasierte Wirtschaft in Deutschland geschaffen, deren „vielfältiges Angebot die Welt ausreichend und gesund ernährt sowie mit hochwertigen Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen versorgt“.¹ Grundlage dieser Vision sind „biobasierte Rohstoffe“. Sie bilden als nachwachsende Rohstoffe, d. h. also biogene, nicht-fossile Stoffe die Basis der bioökonomischen Wertschöpfung. Biobasierte Rohstoffe werden als Nahrungs- und Futtermittel sowie energetisch, industriell und kulturell verwendet. Sie umfassen alle vom Menschen nutzbaren biologischen Ressourcen. Dazu gehören Pflanzen und Mikroorganismen – und auch Tiere, denen in Bezug auf Züchtung, Haltung und Verwertung ein besonderer ethischer Anspruch zukommt.

Derzeit werden auch alternative Kohlenstoffquellen erforscht, etwa Kohlendioxid aus Rauchgas. Diese neuen Zugänge zu Kohlenstoff – vor allem für die stoffliche Nutzung – können das derzeitige Spektrum der Kohlenstoffquellen erweitern. Allerdings befinden sie sich noch im Forschungsstadium. Ihr Potential ist derzeit unklar. Daher werden sie nicht in die folgenden Überlegungen einbezogen.

Es ist davon auszugehen, dass die Nachfrage nach biobasierten Rohstoffen weltweit steigen wird. Bis zum Jahr 2050 erhöht sich allein der Bedarf an Lebensmitteln um mindestens 60%². Gründe dafür sind eine steigende Weltbevölkerung sowie die wachsende weltweite Mittelschicht, die nach weiter verarbeiteten bzw. höherwertigen Lebensmitteln, wie etwa Fleisch, verlangt. Die Autoren sind sich bewusst, dass mit den gegenwärtigen Forschungsaktivitäten zu Algen, künstlicher Photosynthese und der Bereitstellung regenerativer, nicht-biogener Kohlenstoffquellen mittelfristig möglicherweise Alternativen zu gegenwärtigen regenerativen Kohlenstoffquellen verfügbar sein können. Diese werden hier nicht betrachtet, weil Art und Umfang dieser Innovationen nicht abschätzbar sind und damit eine Rohstoffstrategie für die Bioökonomie die gegenwärtigen Limitierungen zentral berücksichtigen muss.

Damit werden sich Flächen- und Nutzungskonkurrenzen in Bezug auf die verschiedenen Verwendungsarten verschärfen: Food (Nahrung), Feed (Futter), Fuel (Treibstoffe), Fibre (stoffliche Nutzung) sowie die in diesem Konzept einbezogenen Flowers and Fun (Lebensumfeld- und Freizeitgestaltung) als wichtige Determinante des menschlichen Wohlbefindens. Die Erzeugung und Nutzung biobasierter Rohstoffe wird vor allem von marktwirtschaftlichen Parametern wie Nachfrage oder Preis bestimmt. Der steigenden Nachfrage muss bei schrumpfenden Produktionsressourcen begegnet werden. So begrenzen biotische und abiotische Faktoren die Produktion. Hier sind die limitierte Flächen- und Wasserverfügbarkeit, zurückgehende Bodenqualität und Biodiversität, das Aufkommen von Krankheiten und Schädlingen, schrumpfende genetische Ressourcen sowie klimatische Faktoren zu nennen, welche die Erträge je nach Standort und Jahr einschränken.

Die Leitplanken der vorliegenden Strategie sind das Primat der Welternährung sowie die nachhaltige und bedarfsgerechte Bewirtschaftung der vorhandenen landwirtschaftlichen Flächen. Die vorliegende Strategie basiert daher auf dem Prinzip der nachhaltigen Intensivierung (sustainable Intensification)³, die im Folgenden näher beschrieben wird.

1.1 Zielsetzung

Mit der „nachhaltigen Bereitstellung von biobasierten agrarischen Rohstoffen“ soll die weltweit wachsende Nachfrage nach biobasierten Rohstoffen ressourcenschonend und -effizient sowie natur- und umweltgerecht und in Hinsicht auf Quantität und Qualität bedarfsgerecht gedeckt werden. Diese Strategie muss in all ihren Komponenten auf eine ganzheitliche Nachhaltigkeit ausgerichtet sein. Dies sollte sich in der gleichberechtigten Berücksichtigung ökologischer, ökonomischer/technologischer und sozialer Belange spiegeln. Aus ökologischer Perspektive geht es darum, Auswirkungen der Rohstoffstrategie auf Atmosphäre, Umwelt und damit den Naturhaushalt zu minimieren⁴. Dies beinhaltet eine nachhaltige Nutzung der begrenzten Georessourcen Boden und Wasser sowie von Nährstoffen und der Vielfalt von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen.

Prinzipiell kann die steigende Nachfrage nach biobasierten Rohstoffen nicht nur über eine Mehrproduktion gedeckt werden. Effizienzsteigerungen in den etablierten Wertschöpfungsketten werden dazu beitragen müssen, dass die verfügbaren biobasierten Rohstoffe besser und effizienter genutzt werden. Dies beinhaltet das Schließen von Stoffkreisläufen, die Vermeidung von Nachernteverlusten oder die Rückgewinnung von Nähr- und Mineralstoffen. Die abschließend unter Punkt 5. abgeleiteten Forschungsempfehlungen für die Bundesregierung berücksichtigen dies. Sie beziehen sich vor allem auf die Produktionsseite und sollen es Deutschland ermöglichen, einen bestmöglichen Beitrag zur Steigerung der globalen Produktion biobasierter Rohstoffe zu leisten. Eine gute Forschungsförderungsstrategie sollte jedoch auch die Nachfrageseite berücksichtigen, die in diesem Dokument nicht primär behandelt wird. Die am Ende des Dokumentes ausgesprochenen Forschungsempfehlungen sind eine Weiterentwicklung der bisherigen Empfehlungen des Bioökonomierates, die sich vor allem auf die Pflanzenforschung selbst bezogen haben⁵.

1.2 Produktivität nachhaltig steigern

Um landwirtschaftliche Erträge auszubauen, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Ausweitung der Ackerflächen oder eine Steigerung der Erträge auf den bisher bewirtschafteten Böden. Ob die weltweite Ackerfläche von etwa 1,5 Milliarden Hektar überhaupt ausgeweitet werden kann, ist derzeit umstritten.⁶ Es besteht die Gefahr, dass die Inkulturnahme zusätzlich bebaubaren (oder landwirtschaftlich nutzbaren) Landes mit einer weiteren Erhöhung von Treibhausgasen, dem Verlust von Ökosystemen, einer Einschränkung der Biodiversität und auch mit dem Verlust menschlichen Lebensraums verbunden ist. Als wichtigster Ansatzpunkt erscheint daher die nachhaltige Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion³. Ihre Schlüsselprinzipien sind:

- 1) **Beständigkeit:** die Fähigkeit, zuverlässig und langfristig (über Generationen hinweg) möglichst hohe Erträge zu liefern.
- 2) **Elastizität/Anpassungsfähigkeit:** die Fähigkeit, biotische und abiotische Stressfaktoren strukturell und ohne Qualitätseinbußen zu tolerieren oder sogar davon zu profitieren.
- 3) **Autarkie:** die Fähigkeit, innerhalb von Systemgrenzen mit den vorhandenen Ressourcen (Produktionsfaktoren) die gewünschten hohen Erträge zu liefern

- 4) **Naturerhaltung:** die Fähigkeit, die gewünschten Produkte (Food, Feed, Fiber, Fuel) zu produzieren, ohne das Funktionieren der Ökosystemdienstleistungen zu beeinträchtigen und die natürlichen Ressourcen (Biodiversität, Boden, Wasser) zu erschöpfen.

Demnach ist grundsätzlich jedes System nicht nachhaltig, das auf nicht erneuerbare Stoffe angewiesen ist bzw. die gewünschten Erträge nur mit zunehmender Fläche erwirtschaften kann und dabei die Natur irreversibel schädigt. Damit sind grundsätzlich nur solche Techniken akzeptabel, die zu einer Produktivitätssteigerung führen und dabei weder die Natur noch das Klima schädigen. Solche Produktionssysteme müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- 1) Geeignete Pflanzensorten oder Tierzuchtungen müssen in Bezug auf die eingesetzten Mittel zu ihrer Kultivierung möglichst produktiv sein.
- 2) Der Einsatz externer Mittel (z. B. Dünger) zur Kultivierung ist zu vermeiden.
- 3) Nährstoffrecycling, biologische Stickstofffixierung dienen der ausgewogenen Nährstoffversorgung, der Einsatz von Allelochemikalien als Produkte des pflanzlichen Sekundärstoffwechsels sowie die Einbeziehung von Räuber-Beute-Beziehungen (Predation) oder Symbiosen dienen der Schädlings- und Krankheitsabwehr.
- 4) Minimierung von Techniken, welche die Natur schädigen.
- 5) Der Einsatz menschlichen Wissens zur Weiterentwicklung landwirtschaftlicher Technologie.
- 6) Quantifizierung und Minimierung von Umwelteffekten, wie etwa der Emission von Treibhausgasen, Wasserzugang, Einschränkung der Biodiversität oder der Ausbreitung von Schädlingen, Unkräutern oder Pathogenen.
- 7) Um langfristig bestehen zu können, müssen Produktionssysteme auch sozial nachhaltig gestaltet werden.⁷

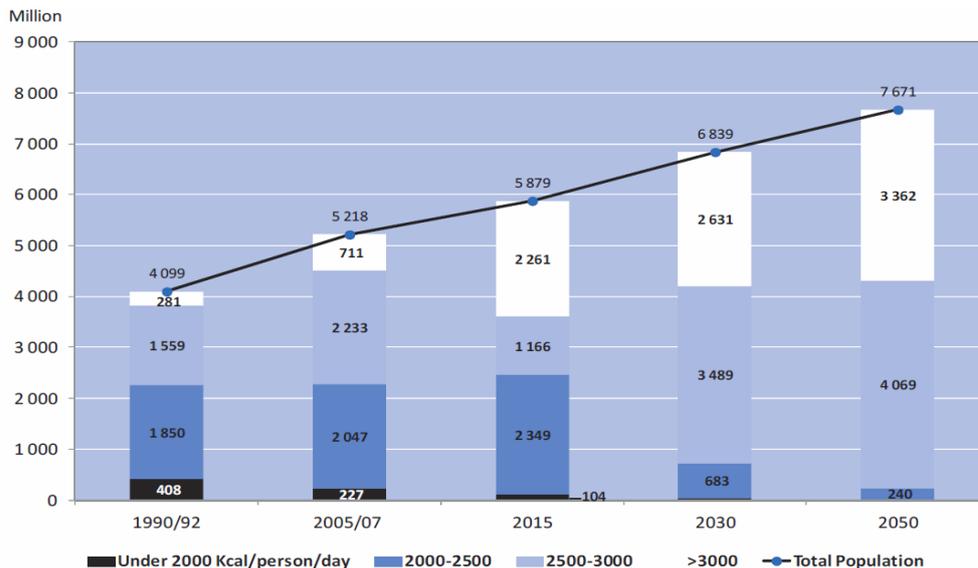
Dem Konzept der „Sustainable Intensification“ liegt letztlich das Ziel zugrunde, Produktion und Ressourcenaufwand zu entkoppeln. Dies ist auch ein Ziel der Bioökonomie sowie der vorliegenden Strategie. Die Entkopplung von materiellem Aufwand und Ertrag ist jedoch ein Idealzustand, der mit den zur Verfügung stehenden Techniken heute noch nicht erreicht werden kann. Erfolgreiche Konzepte auf dem Weg in die Bioökonomie sollten zwischen den Zielen der Nachhaltigkeit und der erforderlichen Produktionssteigerung ausgleichen. Hier besteht die Chance, sowohl von der konventionellen als auch von der ökologischen Landwirtschaft zu lernen. Die Steigerung der Ressourceneffizienz sollte auf allen Ebenen der Produktion und der Nutzung biobasierter Rohstoffe (vom Einsatz der Inputfaktoren bis zum endgültigen Konsum biobasierter Güter) angestrebt werden. Dafür ist eine kontinuierliche Forschung unabdingbar. Eine landwirtschaftliche Erzeugungsstrategie darf dabei nicht grundsätzlich an den Vorstellungen und Bedürfnissen von Bevölkerung, Kunden, Verbrauchern und Nutzern vorbeigehen. Die Menschen müssen integraler Bestandteil der Strategie sein. Sie sind nicht nur Verbraucher von Gütern, von denen sie eine bestimmte Qualität und Preisgestaltung verlangen, sondern sie sind auch indirekte Nutzer von Agrarflächen, beispielsweise als Spaziergänger, Anrainer, Nutzer der Wohlfahrtsleistungen von Kulturpflanzen (z. B. Parkanlagen, Gärten, Großbäumen, Strukturelemente im öffentlichen Grün). Konflikte mit der landwirtschaftlichen Erzeugung ergeben sich häufig zuerst an diesen Schnittstellen.

2. Nachfrage: Analyse der aktuellen Situation

Wie bereits beschrieben, werden biobasierte Rohstoffe zu verschiedenen Zwecken genutzt, die teilweise miteinander konkurrieren. Im Folgenden werden die einzelnen Nutzungsarten von biologischen Rohstoffen in Bezug zu ihrem (zukünftigen) Bedarf analysiert. Um der Knappheit an nachwachsenden Rohstoffen zu begegnen, sind auch Effizienzverbesserungen wichtige Instrumente. Diese werden im Abschnitt 4.3 diskutiert.

2.1 Nahrungsmittel (Food)

Bereits heute kann der weltweite Bedarf an Lebensmitteln nicht befriedigt werden. So sind momentan etwa 870 Millionen Menschen chronisch unterernährt.⁸ Es ist zu erwarten, dass die Nachfrage nach Lebensmitteln weiter steigen wird. Zentrale Ursachen dafür liegen im weltweiten Bevölkerungswachstum einerseits und einem zunehmenden Pro-Kopf-Verbrauch an Nahrungsmitteln andererseits – insbesondere in den Schwellenländern. Nach Berechnungen der Vereinten Nationen wird die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2050 auf 9,6 Milliarden Menschen angewachsen sein. Gleichzeitig führen steigende Pro-Kopf-Einkommen in den Entwicklungs- und Schwellenländern zu veränderten Ernährungspräferenzen – etwa zu einem höheren Fleischkonsum⁹ und einem höheren Verbrauch verarbeiteter Lebensmittel. Es wird davon ausgegangen, dass der durchschnittliche Pro-Kopf-Fleisch-Konsum ansteigen wird.¹⁰ Angesichts dieser Entwicklungen wird die globale Nachfrage nach Nahrungsmitteln laut Annahmen der FAO (2011)¹¹ bis 2050 um 60% ansteigen und damit prozentual stärker anwachsen als die Weltbevölkerung. Abb. 1 verdeutlicht diesen Trend in den Entwicklungsländern. Solche Prognosen sind jedoch mit einer erheblichen Unsicherheit verbunden, da der Konsum von Fleisch in den Industrieländern wieder zu sinken scheint¹².



Source: Alexandratos and Bruinsma (2012).

Abbildung 1: Kalorien-Verbrauch/Kopf/Tag in Entwicklungsländern (Alexandratos/Bruinsma 2012, S. 26).

2.2 Tierfutter (Feed)

Die weltweit steigende Nachfrage nach tierischen Produkten hat eine zunehmende Nachfrage nach Futtermitteln¹³ (wie z. B. Getreide und Soja) und Boden (Weidewirtschaft)¹⁴ zur Folge. Diese Nachfragesteigerung ist umso gravierender, als dass die Produktion von tierischen Nahrungsmitteln mit einem deutlich höheren Ressourcenverbrauch als die von pflanzlicher Nahrung einhergeht.¹⁵ So werden für die Produktion von einer Kalorie Fleisch im Schnitt rund zehn Kalorien Getreide verbraucht.¹⁶ Ähnlich verhält es sich beim Wasserverbrauch. Während für die Herstellung von 1 kg Fleisch über 15.000 l „virtuelles Wasser“ benötigt werden, sind es für 1 kg Weizen nur ca. 1.300 l.¹⁷ Die im Mittel je Einwohner erforderliche Fläche zur Erzeugung von Lebensmitteln tierischer Herkunft ist somit umso höher, je mehr Protein tierischer Herkunft weltweit verzehrt wird und je höher der Fleischanteil an dieser Proteinmenge ist. Bereits heute wird der weitaus größte Teil der weltweit geernteten landwirtschaftlichen Rohstoffe zur Produktion von Futtermitteln für die Nutztierhaltung (58%) eingesetzt. Hochrechnungen zeigen, dass bei gleichem Intensitätsniveau die zur Bedarfsdeckung notwendige Steigerung der Lebensmittelproduktion aus globaler Sicht doppelt so viel Futtermenge wie gegenwärtig erfordert.¹⁸

2.3 Stoffliche Nutzung (Fibre)

Auch die Industrie nutzt biobasierte Rohstoffe. Nach einer Studie des nova-Institutes wurden 2008 rund 14% (inklusive Holz) der weltweit geernteten Forst- und Agrarbiomasse stofflich genutzt.¹⁹ Die industriellen Einsatzmöglichkeiten für biobasierte Rohstoffe sind bereits heute vielfältig. Neben den traditionellen Bereichen, wie der Holz- und Papierindustrie, finden biobasierte Rohstoffe vor allem in der chemisch-technischen und der pharmazeutischen Industrie Anwendung – unter anderem bei der Verwertung in Bioraffinerien, der Herstellung von Tensiden, Kunststoffen, Schmierstoffen und Hydraulikflüssigkeiten. In Deutschland sind derzeit rund 13% der verarbeiteten Rohstoffe in der Chemie biologischer Herkunft²⁰. Sie werden vor allem zu hochwertigen Spezialchemikalien verarbeitet, die ein Wachstumstreiber der chemischen Industrie sind. Schätzungen gehen davon aus, dass mit zunehmender Weiterentwicklung der Life Sciences die Bedeutung der nachwachsenden Rohstoffe zunehmen wird, auch wenn derzeit angesichts sinkender Rohölpreise ein umfassender Rohstoffwandel nicht unmittelbar bevorsteht²¹.

2.4 Energetische Nutzung (Fuel)

Biobasierte Rohstoffe sind ein wichtiger erneuerbarer Energieträger. So stammen in Deutschland 65% der erzeugten Primärenergie aus biobasierten Rohstoffen. Weltweit werden sogar 80% der regenerativen Energien aus biobasierten Rohstoffen erzeugt. Dies geschieht immer noch überwiegend in sehr ineffizienten Konversionssystemen mit Wirkungsgraden unter 20% (inklusive Wärme). Im Rahmen der Transformation des Energiesystems in Deutschland kommt biobasierten Rohstoffen eine wichtige Rolle bei der Bewältigung von Residuallasten zu, die durch die fluktuierende Bereitstellung von Strom aus Sonne und Wind entstehen, da Bioenergie neben der Wasserkraft unter den erneuerbaren Energien als einzige speicherfähig ist. Der größte Anteil der Bioenergie wird bisher auf der Basis von Holz erzeugt, das sowohl zur Bereitstellung von Wärme und Strom sowie zukünftig vermutlich auch von Kraftstoffen dient.²² Die Produktion von Bioenergie, insbesondere von Energiepflanzen, wird allerdings zunehmend kritisch gesehen. So führt die energetische Verwertung zu einem Nutzungskonflikt zwischen der Produktion von Nahrungsmitteln und der stofflichen bzw. energetischen Nutzung, während sie gleichzeitig nur einen begrenzten Beitrag zur Energieversorgung liefern kann: In Deutschland wurden 2012 auf mehr als 2,52 Mio. ha (gut 21% der Ackerfläche) nachwachsende Rohstoffe angebaut, die zumeist für die energetische Nutzung verwendet wurden (siehe Abb. 2).²³ Damit können jedoch nicht mehr als 7,6% des deutschen Energiebedarfs gedeckt werden. Weltweit sind es weniger als 1%. Um einen weiteren Prozentpunkt des Weltenergiebedarfs zu decken, wäre eine zusätzliche Ackerfläche in der Größenordnung von 50 Mio. ha vonnöten.²⁴ Künftig ist daher vordringlich die Frage zu beantworten, in welcher Form die Vorzüge der Bioenergie bei der Transformation des Energiesystems sinnvoll genutzt werden können. Dies beinhaltet nicht zuletzt klare energiepolitische Langfristziele, an denen diese Ausrichtung erfolgen sollte.²⁵

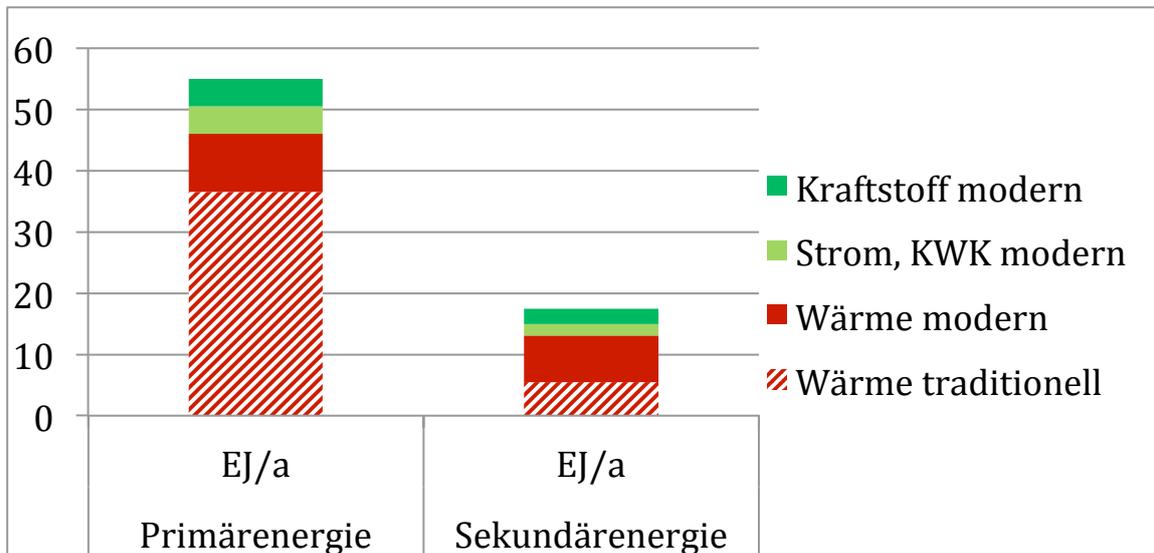


Abbildung 2: Bioenergiebereitstellung weltweit 2012 (Quelle: UFZ^{26,27,28}), Primärenergie in Exajoule pro Jahr (EJ/a)

2.5 Lebensumfeld- und Freizeitgestaltung (Flowers, Fun)

Flowers und Fun stellen zwei häufig weniger beachtete, aber in ihrer Bedeutung – zumindest regional – zunehmende „Verwendungszwecke“ von biobasierten Rohstoffen dar. So stellt die Produktion nicht essbarer gartenbaulicher Produkte (Flowers, repräsentative Zierpflanzen, Ziergehölze, Landschaftsgehölze, innerstädtisches Grün) in manchen Teilen der Erde (z. B. Belgien, Niederlande) einen wichtigen Bestandteil des landwirtschaftlichen Sektors dar²⁹, dessen Bedeutung mit wachsender Weltbevölkerung und zunehmender Kaufkraft vermutlich zunehmen wird. In vielen Teilen der Welt wird außerdem dem Schutz der Natur eine immer größere Bedeutung beigemessen. Mit steigender Urbanisierung kommt auch ornamentalen Pflanzen und grünen Lebensräumen eine immer wichtigere Rolle für das menschliche Wohlbefinden im städtischen Raum zu. Darüber hinaus tragen biobasierte Rohstoffe im erweiterten Sinne auch zum Wohlbefinden (Fun) des Menschen bei. Der in entwickelten Ländern (z. B. Deutschland) aufgrund der Altersstruktur der Menschen derzeit steigende Bedarf an Komponenten des Bereichs „Fun“ – im Sinne der steigenden Verlagerung von Freizeitaktivitäten in stadtnahe, ehemals nur durch die Landwirtschaft beanspruchte Gegenden – hat deutliche Rückkopplungen auf Infrastrukturen und damit Flächenverfügbarkeiten. Die Rückführung biogener Rohstoffe aus Abfällen dieser Nutzungen ist wiederum ein Faktor der Energieerzeugung oder des Humusaufbaus in Böden von Nutzflächen.

3. Entwicklung der Produktionsfaktoren

Neben Maßnahmen zur Nutzungseffizienz sind Produktionssteigerungen das entscheidende Mittel, um einer Knappheit an biobasierten Rohstoffen zu begegnen. In der Vergangenheit wurden Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft größtenteils durch F&E-getriebene Produktivitäts- und Effizienzsteigerungen erreicht. Dazu tragen höhere Hektarleistungen oder Erträge pro Pflanze oder Tier bei. In beiden Fällen ist eine Verlangsamung des Produktivitätswachstums in den vergangenen Jahren festzustellen (siehe Abb. 3), die nach aktuellen Berechnungen dazu führt, dass der zukünftige Bedarf beispielsweise an Reis, Mais, Weizen und Sojabohnen nicht gedeckt werden kann.³⁰ Die Möglichkeiten zur Steigerung der Produktion von biobasierten Rohstoffen werden dabei insbesondere von den nachfolgend aufgeführten Faktoren beeinflusst.

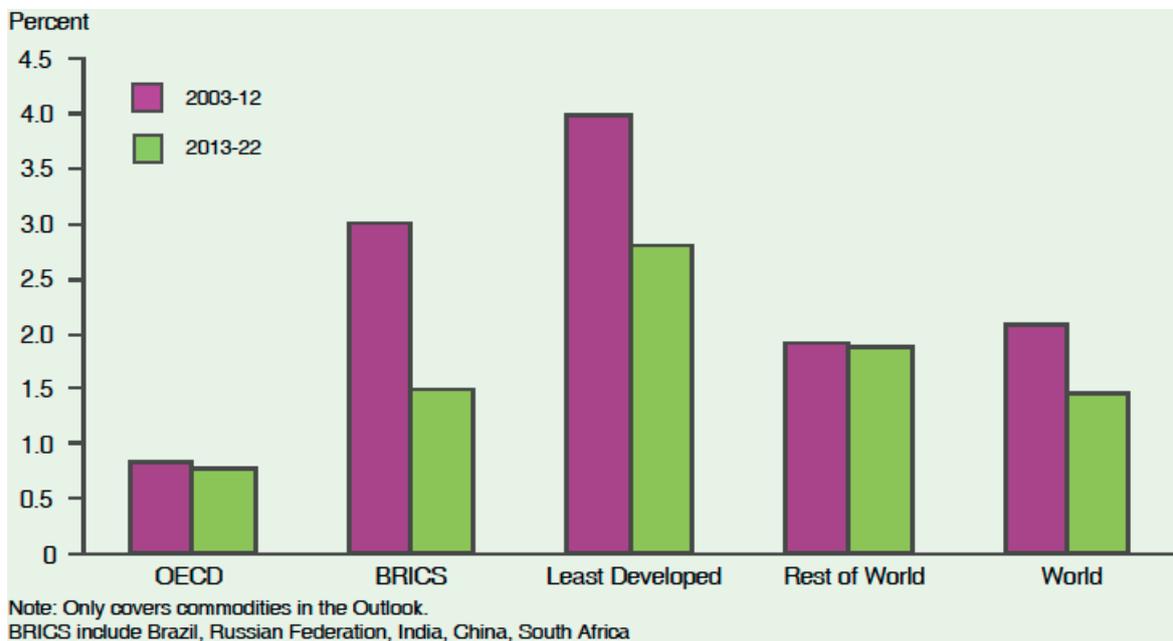


Abbildung 3: Durchschnittliches jährliches Wachstum der Netto-Produktion von landwirtschaftlichen Produkten und Fisch (OECD 2013)

3.1 Verfügbare Flächen

Die Verfügbarkeit von Boden in ausreichender Menge und Qualität stellt eine wichtige Basis landwirtschaftlicher Produktion dar. Weltweit werden aktuell knapp 1,5 Mrd. ha Anbaufläche genutzt. Diese landwirtschaftliche Nutzfläche müsste unter der Annahme von realistischen Ertragssteigerungen schon allein zum Zwecke der globalen Ernährungssicherung ausgeweitet werden.³¹ Allerdings ist das weltweite Potential zur Flächenausweitung gering und dürfte unter Einbeziehung des Klimawandels deutlich unter 5% der bislang genutzten Fläche liegen.³² Zwar gibt es in Südamerika und der Sub-Sahara grundsätzlich Potentiale zur Ausweitung landwirtschaftlicher Nutzflächen, allerdings würde eine damit einhergehende Landumwandlung von Grasflächen, Savannen, Wäldern und Naturschutzge-

bieten signifikante Umweltschäden verursachen – insbesondere würde eine Abholzung von Regenwäldern das Freisetzen von Treibhausgasen verstärken.³³ Des Weiteren wird die Flächenverfügbarkeit auch durch den steigenden Bedarf an Fläche für nicht-landwirtschaftliche Zwecke (Infrastruktur etc.) eingeschränkt.³⁴ Aufgrund seines starken Konsums von biobasierten Rohstoffen importiert Deutschland implizit ein Drittel Ackerfläche, insbesondere für Futtermittel. Damit werden indirekt Landnutzungsänderungen an anderer Stelle ausgelöst.³⁵

3.2 Bodenqualität

In den vergangenen 40 Jahren musste ein Drittel der weltweiten Ackerflächen aufgegeben werden. Ein weiteres Drittel verliert seinen Oberboden momentan schneller als er wiederhergestellt werden kann. Hauptgrund dafür sind vom Menschen verursachte Degradationseffekte wie Strukturverlust, Verdichtung, Versiegelung, Versauerung, Versalzung sowie Erosion. Weltweit verursacht die Bodenerosion den größten degradationsbedingten Flächenverlust.³⁶ Dies führt zur dauerhaften Beeinträchtigung von Ökosystemen. Die Böden büßen die Fähigkeit ein, Nährstoffe und Wasser für die Pflanzenproduktion bereitzustellen (Produktionsfunktion), Kohlenstoff aus der Atmosphäre zu binden, verschmutztes Wasser zu filtern (Regelungsfunktion) und die Artenvielfalt aufrechtzuerhalten (Lebensraumfunktion). Rund ein Viertel der globalen landwirtschaftlichen Nutzfläche ist bereits hochgradig geschädigt.³⁷ In Westeuropa hat die Intensivierung der Landwirtschaft während der vergangenen 50 Jahre diese Entwicklung ebenfalls begünstigt. Die zunehmende Mechanisierung, das Pflügen in Hanglagen, humuszehrende Landbausysteme, Rodungen, Überweidung und Bodenentwässerung haben sich spürbar ausgewirkt. In entwickelten Ländern wurden in den vergangenen zwei Jahrzehnten bereits Maßnahmen in Form von Rechtsregelungen, Ausgleichsmaßnahmen und/oder veränderten Pflanzenbausystemen etc. ergriffen, die dieser Entwicklung entgegenwirken. Beispiele sind die Bearbeitung großer Flächen in nicht wendenden Bodenbearbeitungsverfahren wie etwa Mulchsaat, Direktsaat, das Wegfallen kritischer Pflanzenschutzmittelwirkstoffe durch stringente und in Grundzügen europaweit harmonisierte Bewertungsverfahren, die Regelungen zur guten fachlichen Praxis oder zu integrierten Pflanzenbausystemen. Länder wie Lesotho, Haiti, die Mongolei und Nordkorea können sich aufgrund degradierter Böden nicht mehr selbst mit Nahrungsmitteln versorgen.³⁸ Insgesamt bedroht die globale Bodendegradation die ausreichende Nahrungsmittelproduktion.³⁹ Da der Mensch in zunehmendem Ausmaß zur Bodendegradation beiträgt⁴⁰, sind fruchtbare Böden eine immer stärker produktionsbegrenzende und nicht erneuerbare Ressource. Kontinuierlich geht wertvolles Ackerland durch die Ausweitung von Infrastrukturen verloren, in Deutschland derzeit noch 74 ha täglich.⁴¹

3.3 Wasser

Wasser stellt ebenfalls eine für die Landwirtschaft unabdingbare – und gleichzeitig begrenzte – Ressource dar. Allein die künstliche Bewässerung in der Landwirtschaft verbraucht 70% des global genutzten Süßwassers.⁴² Ein Anstieg der landwirtschaftlichen Produktion war bisher immer mit steigendem Wasserverbrauch verbunden. Zwischen 1950 und 2000 hat sich der weltweite Wasserverbrauch verdreifacht.⁴³ Gleichzeitig steigt die Nachfrage nach und der Wettbewerb um die knappe Ressource Wasser in anderen Verwendungsbereichen.⁴⁴ Der große Wasserbedarf führt dazu, dass vorhandene

Grundwasserreserven viel schneller aufgebraucht werden, als sie durch Niederschläge wieder aufgefüllt werden können. Die Folge sind sinkende Grundwasserspiegel⁴⁵ und die Erschöpfung von nicht durch Niederschlag wiederauffüllbare „fossile“ Aquiferen (Wasserreservoirs, die sehr altes Wasser in regenundurchlässigem Gestein speichern). Wenn diese fossilen Reservoirs erst einmal erschöpft sind, könnte dies in Trockenregionen das Ende der Landwirtschaft bedeuten⁴⁶. Nicht nachhaltige Wassernutzung und zunehmender Klimawandel (unter anderem durch eine schnellere Verdunstung bei höheren Temperaturen) werden zu einer Verschärfung der bereits vorhandenen Wasserknappheit führen.⁴⁷ Insgesamt wird Wasser immer knapper und teurer, was das landwirtschaftliche Produktionswachstum einschränkt.⁴⁸ Eine umfassende Betrachtung der Behandlung verschiedener Wasserstrategien würde jedoch den Rahmen dieses Dokumentes sprengen.

3.4 Biotische Faktoren

Kulturpflanzen und ihre Produkte unterliegen einer Vielzahl an Einflüssen, die biotischen Ursprungs sind, also durch andere Lebewesen erzeugt werden. Diese entscheiden unter bestimmten Bedingungen maßgeblich über Leistungs- oder Ertragsfähigkeit der Pflanzen und die Qualität der Pflanzenerzeugnisse. Sie müssen nicht zwangsläufig nur negative Einflüsse ausüben. So bilden mehr als 80% der Pflanzen symbiotische Beziehungen zu Mikroorganismen, beispielsweise Mykorrhizen oder andere Endophyten. Insbesondere unter suboptimalen Wachstumsbedingungen verbessern sie die Toleranz der Pflanzen gegenüber abiotischen Stressbedingungen und die Widerstandsfähigkeit gegenüber bodenbürtigen Pathogenen und Nematoden.⁴⁹ Eine wichtige Funktion ist die Verbesserung der Nährstoffaufnahme, besonders bei Phosphor, an Nährstoffmangelstandorten.⁵⁰ Stark negative Auswirkungen auf den Produktionserfolg und die Produktqualität üben jedoch pflanzenpathogene Organismen, Schädlinge und Konkurrenzpflanzen aus.⁵¹ Solche Schadorganismen verursachen weltweit je nach Kulturart und -bedingungen potentiell Verluste zwischen 34% und 80% der Ernteerträge⁵² und können indirekt über die erforderlichen Gegenmaßnahmen, speziell chemischer Art, Folgewirkungen für Verbraucher und Umwelt auslösen. Besondere Probleme verursachen weltweit Pathogene, die durch Insekten, Nematoden oder Pilze übertragen werden, beispielsweise Virose, Phytoplasmosen oder bestimmte Bakteriosen.

3.5 Biodiversität

Biodiversität bezeichnet gemäß der Biodiversitätskonvention (Rio de Janeiro, 1992) die Vielfalt der Lebensformen sowie die ökologischen Komplexe, zu denen sie gehören. Sie umfasst dementsprechend die Vielfalt innerhalb der Arten (genetische Diversität), zwischen den Arten (Artenvielfalt) und die Vielfalt der Ökosysteme (Ökosystemdiversität). Alle Komponenten der biologischen Vielfalt, die für Ernährung und Landwirtschaft sowie das Funktionieren der Agrarökosysteme von Bedeutung sind, werden als Agrobiodiversität definiert. Künftig stellen die Erhaltung und die nachhaltige Nutzung der Agrobiodiversität eine wesentliche Voraussetzung für die Produktivität und Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungskette Boden – Pflanze – Tier – Ernährung dar. Das immer vielfältigere Lebensmittelangebot wird mit immer weniger Pflanzenarten und Tierrassen produziert. So werden in Deutschland 95% der tierischen Produktion mit nur elf Nutzierrassen erzeugt. Weltweit werden mit

drei Kulturpflanzen (Weizen, Reis, Mais) 50% des Kalorienbedarfs der Menschen gedeckt. In der Folge sind potentiell immer mehr Nutzierrassen und -pflanzensorten vom Aussterben bedroht. Neben der Erhaltung der Artenvielfalt kommt dem Schutz der Sorten- und Rassenvielfalt für notwendige züchterische Fortschritte angesichts der zukünftigen Herausforderungen (Klimawandel, veränderte Standortbedingungen) eine besondere Bedeutung zu. Es ist deshalb wichtig, die noch vorhandenen genetischen Ressourcen zu erfassen, zu charakterisieren und zu evaluieren sowie Strategien zu ihrer Erhaltung zu entwickeln. Für die Erhaltung der Biodiversität – auch außerhalb von Agrarökosystemen – wird es bei steigendem Bedarf an biobasierten Rohstoffen darauf ankommen, durch eine nachhaltige Intensivierung der Produktion auf vorhandenen Agrarflächen die Flächenausdehnung der landwirtschaftlichen Produktion zu beschränken. Die Vielfalt an antagonistischen Organismen ist als Ökosystemdienstleistung von enormer Bedeutung für die Funktionalität biologischer Abwehrsysteme gegen Schädlinge.

3.6 Klimatische Bedingungen

Ernteerträge werden von einer Vielzahl Faktoren wie Temperatur, Niederschläge, CO₂-Konzentration sowie extremen und unbeständigen Wetterlagen direkt beeinflusst. Kritisch auswirken können sich beispielsweise Wetter- und Witterungsextreme, da vermehrter Stress durch Hitze, Kälte, Trockenheit oder Nässe zum Teil erhebliche Ertragsausfälle auslöst. Darüber hinaus könnten sich Pflanzenschutzprobleme verstärken, die mit neuen Schadorganismen sowie einer Verstärkung des Befallsdrucks durch derzeit unauffällige Schadorganismen oder einer höheren Generationenzahl pro Jahr einhergehen.⁵³ Bereits heute finden sich Schädlingsarten, welche die Anzahl ihrer Generationen pro Jahr aufgrund veränderter Temperaturen erhöht haben (z. B. Wicklerarten, Zikadenarten). Sich verändernde Bodenzustände, insbesondere die zunehmende Trockenheit während bestimmter Phasen der Vegetationsperiode und eine höhere Vernässungsgefahr vor allem im Frühjahr und Herbst, stellen weitere Herausforderungen dar – so auch beispielsweise die Humuserhaltung. Der prognostizierte Klimawandel wird ebenfalls erhebliche Auswirkungen auf die Nutztierhaltung haben. Durch die für Mitteleuropa erwarteten regionalen Temperaturerhöhungen, Niederschlagsänderungen und Zunahme von Extremwetterereignissen ist nicht nur mit Hitzestress und dadurch bewirkte Belastungen und Minderleistungen der Tiere, sondern auch mit einer signifikant veränderten Futtergrundlage zu rechnen. Hinzu kommt eine Veränderung des Infektionsdrucks und der regionalen Verteilung von Krankheitserregern. Über den Weltmarkt ist Deutschland auch von sich im Klimawandel verändernden Faktoren wie Energiepreise, Ernteerträge und Nahrungsbedarf in anderen Erdteilen betroffen.⁵⁴

3.7 Natur- und Umweltschutz

Das zukünftige Angebot an biologischen Rohstoffen wird auch durch politische und administrative Maßnahmen beeinflusst, die negative Auswirkungen der landwirtschaftlichen Produktion auf Natur, Umwelt und Gesellschaft begrenzen sollen. So geht zum Beispiel die Erweiterung der Landwirtschaft in natürliche Lebensräume beziehungsweise Landnutzungsänderungen, wie die Umwandlung von Grasland in Ackerfläche und die Abholzung von Regenwäldern, in der Regel mit einem Verlust an Biodiversität und wichtigen Ökosystemleistungen einher.⁵⁵ Damit ist die anthropogene Landnutzung ein

zentraler Verursacher des Aussterbens eines beachtlichen Anteils der heutigen Tier- und Pflanzenarten.⁵⁶ Zudem ist die Landwirtschaft mitverantwortlich für den Ausstoß von Treibhausgasen, weil sie Energie und Produkte benötigt, die aus der Verbrennung beziehungsweise Nutzung fossiler Brennstoffe stammt und weil sie selber Treibhausgase ausstößt.⁵⁷ Beispielsweise führen Landnutzungsänderungen auch zu einer verstärkten Kohlenstoffdioxidfreisetzung⁵⁸, wobei die Abholzung der Tropenwälder hauptverantwortlich für Treibhausgasemissionen ist.⁵⁹ Insgesamt ist die Landwirtschaft für mehr als 20% aller Treibhausgasemissionen und für einen großen Teil der anthropogenen Produktion von Methan und Stickstoffoxid verantwortlich.⁶⁰ Auch die Erhöhung der Flächenproduktivität kann mit hohen Umweltkosten verbunden sein, wenn dies nicht mit Rücksicht auf die ökologische Tragfähigkeit und Pufferkapazität des jeweiligen Agrar- und Forstsystems erfolgt. So hat die Intensivierung der Landwirtschaft in der Vergangenheit zu beträchtlichen Ertragssteigerungen pro Flächeneinheit geführt, mit jedoch zum Teil erheblichen Belastungen der Umwelt. Bedingt durch ein geändertes Umweltrecht, internationale Vereinbarungen und Bemühungen der Landwirte selbst wurden aber Fortschritte erreicht, um die Umweltbelastungen deutlich zu reduzieren. Ein aktuelles Beispiel dafür ist der Nationale Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pestiziden, der am 10. April 2013 von der Bundesregierung auf Grundlage der neuen europäischen Pflanzenschutz-Richtlinie verabschiedet wurde⁶¹.

3.8 Externe Mittel zur Kultivierung

In den vergangenen 50 Jahren wurde der globale Düngemittelverbrauch um 500% gesteigert, der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln stieg ebenfalls um das Mehrfache, in Deutschland auf heute rund 36.000 Tonnen pro Jahr. Der weltweite Umsatz für chemische Pflanzenschutzmittel lag im Jahr 2012 bei 47,3 Mrd. US-\$. (Quelle: IVA).⁶² Parallel konnten die landwirtschaftlichen Erträge in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts verdreifacht werden, allerdings mit entsprechenden Auswirkungen auf Teile der Umwelt. Dazu zählen Wasserverschmutzung und -verknappung, Ressourcenverknappung, Degradation und Verlust von Böden, Rückgang der biologischen Vielfalt und eine veränderte Zusammensetzung der Atmosphäre.⁶³ Dies entspricht nicht den vorangehend beschriebenen Kriterien, die an eine nachhaltige Intensivierung gestellt werden. Zudem ist die ineffizient betriebene Form der anthropogenen Landnutzung eine der Haupttriebkkräfte globaler Umweltveränderungen. Gerade was die Umweltaspekte Biodiversität, Klimawandel und Beeinträchtigung des Stickstoffkreislaufs angeht, sind nach Ansicht einer Gruppe von international renommierten Wissenschaftlern⁶⁴ die globalen Belastungsgrenzen (planetary boundaries) bereits überschritten. Der Verbrauch von Wasser, Stickstoff, Phosphor, Energie und Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft kann jedoch optimiert werden. Mit einer verbesserten Effizienz können die negativen Folgen für die Umwelt verringert werden. Reduziert werden kann die Umweltbelastung in Zukunft durch die Entwicklung von standortangepassten, nachhaltigen und technologischen Innovationen und Landnutzungsformen, die etwa natürliche Räuber-Beute-Beziehungen, Symbiosen und Allelochemikalien einbeziehen.

4. Grundlagen

Die Ist-Stand-Analyse zur Erzeugung und Nutzung von biobasierten Rohstoffen zeigt, dass weltweit von einer steigenden Nachfrage nach biobasierten Rohstoffen für alle Verwendungszwecke auszugehen ist. Angesichts dessen werden Landflächen und andere für die Produktion von biobasierten Rohstoffen eingesetzte natürliche Ressourcen knapp. Die stark schwankenden Agrarpreise, der steigende Wert von Agrarflächen und -gütern als Spekulationsobjekte, die Nahrungsmittelkrisen 2007 und nicht zuletzt das „Land Grabbing“⁶⁵ sind Ausdruck dieser Entwicklung. Gleichzeitig wird die marktwirtschaftliche Orientierung der Erzeugung und Nutzung biobasierter Rohstoffe dazu führen, dass die Energieerzeugung und industrielle Produktion zunehmend mit der Ernährungssicherung um biobasierte Rohstoffe konkurriert. Um der zukünftigen Nachfrage nach biobasierten Rohstoffen in einer bedarfsgerechten Quantität und Qualität zu begegnen, ist aufbauend auf obigen Überlegungen, dem Leitbild der nachhaltigen Intensivierung folgend, eine Dreifachstrategie erforderlich: (1) das Angebot biobasierter Rohstoffe nachhaltig zu erhöhen und (2) die Effizienz der Nutzung/Verwertung dieser Rohstoffe zu steigern sowie (3) die politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen von Produktion, Verwertung und Verteilung biobasierter Rohstoffe effizienter und nachhaltiger zu gestalten.

4.1 Nachhaltige Steigerung der Erträge

Wie bereits dargelegt, ist das Potential zur Erweiterung der landwirtschaftlichen Nutzflächen weltweit begrenzt, weil der Pflanzenanbau entweder aufgrund mangelnden Ertragspotentials ökonomisch nicht sinnvoll ist oder die Ausdehnung zu Lasten von Umwelt, Biotopen und Klima geht. Dabei geht es im Rahmen der Pflanzenproduktion um einen schonenden Umgang mit begrenzt verfügbaren Ressourcen, wie Boden, Wasser, Biodiversität, Energie und Arbeitskraft sowie verschiedenen weiteren Rohstoffen (z. B. Phosphor). Bei der Aufzucht von Tieren steht vor allem die möglichst effiziente Umwandlung von Futter im Vordergrund, mit der umwelt- und klimarelevante Ausscheidungen wie die von Methan, Harn oder Kot. Deshalb ist der bevorzugte Weg der notwendigen Produktionssteigerung die nachhaltige Intensivierung der Erzeugung biobasierter Rohstoffe auf den bereits genutzten Flächen unter Anwendung neuester Erkenntnisse der Pflanzen- und Nutztierzüchtung. Im Hinblick auf die Anforderungen der nachhaltigen Intensivierung sollte eine Produktionssteigerung unter Beachtung folgender Gesichtspunkte durchgeführt werden:

- a) Im Sinne einer nachhaltigen Steigerung der Erträge sollte auf ein besseres Verständnis von nachhaltiger, standortgerechter Bodennutzung, einer Optimierung der Bodenfunktionen und Ökosystemdienstleistungen und der schnelleren Überführung neuer gesicherter Erkenntnisse in die Praxis hingearbeitet werden. Ertragssteigerungen können durch „Precision Farming“, also mit Hilfe einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung unter Verwendung GPS-basierter Standortinformationen, Entwicklung von Sensortechniken „Input-neutral“ erreicht werden. Innovative Systeme der Agrartechnik können im Zusammenspiel mit neu zu entwickelnden Pflanzenbaumodellen Effizienzen steigern und Belastungen verringern.
- b) Die Belastbarkeit und Widerstandsfähigkeit des bewirtschafteten Systems ist durch eine verbesserte Kenntnis der standortspezifischen Tragfähigkeit von Landnutzungssystemen (Leis-

tungsgrenzen, Vulnerabilitäten, Biodiversität, Pufferfunktion, Resilienz) zu verbessern. Darüber hinaus sollten in der Tierzucht Möglichkeiten zur Diversifizierung von Futtermitteln (z. B. von Zuckerrüben – hoher Energiewert – und Roggen) auf ihre Eignung als Futter zur besseren bedarfsgerechten Versorgung der Nutztiere erforscht werden. Eine größere Bandbreite an Futterpflanzenarten könnte in Betracht auf Nachhaltigkeit, Agrobiodiversität und Fruchtfolge sehr attraktiv sein.

- c) Durch eine verbesserte Ressourceneffizienz lässt sich die Autarkie der Bewirtschaftung, durch Reduzierung des Inputs verbessern. Dazu gehört einerseits eine Steigerung der Effizienz der Wassernutzung und der Verbesserung der Wasserqualität durch die Erhöhung des Wasserspeichervermögens der Böden und der Reduktion von Stoffausträgen aus Böden, innovative angepasste Bodenbearbeitungs- und Unkrautkontrollsysteme, die Anpassung an veränderte Wasserverfügbarkeit durch die Züchtung neuer zum Beispiel trocken toleranter Pflanzensorten beziehungsweise durch die Entwicklung wassersparender Bewässerungssysteme und neuer Methoden der Regen- und Grundwassernutzung. Andererseits ist es ebenfalls wichtig, chemisch-synthetische Pflanzenschutz- und Düngemittel soweit wie möglich und sinnvoll durch biogene, naturstofforientierte oder antagonistensbasierte Substanzen oder Technologien zu ersetzen. Solche integrierten Pflanzenschutz- und Pflanzenbausysteme sollten sowohl die Nährstoffversorgung einbeziehen, die an Bilanzen orientiert ist und das bodeninterne Nährstoffnachlieferungspotential berücksichtigt, als auch Fruchtfolgesysteme zur Begrenzung von Pathogenpopulationen und zur Optimierung der Nährstoff- und Wasseraufnahme durch die Pflanzen und von biologischen, biotechnischen, pflanzenzüchterischen sowie anbau- und kulturtechnischen Maßnahmen begleitet sein. In Bezug auf die Tierzucht ist eine verbesserte Nährstoffverwertung etwa durch die Aufklärung der genetisch-funktionalen Aspekte der Biodiversität der Tiere und Nutzung der Erkenntnisse zur Ableitung optimierter Energie- und Nährstoffbedarfsempfehlungen, Futterbewertungssysteme sowie zur Züchtung von Tieren mit verbesserter Nahrungsverwertung und von optimierten Futterpflanzen anzuraten.
- d) Die funktionale Erhaltung des bewirtschafteten Ökosystems kann durch den Schutz von Grund- und Oberflächenwasser sowie der Bodenmikroflora bei direkter Ausbringung von Wirtschaftsdüngern durch verbesserte Tierhaltungssysteme (reduzierter Antibiotika- und Arzneimitteleinsatz, Düngermanagement/Zwischenlagerung, Schadstofffreiheit) sowie von Pflanzenschutzmitteln durch optimierte Applikationsverfahren (automatisierte Teilbreitenabschaltungen, GIS-gesteuerte Anwendungstechnologien und biologisch-biotechnische Verfahren) erreicht werden.

4.1.1 Pflanzenzüchtung

Um die Produktivität in der Pflanzenproduktion steigern zu können, werden Pflanzensorten mit höheren Erträgen und besserer Anpassungsfähigkeit an verschiedene Anbau- und Umweltbedingungen bei gleichzeitig vermindertem Ressourcenbedarf benötigt. Zentraler Ansatzpunkt ist die Verbesserung der Ertragsleistung und Ertragsstabilität durch die stetige Optimierung der pflanzlichen Physiologie und die Steigerung des Züchterfolgs durch Optimierung der Selektionsstrategien. Neben den Grenzen des Potentials limitieren zudem Ernteverluste erheblich die Produktivität. Biotischer und abiotischer Stress

sind externe Faktoren, die durch die Klimaveränderungen an Bedeutung gewinnen und die pflanzlichen Erträge negativ beeinflussen. Für neue Ansätze zur Verbesserung der Ertragsleistung und Ertragsstabilität ist ein detailliertes Verständnis der physiologischen Abläufe erforderlich, welche die einzelnen agronomischen Merkmale beeinflussen. Die nutzbare genetische Variation in der Pflanzenzüchtung wird bislang über den Phänotyp oder über dazu passende molekulare Marker adressiert. Um das Potential der Variation auf der physiologischen Ebene zu nutzen, müssen die Faktoren, z. B. Schlüsselenzyme, identifiziert werden, für die es Variationen im Zuchtmaterial oder den genetischen Ressourcen gibt, und der Nachweis erbracht werden, dass sie die Merkmalsausprägung maßgeblich beeinflussen. Parallel zur physiologischen Charakterisierung spezifischer Stadien und Gewebe divergenter Genotypen sollten die etablierten OMICs-Technologien angewandt werden, um Proteomdaten, Expressionsanalysen und Sequenzdaten mit den physiologischen Prozessen zu integrieren. Notwendig sind dann auch entsprechende bioinformatische Tools zur Integration der Daten.

Auf diese Weise kann das tiefere Verständnis der Physiologie zurück auf eine genetische Ebene gebracht werden, die sich über Marker in vorteilhaften Allelen wieder in der Züchtung nutzen lassen. Projekte in diesem Bereich erfordern Expertise in den Bereichen Genetik, Phänotypisierung, Physiologie und Biochemie sowie in den diversen OMICs-Technologien. Des Weiteren ist die Anpassung pflanzlicher Inhaltsstoffe an die verschiedenen Verwendungszwecke der verarbeitenden Industrie, insbesondere für die menschliche und tierische Ernährung, ein wichtiges Feld der Pflanzenforschung. Voraussetzungen sind ein breiter Zugang zu einer Vielzahl an Kulturarten mit einem breiten Spektrum unterschiedlicher primärer und sekundärer Pflanzeninhaltsstoffe sowie die technische Weiterentwicklung der quantitativen und qualitativen Charakterisierung dieser Inhaltsstoffe. Im Hinblick auf die zunehmende Knappheit natürlicher Ressourcen müssen gleichzeitig auch verstärkt züchterische Maßnahmen zur Generierung von Nutzpflanzen mit geringen Ansprüchen und hohem Nahrungswert, d. h. mit erhöhter Ressourceneffizienz in Bezug auf Wasser und Nährstoffe, ergriffen werden. Die Entwicklung und Anwendung neuer biotechnologischer Methoden (zur gezielten Einbringung spezifischer Pflanzenmerkmale) ist für die Realisierung dieser Züchtungsziele unverzichtbar.

Entscheidend für die nachhaltige Verbesserung der Ertragsleistung und -stabilität ist die kontinuierliche Steigerung des Züchtungserfolgs, was durch die wissensbasierte Integration von genomischer und phänotypischer Selektion in einem einheitlichen Züchtungsansatz gewährleistet werden kann. Die züchterischen Strategien der nächsten Generation verlangen eine effiziente Kombination aus klassischer Phänotyp-basierter Züchtung mit molekulargenetischen Methoden. Um den Technologiesprung der Genomforschung für die Züchtungsforschung nutzbar zu machen, bedarf es parallel der Weiterentwicklung der theoretischen Grundlagen der quantitativen Genetik, Populationsgenetik, Zuchtmethodik und Bioinformatik. Die züchterische Forschung bei Kulturpflanzen und Nutztieren beruht auf den weitgehend identischen theoretischen Grundlagen, wobei die beiden Bereiche über komplementäre Exzellenz in der Nutzung von Methoden und Technologien verfügen. Sowohl in der Pflanzen- als auch in der Tierzüchtung ist es bereits erfolgreich gelungen, genombasierte Ansätze in bestehende Zuchtprozesse zu integrieren. Die große bevorstehende Herausforderung ist die vollständige Integration der genombasierten und der klassischen phänotypischen Selektion in einheitlichen optimierten Selektionsstrategien. Der Messfaktor für eine erfolgreiche Züchtung ist der Selektionsgewinn pro Zeiteinheit. Es sollten Konzepte entwickelt und an praktischen Beispielen realisiert werden, die zu einer

signifikanten Steigerung des Selektionsgewinns führen. Bei Kulturpflanzen sollten der Ertrag, die Ertragsstabilität, die Ressourceneffizienz und die biotische und abiotische Stresstoleranz berücksichtigt werden. Bei Nutztieren stehen der Ertrag und die Fertilität im Vordergrund. Die vorherrschenden stochastischen Ansätze in der Zuchtmethodik sollten überdacht werden. Es sollten Methoden der multivarianten Selektion unter Einsatz von molekularen und Biomarkern sowie aller relevanten Erkenntnisse der Genomforschung entwickelt werden. Konzepte der Evolutionsbiologie können zur Analyse der Genotyp-Umweltinteraktionen in sich schnell ändernden Umgebungen verwendet werden. Zuchtschemata sollten unter Berücksichtigung ökonomischer Kriterien optimiert werden. Mechanismen zum Erhalt der genetischen Variation sollten erforscht bzw. Strategien der Populationsgenomik zur Erweiterung und Diversifizierung der genetischen Diversität bei Kulturpflanzen und Nutztieren entwickelt und eingesetzt werden.

Voraussetzung für erfolgreiche Tier- und Pflanzenzüchtung ist der Zugang zu genetischer Diversität. Um den züchterischen Fortschritt zu beschleunigen, muss zum einen der Zugang zu genetischen Ressourcen gesichert werden und zum anderen die Erschließung und Nutzung der natürlichen genetischen Vielfalt intensiv gefördert werden. Es ist daher wichtig, dem vorgelagerten Prozess des „Pre-Breedings“ in der Sorten- und Rassenzüchtung mehr Aufmerksamkeit zu schenken, um die genetischen Variationen aus dem Genpool der Arten zu erfassen und für die Züchtung nutzbar zu machen. Genbanken sorgen dafür, dass die genetische und biologische Vielfalt erhalten wird. Neue Möglichkeiten der molekularen Beschreibung genetischer Ressourcen können den Prozess des Pre-Breedings erleichtern und beschleunigen. Dazu gehört neben einer phänotypischen Evaluierung und Beschreibung der genetischen Ressourcen der Einsatz biotechnologischer, molekularer, populationsgenetischer und quantitativ genetischer Verfahren. Zudem werden gute, öffentlich zugängliche Datenbanken benötigt, in denen die in den Genbanken lagernden „Rohstoffe“ und ihre Eigenschaften möglichst umfassend beschrieben werden.

Neben der Entwicklung moderner Pflanzensorten und Tierrassen erfordert die Produktion pflanzlicher Rohstoffe innovative Konzepte für optimierte Bodenbearbeitung, Unkrautbekämpfung und Aussaat sowie effiziente, präzise und nachhaltige Pflanzenschutz- und Düngungsstrategien. Ein zentrales Instrument zur Umsetzung solcher Konzepte stellt die Präzisionslandwirtschaft dar. Diese zielt auf eine räumlich und zeitlich bessere Abstimmung des pflanzenverfügbaren Nährstoffangebotes auf die Nährstoffnachfrage von Pflanzen ab, um Über- und Underdüngung zu vermeiden. Gleichzeitig schützt sie die Bodengesundheit und die Wasserqualität. Die Realisierung einer solchen Präzisionslandwirtschaft für den Pflanzenbau erfordert eine teilflächenspezifische Flächenbearbeitung unter gezielter Verwendung detaillierter, zum Teil GPS-basierter Standortinformationen. Auf Basis der lokalen Bodenbeschaffenheit, Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit, Schadstoffbelastung und dem mittelfristigen Auftreten von Krankheitserregern und Schädlingen sowie Konkurrenzpflanzen (Unkräutern) werden hierbei individuelle Flächennutzungskonzepte und Applikationskarten zur spezifischen Ausbringung landwirtschaftlicher Betriebsmittel wie Wasser, Dünger und Pflanzenschutzmittel entwickelt.

Gleichzeitig müssen Maßnahmen zum Schutz der Bodenfunktionen und zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Bodens ergriffen werden. Die Ansatzpunkte dafür sind vielfältig. Im Mittelpunkt steht dabei die Erhöhung beziehungsweise die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, welche nicht nur für die

Produktivität, sondern auch für die Regulierung von Klima, Trockenheit, Krankheiten, Wasserqualität und Abfallbeseitigung eine wichtige Rolle spielt. Im Prinzip berücksichtigen Maßnahmen zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit die „gute fachliche Praxis“, wie sie im Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) oder im Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) gefordert wird. Die Forschung muss zudem verstärkt den Blick auf eine effizientere Einbeziehung der Bodenbiologie (inklusive Symbionten, Antagonisten) richten und das Leistungspotential pflanzlicher Wurzelsysteme einbeziehen. Verschiedene Maßnahmen der Bodenbearbeitung und deren Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit und die Ertragsleistungen sind stärker zu berücksichtigen.

Das Konzept der nachhaltigen Intensivierung beinhaltet innovative Verfahren, welche eine intensive und gleichzeitig umweltverträgliche Bodennutzung sowie die optimale Nutzung von den durch die Biodiversität gelieferten und die Landwirtschaft unterstützenden Ökosystemdienstleistungen ermöglichen. Zur Umsetzung sind insbesondere standort- bzw. regionenspezifische Lösungsansätze notwendig, die den Einfluss der Landschaft und Biodiversität sowie von Selbstregulationsmechanismen auf die Flächenproduktivität einbeziehen, z. B. Agroforstsysteme mit Leguminosen-Bäumen.⁶⁶

„Neue“ Flächen

Eine bedenkenswerte, wenn auch noch kaum entwickelte Alternative bzw. Ergänzung zur Steigerung der Flächenproduktivität stellt die Erschließung „neuer“ Nutzflächen/Potentiale von urbanen Industriebrachen, Ablagerungs- und Dachflächen („Sky-Farming“) dar. So wäre beispielsweise die Nutzung von Industriebrachen als Anbauflächen für Energiepflanzen eine interessante Option zur nachhaltigen Steigerung der Pflanzenproduktion, ohne in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion oder zum Naturschutz zu treten, und so Landnutzungskonflikte zu verschärfen. Erste Untersuchungen lassen darauf schließen, dass ca. 11% aller Industriebrachen in Deutschland für die Produktion biobasierter Rohstoffe geeignet sein könnten. Gleichzeitig würde der Anbau von Rohstoffen auf landwirtschaftlich nicht genutzten Flächen auch einen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen leisten. Angesichts der konkreten Potentiale besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf. Mit Blick auf die teils unmittelbare Nachbarschaft solcher Flächen zu bewohnten Gebieten sind auch Forschungen zu speziellen Anwendungen von Betriebsmitteln oder spezifischen Betriebsmitteln erforderlich.

Wasser

Für den ressourcenschonenden Umgang mit Wasser muss intensiver an der Bewässerungseffizienz gearbeitet werden. Neben einer standortangepassten Bewässerung müssen neueste Bewässerungstechnologien, wie beispielsweise die Tropfbewässerung oder Unterflurbewässerung auf dem Feld zur Anwendung kommen. Durch das Eindämmen von Verdunstungsverlusten beim Transport und der Lagerung von Wasser können zusätzlich große Mengen an Gebrauchswasser eingespart werden. Darüber hinaus sollten zusätzlich große Forschungsanstrengungen in das Gebiet des Wasserrecyclings gesteckt werden.

Stickstoff

Für eine nachhaltige Landwirtschaft ist es ebenso wichtig, den Umgang mit Düngemitteln so ressourcenschonend wie möglich zu gestalten und damit vor allem die Stickstoffeinträge gering zu halten.⁶⁷ Die bisherige Stickstoffnutzungs-Effizienz ist extrem niedrig. So wurden von dem im Jahr 2005 welt-

weit in der Landwirtschaft eingesetzten Haber-Bosch-Stickstoff nur 17% durch den Menschen in Form von Getreide-, Milch- und Fleischprodukten konsumiert.⁶⁸ Forschungsansätze zur Analyse des standort- und sortenspezifischen Stickstoffbedarfs sind daher notwendig, um den Einsatz von Düngemitteln effizienter zu gestalten und an die jeweiligen landwirtschaftlichen Bedingungen anpassen zu können. Darüber hinaus ist es wichtig, die negativen Umweltwirkungen des Einsatzes von reaktivem Stickstoff zu reduzieren, wie etwa durch die (Rück-) Umwandlung in atmosphärischen molekularen Stickstoff.⁶⁹ Technologische Konzepte für Stickstoff-Recycling müssen entwickelt werden, und es bedarf eines besseren Umgangs mit menschlichen und tierischen Abfällen. Die Reduzierung des Einsatzes von Chemikalien in der Landwirtschaft und Einsparungen im Düngemiteleinsatz haben gleichermaßen positive Auswirkungen auf die Umwelt und führen zu einer Senkung der Boden- und Grundwasserbelastung. In der Kombination mit neuen Applikationstechnologien und standortangepassten Pflanzensorten ermöglicht die Präzisionslandwirtschaft einen effizienteren Umgang mit begrenzten Ressourcen und kann dazu beitragen, den ökologischen Fußabdruck deutlich zu reduzieren.

4.1.2 Individualisierte Tierhaltung

Eine effiziente und den Bedarf deckende Erzeugung von Lebensmitteln tierischer Herkunft erfordert intensive Forschungsanstrengungen in der Tierzucht. Der Fokus liegt dabei auf der Zucht robuster, anpassungs- und leistungsfähiger Tiere mit hoher Futtermittelverwertung. Für die Ausschöpfung des genetischen Leistungspotentials der Nutztiere und damit für die Sicherung einer hohen Ressourceneffizienz ist die Aufklärung der genetischen, epigenetischen und physiologischen Grundlagen der Merkmalsausprägung (molekulare Phänotypen) absolute Voraussetzung. Zudem müssen genetisch statistische Modelle zur Integration der genomischen Daten in die Zuchtprogramme im Rahmen der genomischen Zuchtwertschätzung entwickelt werden. Die genetische Vielfalt und ihre Nutzung für die Weiterentwicklung der Rassen sind bisher nur unzureichend untersucht. Kartierungsprojekte bei Nutztieren haben gezeigt, dass relevante Erbanlagen, etwa für genetische Defekte oder Krankheitsresistenzen, in unterschiedlichen Rassen oder Familien häufig an ganz verschiedenen Genorten gefunden werden. Entsprechende Anlagen können komplementär genutzt beziehungsweise eventuelle Anpassungsprozesse (z. B. Erregerresistenzen) durch alternative genetisch-funktionale Lösungsansätze kompensiert werden. Der Rassenvielfalt kommt gerade unter den sich verändernden Umwelt- und Produktionsbedingungen, wie sie im Zuge des prognostizierten Klimawandels oder sich verändernder Standortbedingungen zu erwarten sind, eine besondere Bedeutung zu. So gewinnen Eigenschaften immer mehr an Bedeutung wie Genügsamkeit und hohe Flexibilität bei der Wahl und Verwertung von Futterpflanzen unterschiedlicher Qualitäten, Toleranz gegenüber extremen, veränderlichen Umweltbedingungen einschließlich Klimaschwankungen und -änderungen, hohe Resistenz gegen Krankheitserreger und insgesamt geringere Hege-Ansprüche einschließlich eines geringeren Energie- und Ressourceneinsatzes.

Genomprojekte bei Nutztieren haben gezeigt, dass die evolutionären Mechanismen bei verschiedenen Populationen für ähnliche Anforderungen unterschiedliche „physiologische Lösungsstrategien“ entwickelt haben. Diese im Adaptationsvermögen an wechselnde Umwelt- und Haltungsbedingungen genetisch different prädisponierten Tiere bilden die Basis für die züchterische Auswahl an bestimmte Standort- und Haltungsbedingungen optimal angepasster Tiere. Um diese Optionen der Auswahl von

Tieren zu nutzen sowie Maßnahmen zur Optimierung von Haltungssystemen durchzuführen, ist ein umfassendes Verständnis der Mechanismen der Genotyp-Umwelt-Mechanismen erforderlich. Die Aufklärung der genetisch-funktionalen Aspekte der Biodiversität der Nutztiere, insbesondere auch der großen, weltweit verbreiteten Rassen, stellt deshalb eine wichtige Voraussetzung für die weitere erfolgreiche Zuchtarbeit, für die Gestaltung tiergerechter Haltungsbedingungen und für den Erhalt der biologischen Vielfalt der Nutztiere selbst als „Rohstoff“ der Züchtung dar. Dieses Wissen kann dazu verwendet werden, entsprechende Anlagen komplementär zu nutzen, Bedürfnisse von Tieren zu bestimmen sowie eventuelle Anpassungsprozesse (z. B. Erregerresistenzen) durch alternative genetisch-funktionale Lösungsansätze zu kompensieren. Unter Verwendung von hochentwickelten Sensoren zur Erfassung physiologischer Zustände und der Nutzung Biomarker-basierter Indikatoren zur objektiven Erfassung individueller Bedürfnisse der Tiere sollte eine individuelle und standortangepasste Fütterung („targeted farm animal nutrition“) und Haltung („climate smart livestock farming“) der Nutztiere ermöglicht werden. Gleichzeitig haben Tiergesundheit und Tierwohlergehen neben der Betrachtung ethischer Fragen eine große Bedeutung in der Wirtschaftlichkeit der Tierhaltung und damit Einfluss auf die Produktion tierischer Rohstoffe. Große Forschungsanstrengungen sollten daher in die Früherkennung und Identifizierung von Krankheitserregern sowie in die Entwicklung von Indikatoren für Tiergesundheit und Wohlergehen gelegt werden. Aus diesem Grund müssen innovative Strategien zur bedarfsgerechten Tierernährung, zur Prävention des Ausbruchs und der Ausbreitung von Tierseuchen und zur tiergerechten Haltung entwickelt werden.

Einen wichtigen Beitrag/Lösungsansatz zur nachhaltigen Steigerung der Produktionsmenge stellt die sektorübergreifende Zusammenführung innovativer Konzepte aus Pflanzenbau und -züchtung, Futterlagerung und Futtermittelerzeugung (neue Futterkonservierungs- bzw. -zusatzstoffe wie regionale heimische Pflanzenstoffe), Tierzucht, -haltung und -fütterung („precision livestock breeding“, „targeted farm animal nutrition“, „smart livestock farming“) sowie Informations- und Kommunikationstechnologie (neue Sensoren, neue RFID-Technologien und Expertensysteme) dar. Mit diesem Ansatz wird angestrebt, den Futterwert von Pflanzen und die Bedürfnisse von Tieren genauer zu diagnostizieren, zielgerichtet entsprechende Futterpflanzen zu züchten, die Lagerverluste von Futtermitteln zu verringern, auf der Grundlage heimischer Pflanzen neuartige Futterzusatzstoffe zu entwickeln, Sensoren zur Erfassung individueller Indikatoren des Tierwohls und der Tiergesundheit zu entwickeln und eine möglichst bedarfsgerechte „individualisierte“ Fütterung abzuleiten. Eine bedarfsgerechte Fütterung verspricht eine verbesserte Futterwirksamkeit bei gleichzeitig hoher Tiergesundheit und geringeren Umwelt- und Klimawirkungen. Weltweit sind aber auch völlig neue Systeme auf der Basis örtlich hervorragend angepasster und gegebenenfalls nicht oder nur teilweise domestizierter Tiere zu entwickeln („game farming“).

4.1.3 Phytomedizin

Die Effizienz der Produktionssysteme im Pflanzenbau wird in Zukunft auch erheblich durch Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Phytomedizin bestimmt. Phytomedizin ist die Wissenschaft von den Krankheiten und Beschädigungen der Pflanzen, ihren Ursachen, Erscheinungsformen, ihrem Verlauf und ihrer Verbreitung sowie von den Maßnahmen und Mitteln zur Gesunderhaltung der Pflanzen und Bekämpfung der Schaderreger.⁷⁰ Intensive Forschung ist erforderlich, um die komplizierten Wirt-

Pathogen-Beziehungen, die teils in tritrophischen oder multitrophischen Systemen funktionieren, weiter genetisch und biologisch aufzuklären und auf dieser Basis effiziente und nachhaltige Kontroll- und Abwehrverfahren zu entwickeln. Forschung zum Fortschritt der Resistenz- oder Toleranzzüchtung ist einer der wesentlichen vorbeugenden Bausteine für integrierte Pflanzenschutzsysteme. Die Züchtung allein kann die drängenden Fragen des Pflanzenschutzes jedoch nicht umfassend lösen. Für die gezielte Bekämpfung von Schädlingen und Pflanzenkrankheiten muss deshalb auch die Erforschung und Entwicklung spezifischer Wirkstoffe und biologischer/biotechnischer Verfahren für den Pflanzenschutz in den Fokus genommen werden. Eine neu ausgerichtete intensivere Forschung zu Naturstoffen, Pflanzeninhaltskomponenten oder Antagonisten ist notwendig, um diese – neben synthetischen Stoffen – im Pflanzenschutz systematisch verwenden zu können. Besonders interessant sind hier beispielsweise die stofflichen Komponenten von pflanzlichen Signalstoffen, die beispielsweise zu „push and pull“-Systemen der Schädlingsbekämpfung etabliert werden könnten. Genetische und biochemische Forschungen an Pflanzen, Schaderregern und Antagonisten sind eine wesentliche Grundlage, um im engen Verbund mit der Resistenzzüchtungsforschung und pflanzenbaulichen Maßnahmen ein integriertes System zu schaffen. Modellierete, auf Klima- und Witterungsdaten basierende computergestützte Prognosesysteme für das Auftreten von Schaderregern müssen auf der Basis von Datenbanken wissenschaftlich weiterentwickelt und in Praxisanwendungen transferiert werden. In diesem System spielen die Maßnahmen der Pflanzengesundheit, also der Verhinderung der Aus- und Verbreitung gefährlicher, teils invasiver Schaderreger und Wildpflanzen, die aufgrund des wachsenden internationalen Handels und veränderter klimatischer Bedingungen im Steigen begriffen ist, eine wesentliche Rolle. Forschung zu Epidemiologie und Populationsdynamik solcher Organismen, die Erstellung wissenschaftlicher Risikoanalysen und Verbreitungsprognosen sind Grundwerkzeuge, um den Anbau biobasierter Rohstoffe nicht bereits im Ansatz zu gefährden. Von zunehmender Bedeutung sind hier die vektorübertragbaren Pathogene, wie Virose und Phytoplasmosen. Sie wechseln ihr Ausbreitungsgebiet mit den Vektoren (meist Insekten) in Abhängigkeit von der Verschiebung der Klimagebiete. Mit neuen Kulturpflanzenarten lässt sich zudem ein „Nachwandern“ der Schaderreger beobachten, wie beispielsweise derzeit bei Maisschädlingen (*Diabrotica virgifera*, Maiszünsler) oder Maiskrankheiten (z. B. Blattfleckenreger). Das International Plant Protection Convention (IPPC) sollte nicht nur administrativ agieren, seine Aktivitäten müssen stärker als bisher durch Forschung unterstützt werden. Die Bundesrepublik Deutschland hat sich hier zur Mitarbeit verpflichtet.

4.1.4 Resilienzforschung

Aufbauend auf einem problemlösungsorientierten Systemansatz spielt die Resilienzforschung im Zusammenhang mit der Betrachtung ganzer Wertschöpfungsketten eine besondere Rolle, da sie die Toleranz eines Systems (z. B. eines Biotops wie Boden, Tierstall, der Makroorganismus oder eine Wirtschaftsregion mit spezifischen Warenströmen) gegenüber Störungen oder Krisen untersucht. Innovative Resilienzmethoden dienen der ganzheitlichen Charakterisierung sowie Steuerung und Regelung biologisch-technischer sowie sozio-ökonomischer Systeme. Diese Systeme müssen von innen oder außen kommende Störungen ihres Zustands ausgleichen oder unter Aufrechterhaltung ihrer Systemintegrität ertragen. Im ersten Fall (Resilienz im engen Sinne) muss also der ungestörte Ausgangszustand einen Attraktor der Dynamik darstellen, wogegen im zweiten Fall die Menge der tolerablen Systemzustände unter der Störungswirkung unveränderlich sein muss (z. B. multi-resistente Mikroor-

ganismen nehmen in ihrer Häufigkeit des Auftretens wieder ab, wenn Selektionsdruck durch Verzicht von Antibiotikaeinsatz wegfällt). Schematisch kann man sich Resilienz auch als Teilmenge des Zustandsraums vorstellen, innerhalb dessen ein System nach einer Störung (oder Krise) immer wieder zum „Grundzustand“ zurückkehrt. Ein eng verwandter Begriff ist Selbstregulation biologisch-technisch-organisatorischer Systeme.

4.2 Steigerung der Ressourceneffizienz

Trotz der in den vergangenen Jahren enormen Produktivitäts- und Effizienzsteigerungen im Pflanzenbau und in der Nutztierhaltung und den damit verbundenen positiven Wirkungen auf Wirtschaftlichkeit, Umwelt- und Klimaschutz ist die Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungsketten im Pflanzenbau, der Nutztierhaltung, der Ernährungsindustrie sowie der Reststoffverwertung sehr gering. Beispielsweise gelangt derzeit nur ein Fünftel des aus dem Gestein abgebauten Phosphors über das Ackerland in die Nahrung. Oft besteht kein absoluter Mangel an Phosphor in mitteleuropäischen Böden, es besteht ein Mangel an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden. Über Intensivierung der Züchtung phosphat-effizienter Sorten und innovative mikrobiologische Systeme kann die Nährstoffeffizienz verbessert werden. Hier seien auch Möglichkeiten zur Phosphorrückgewinnung außerhalb der Landwirtschaft genannt, wie sie etwa in der Aufarbeitung von Klärschlamm bestehen.

Abnehmende Wasservorräte in vielen Teilen der Welt, auch in Europa, werden neben steigenden Kosten zu einer schlechteren Produktqualität oder einer geringeren Verfügbarkeit an Rohmaterialien führen. Darüber hinaus weisen verschiedene Schätzungen darauf hin, dass weltweit heute etwa die Hälfte der Lebensmittel verlorengelht, bevor sie den Privathaushalt erreichen.⁷¹ Die Gründe für diese sogenannten Nachernteverluste liegen unter anderem in der Verrottung bereits auf dem Feld und Vernichtung durch Schädlinge und Krankheitserreger auf dem Transport und im Lager sowie Tierseuchen, im ineffizienten Management der Zulieferketten zum Lebensmitteleinzelhandel, Schwachstellen im Kühlkettenmanagement sowie in unzureichenden lokalen Transport- und Lagerinfrastrukturen in den Herkunftsländern Asiens, Afrikas und Südamerikas. Daneben führen stringente Vorschriften für Lagerungsdatierungen von Lebensmitteln im Zusammenhang mit unzureichenden Technologien für Lagerung oder Zweitverwertung zum Wegwerfen und Vernichten von biobasierten Rohstoffen ohne sinnvolles Recycling. Ein weiteres Problem besteht im mangelhaften Anbaumanagement, indem beispielsweise Gemüsekontingente an den Marktanforderungen vorbei produziert, somit nicht abgesetzt, sondern untergepflügt werden.

Die Erhöhung der Verwertungseffizienz der verfügbaren biogenen Rohstoffe in allen Verwertungssträngen stellt neben nachhaltigen Ertragssteigerungen damit eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung der „nachhaltigen Rohstoffstrategie“ dar. In den folgenden Bereichen lässt sich Handlungsbedarf wie folgt formulieren:

Food: Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Nahrungsmittelleffizienz besteht in der Verringerung von Verlusten im Nahrungssystem. Nach Schätzungen der FAO geht rund ein Drittel der produzierten Nahrungsmittel während der Produktion, der Verarbeitung oder dem Transport verloren oder landet durch den Endverbraucher auf dem Müll. In anderen Studien werden sogar Nachernteverluste von bis zu 50% beschrieben. Insbesondere Entwicklungsländer verlieren einen großen Teil ihrer Nahrungsmittel

während der Verarbeitung aufgrund schlechter Lager- oder Transportbedingungen. Aufgrund unzureichender Pflanzenschutzmaßnahmen in der Produktion gelangen Pathogene mit Früchten in das Lagergut und befallen Früchte und Pflanzenprodukte teils von innen heraus (z. B. *Alternaria* spp. oder *Monilia* sp. an Apfel, *Penicillium* spp. an Citrusfrüchten). Gelangen latent befallene Früchte in die Fruchtsaftproduktion, sind unzulässige Mykotoxingehalte in den Säften nicht auszuschließen. Aber auch mangelhafte Lagerungs- und Hygienebedingungen sind Ursachen für raschen Befall der Vorratsgüter mit Schädlingen (Reiskäfer, Mehlkäfer, Getreidekäfer, Dörrobstmotten, etc.) und mykotoxinbildenden Pilzen (*Aspergillus*, *Fusarium*, *Rhizopus*, *Mucoraceae*). Befallene Güter sind oft nur noch energetisch verwertbar, sofern Anlagen dafür überhaupt vorhanden sind.

Feed

In der Aufzucht von Tieren ist die Futtermittelverwertungseffizienz zu erhöhen. Vor allem suboptimale Futterbewertungssysteme und veraltete Energie- und Nährstoffbedarfsempfehlungen in der Tierernährung führen hier zu Fehlentwicklungen. Zudem könnte eine verbesserte Futterkonservierung dazu beitragen, Tiere – auch witterungsabhängig – optimal im Sinne einer Futtereffizienz zu ernähren. Eine unzureichende Kenntnis der Genotyp-Umwelt-Interaktion von Nutztieren führt zu einer mangelhaften Standortanpassung.

Fibre

Ein wichtiger Ansatz zur Steigerung der Rohstoff- und Flächeneffizienz ist die Entwicklung neuer Bio-raffinerie-Konzepte für die Kaskaden- und Koppelnutzung.⁷² Unter „Kaskadennutzung“ versteht man die sequentielle (zeitlich aufeinanderfolgende) Nutzung von biobasierten Rohstoffen für stoffliche und energetische Anwendungen. Hierfür müssen insbesondere Konzepte für innovative Nutzungskaskaden entwickelt werden, die eine möglichst mehrfache und hochwertige stoffliche Nutzung der biobasierten Rohstoffe vorsehen und im Anschluss eine effiziente energetische Weiterverwertung sicherstellen. Dies kann als wichtiger Beitrag zur Verringerung der Flächenkonkurrenz zwischen Nahrungsmittelproduktion und stofflicher Nutzung verstanden werden. Zur weiteren Verbesserung der Rohstoffeffizienz sollte die Nutzung der anfallenden Neben- und Koppelprodukte in die Prozessabläufe integriert werden, so dass im Idealfall alle Rohstoffanteile verarbeitet werden können. Allerdings dürfen diese Nutzungsansätze nicht langfristig zur totalen Verarmung landwirtschaftlicher oder forstlicher Böden mit Humussubstanzen führen, sonst gerät die Bodenfruchtbarkeit in Gefahr. Darüber hinaus kann die Entwicklung neuer Aufschlussmethoden die Einsatz- und Verwertungsmöglichkeiten für biobasierte Rohstoffe, Abfall- und Reststoffe erhöhen.

Fuel

Eine verlässliche, ökologisch nachhaltige und bezahlbare Versorgung mit erneuerbaren Energien ist eine Grundvoraussetzung für die Energiewende. In Bezug auf Biomasse müssen effizientere Technologien zur Umwandlung von biobasierten Rohstoffen in Bioenergie entwickelt werden. Biogene Reststoffe (Nebenprodukte und Abfälle, wie z. B. Stroh, Landschaftspflegematerial/Baumschnitt, Bioabfälle) werden noch nicht komplett genutzt. Allein in Deutschland könnten 8 bis 13 Mio. t Stroh nachhaltig energetisch genutzt werden, sofern die Kohlenstoffbilanz des Bodens nicht beeinträchtigt wird. Weitere ungenutzte Potentiale im Bereich der Koppelnutzung (z. B. gekoppelte Biodiesel- und Futtermittelproduktion bei der Verarbeitung von Ölsaaten). Effizientere Nutzung in Deutschland muss sich künftig

stärker an den Erfordernissen des zunehmend regenerativen Energiesystems ausrichten und z. B. flexibel Residuallast bereitstellen, wenn fluktuierende Energieträger wie Sonne oder Wind nicht verfügbar sind. Weltweit wird zudem durch niedrige Wirkungsgrade der Konversionstechnologien (sowohl bei der Nutzung von Festbrennstoffen als auch bei der Nutzung von Biogas) die Biomasse vielfach unzureichend verwertet. Großes Potential liegt in der Etablierung und „richtigen“ Nutzung von technisch ausgereiften Öfen und Kesseln mit höherem Wirkungsgrad.

Flowers & Fun

Die Stadt- und Landschaftsplanung in urbanen Räumen orientiert sich häufig in erster Linie an architektonischen, oft auch an künstlerischen Kriterien. Die maßgeblichen Strukturelemente im urbanen Grün oder auf Freizeitflächen, beispielsweise Großbäume und Gehölze, aber auch Einsaatflächen und Staudenpflanzungen, müssen stärker unter dem Aspekt ihrer biologischen Bedürfnisse und Lebensfähigkeiten geplant werden. Monetär hochwertige Großgehölze beispielsweise, in Baumschulen unter hohem Aufwand über mehrere Jahre produziert, müssen mit Blick auf ihre Überlebenschancen gepflanzt und gepflegt werden, damit Krankheitsbefall und Verluste an Werten und Rohstoffen vermieden werden. Haus- und Kleingärten mit rund 1,2 Mio ha Fläche in Deutschland werden in ihrer ökologischen und ökonomischen Bedeutung oft unterschätzt. Ihre Funktion im Hinblick auf ökologische Vielfalt und Natur gilt es weiterzuentwickeln. Im Gartenbau unter Glas gilt es die Potentiale zur effizienten Energienutzung auszuschöpfen.

Übergreifende Ansatzpunkte: Aus Effizienzgesichtspunkten ebenfalls anzustreben ist eine bessere Abfall- und Reststoffverwertung sowie die Entwicklung neuer Recyclingkonzepte entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Unausgeschöpfte Potentiale bestehen hier vor allem in der energetischen Verwertung von Stroh, Restholz, Pflanzenabfällen und Gülle. Die Nutzung von Abfällen und Reststoffen steht nicht in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion und auch die mit der Verbrennung von Erdöl verbundenen CO₂-Emissionen könnten auf diese Weise reduziert werden.

4.3 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen

Es gibt eine Reihe von internationalen Maßnahmen, die einen großen Einfluss auf die Entwicklung der Bioökonomie nehmen werden. Für die Forschung in der Pflanzen- und Tierzucht ist der Zugang zu genetischen Ressourcen essentiell. Dieser wird in der Convention on Biological Diversity (CBD) und dem zugehörigen Nagoya-Protokoll geregelt. Der Umgang mit Arten, die für die Ernährung wichtig sind, ist im Internationalen Vertrag für Pflanzengenetische Ressourcen für Ernährung und Landwirtschaft (ITPGRFA) reguliert. Der EU-Verordnungsentwurf zur Umsetzung des Nagoya-Protokolls sieht derzeit Regelungen vor, die den Zugang zu genetischen Ressourcen erschweren und möglicherweise unmöglich machen. Zwar schafft der ITPGRFA einen standardisierten Zugang zu genetischen Ressourcen, ist aber in seinem Anwendungsbereich auf bestimmte Arten für die Verwendung im Bereich Food/Feed beschränkt. Nutzungsrichtungen, die für die Bioökonomie von Bedeutung sind (Energie, nachwachsende Rohstoffe), bleiben ausgeschlossen. Damit besteht die Gefahr, dass die Forschung und Züchtung von ihrem wichtigsten Rohstoff, der genetischen Diversität, abgeschnitten wird⁷³. Um einerseits der berechtigten Forderung nach einer gerechten Nutzung und dem Erhalt der Biodiversität Rechnung

zu tragen, andererseits aber auch die Entwicklung der Bioökonomie nicht zu erschweren, sollten die Auslegungen der CBD und die Nagoya-Verordnung so ausgestaltet werden, dass sie praktikabel sind.

Das zunehmend stringente Pflanzenschutzrecht in Europa wird mittelfristig zu einer Reduktion der Verfügbarkeit an effizienten chemischen Möglichkeiten führen, landwirtschaftliche und gärtnerische Kulturen vor Schäden und Verlusten durch biotische Schadensursachen zu schützen, während parallel neue Schaderreger über den weltweiten Handel eingeschleppt werden. Viele Wirkstoffe stehen vor dem Hintergrund spezieller Leitlinien und Prüfinhalte (z. B. comparative assessment) auf dem kritischen Prüfstand. Die Verengung der Wirkstoffpalette wird einerseits die Umweltwirkungen entlasten, sie wird andererseits aber auch die Probleme mit resistenten Schaderregern in der Landwirtschaft erhöhen und gesamtökonomisch weniger bedeutende Kulturen (minor uses, z. B. Gemüsekulturen, Beerenobst, Gewürzkräuter) ohne effektiven Schutz zurücklassen. Es besteht dringender Forschungs- und Entwicklungsbedarf – einerseits zu alternativen Pflanzenschutzverfahren, andererseits dazu, über intelligente Risiko-Minderungssysteme die vorhandenen Wirkstoffe möglichst lange im Sinne einer nachhaltigen Intensivierung nutzungsfähig zu halten.

4.4 Rohstoffsicherungsstrategien

Die Entwicklung einer internationalen Rohstoffstrategie – wie sie beispielsweise im Bereich anderer Rohstoffe wie seltenen Erden bereits existiert – ist unter Annahme der dargestellten Limitierungen auch für die biobasierten Rohstoffe zunehmend relevant. Grundsätzlich geht es dabei um die Gestaltung von – möglichst international abgestimmten – Rahmenbedingungen bezüglich der Produktion von und des (internationalen) Handels mit biobasierten Rohstoffen aus Land-, Forst-, und Fischwirtschaft und Aquakultur. In diesem Zusammenhang stellt auch der Abschluss strategischer Rohstoffabkommen – mit einem Fokus auf der Einhaltung von Mindest-Nachhaltigkeitsstandards in der Produktion – eine Option dar. Integriert werden sollten dabei z. B. die „Freiwilligen Leitlinien zur verantwortungsvollen Verwaltung von Boden- und Landnutzungsrechten, Fischgründen und Wäldern“⁷⁴. Diese 2012 vom Ausschuss für Welternährungssicherung der UN beschlossenen Leitlinien sollten als Instrument gegen Landraub (Land Grabbing) eingesetzt werden. Dort sind detaillierte Mindeststandards für Investitionen definiert. Die Leitlinien beziehen sich auf Ansätze zur Sicherstellung der Partizipation von Betroffenen, der Wahrung der Rechte indigener Bevölkerungen und der Verhinderung von Korruption. Auszuloten sind darüber hinaus auch Möglichkeiten zur Etablierung internationaler Nachhaltigkeitsstandards oder zur Förderung nachhaltiger Produktionsbedingungen bei importierter Ware. So sollte der Anspruch an eine effiziente und nachhaltige Flächennutzung grundsätzlich internationaler Standard sein.

Rohstoffsicherungsstrategien müssen also Handelsaspekte und Nachhaltigkeit möglichst breit vereinen. Dies kann auf verschiedenen Wegen verfolgt werden. Um diese zu konkretisieren, sind entsprechende Studien und die Entwicklung entsprechender Politikstrategien notwendig, welche folgende Handlungsfelder vertieft untersuchen sollten:

- (a) Welche Prioritäten für eine nationale Rohstoffsicherungsstrategie ergeben sich bei einer Neubewertung der Im- und Exportfrage für alle Verwendungsbereiche? Welche Chancen er-

geben sich aufgrund von Deutschlands Stärken in Forschung und Entwicklung sowie in der industriellen Produktion (im Sinne der internationalen Arbeitsteilung aus wettbewerbstrategischer Perspektive) bei Konzentration auf in der Wertschöpfungskette höher veredelte „High Value – Low Volume“-Produkte wie z. B. Lebensmittel, Biochemikalien und Pharmaerzeugnisse? Zu eruieren sind vor diesem Hintergrund auch die Chancen und Risiken des Exports von Know-how und Technologien für Deutschland und in Frage kommende Partnerländer. So könnte beispielsweise der Technologietransfer in Form von Investitionen in die landwirtschaftliche Infrastruktur in – andernorts schon verbreitete – produktivitätssteigernde Technologien (unter anderem Zugang zu Dünger, Pflanzenschutz, modernem Saatgut) einen wichtigen Ansatz zur Beseitigung der insbesondere in den Entwicklungsländern festzustellenden Ertragslücken („Yield gaps“) darstellen.⁷⁵ In diesem Falle müssen auch neue Regelungen des sozial verträglichen Zugangs zu landwirtschaftlichen Inputfaktoren und Saatgut (insbesondere für Kleinbauern in den Entwicklungsländern) entwickelt werden.

- (b) Inwieweit kann bei der Gestaltung von Rahmenbedingungen für die Produktion und den Handel biobasierter Rohstoffe der ökologische Fußabdruck berücksichtigt werden? Dieser beschreibt den durch menschlichen Konsum erzeugten Verbrauch an Naturkapital (insbesondere von Wasser, Böden, Nährstoffen). Um den gesamten – auch andere knappe Ressourcen umfassenden – Ressourcenfußabdruck der deutschen Bioökonomie so gering wie möglich zu halten und darüber hinaus internationale Nachhaltigkeitsstandards entwerfen zu können, müssen sinnvolle umfassendere „Footprint“-Konzepte auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse entwickelt werden, die ein kontinuierliches und systematisches Nachhaltigkeitsmonitoring erlauben. Vorhandene Instrumente⁷⁶ zur Messung und Beurteilung nachhaltigkeitsbezogener Kriterien sind dafür zu verbessern beziehungsweise auf Basis wissenschaftlicher Daten neu zu entwickeln. Hier ist zu prüfen, ob für den Ressourcenfußabdruck der weltweit gehandelten biobasierten Rohstoffe Kriterien für den Verbrauch an Wasser, Energie, verfügbares Land etc. international standardisiert werden können und ob bei der Entwicklung neuer „Footprint“-Konzepte der Ansatz der Ökosystemdienstleistungen als Konzept hilfreich ist.
- (c) Ein weiterer konkreter Ansatz zur gezielten Förderung stärkerer Nachhaltigkeit stellt die – auf entsprechenden wissenschaftlichen Messsystemen basierende und international vergleichbare – Zertifizierung dar. Idealfall wäre ein Zertifizierungskonzept mit einer entsprechenden Produktkennzeichnung für Nahrungs- und Futtermittel, das auf die komplette Wertschöpfungskette bezogen ist. Damit könnte der Beitrag von Lebensmitteln zur Ernährungssicherung und zur Reduzierung ökologischer und sozialer Kosten beurteilt werden und dem Konsumenten helfen, nachhaltig produzierte Produkte auszuwählen. Somit würden vorteilhafte landwirtschaftliche Konzepte bevorzugt werden.⁷⁷ Eine solche Zertifizierung ist in Deutschland im Bereich der Produktion von Rohstoffen im Bereich der Bioenergie in Form der Biomassestrom- und Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (BioSt-NachV und Biokraft-NachV) bereits existent. Dies könnte als Vorlage für die Entwicklung weiterer Zertifizierungen genutzt werden. Die von der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) unterstützte „Initiative Nachhaltige Rohstoffbereitstellung für die stoffliche Biomassenutzung“ (INRO) beschäftigt sich bereits mit den Möglichkeiten der Zertifizierung im Bereich der stofflich genutzten Biomasse.

- (d) Welche Möglichkeiten und Herausforderungen bieten Rohstoffpartnerschaften mit anderen Ländern? Hier stellen sich grundsätzliche Fragen wie 1) soll Deutschland strategische Rohstoff-Partnerschaften mit anderen Ländern (z. B. Südamerika) eingehen und wenn ja, 2) welche Rohstoffe sind von besonderem Interesse für Deutschland, 3) sollten im Austausch Know-how und Technologien exportiert werden, 4) nach welchen Kriterien sollten mögliche Zielländer ausgewählt werden, 5) welche Chancen und Risiken sind mit solchen Rohstoffpartnerschaften für Deutschland und die potentiellen Partnerländer verbunden oder 6) durch welche konkreten Maßnahmen/Instrumente ist die Nachhaltigkeit (in Bezug auf die Produktion biobasierter Rohstoffe und die indigene Bevölkerung) in diesen Partnerschaften sicherzustellen.

Gerade für ein Land wie Deutschland, das zwar über eine sehr effiziente Landwirtschaft, jedoch aber über vergleichsweise wenig biobasierte Rohstoffe verfügt, sind Rohstoffsicherungsstrategien ein wichtiges Werkzeug, um das Fundament für eine biobasierte Wirtschaft zu legen. In Bezug auf Deutschlands internationale Verantwortung ergeben sich jedoch große Herausforderungen, Partnerschaften gerecht und zum beiderseitigen Vorteil auszugestalten.

4.5 Strategische Begleitmaßnahmen

Alle im Rahmen der Rohstoffstrategie zu ergreifenden Aktivitäten sollten durch Maßnahmen der strategischen Kontrolle begleitet werden. Diesbezüglich böte sich die Etablierung von Monitoring- und Berichtssystemen zur kontinuierlichen, systematischen und umfassenden Erfassung relevanter Entwicklungen im Bereich biobasierter Rohstoffe (z. B. bezüglich des Wechselspiels der verschiedenen Determinanten von Angebot und Nachfrage, des Verbrauchs an natürlichen Ressourcen etc.) möglichst auf internationaler Ebene an. Mit Hilfe der so erfassten Daten könnten die Auswirkungen der Strategieumsetzung analysiert und zukünftige Trends im Rahmen von Szenario-Modellen prognostiziert werden. Aufbauend auf den hierbei gewonnenen Erkenntnissen könnten die Ziele und Instrumente der Rohstoffstrategie (im Sinne einer lernenden Strategie) regelmäßig überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Ebenfalls sollten Instrumente zur Sicherstellung der Nachhaltigkeit der Produktion – und langfristig auch der Nutzung – von biobasierten Rohstoffen in Form von Indikatoren, Standards und Zertifizierungssystemen entwickelt werden.

5. Empfehlungen

Unter Berücksichtigung der vorstehend beschriebenen Trends und Faktoren lassen sich folgende Empfehlungen für eine wirksame Politik geben, mit der Deutschland einen bestmöglichen Beitrag zur Deckung des weltweiten Ressourcenbedarfs leisten kann. Dabei ist sicherzustellen, dass die öffentlichen Gelder mit der maximalen volkswirtschaftlichen Effizienz eingesetzt werden, also vor allem in Bereichen, in denen die Privatwirtschaft ohne staatliche Förderung nicht selbst aktiv wird oder sich gemeinsam mit den öffentlichen Geldern ein hoher Hebel erzielen lässt.

5.1 Steigerung der Produktion

Das Konzept der nachhaltigen Intensivierung zielt darauf ab, die landwirtschaftliche Produktivität und damit die Anbauerträge und tierischen Leistungen zu steigern und dabei gleichzeitig die negativen Umweltwirkungen, d. h. den Ressourcenfußabdruck, zu reduzieren. Von zentraler Bedeutung ist dabei zum einen der schonende bzw. effiziente Umgang mit den begrenzt verfügbaren Ressourcen Boden, Wasser, Energie und Arbeitskraft sowie verschiedenen weiteren Rohstoffen (z. B. Phosphor). Zum anderen spielen umwelt- und klimarelevante Ausscheidungen von Nutztieren, wie die von Methan, Harn und Kot eine Rolle, welche die Elemente Phosphor und Stickstoff enthalten. Die Förderpolitik ist an diese Ziele anzupassen. Deshalb ist verstärktes Engagement in Forschung und Entwicklung zur nachhaltigen Steigerung der Produktion biobasierter Rohstoffe anzuraten:

- a) Pflanzensorten und Tierrassen, die eine höhere Ertragsleistung/Ertragssicherung/Leistung bei weniger „Input“ zeigen, sollten entwickelt werden, insbesondere durch die wissenschaftsbasierte Integration von genomischer und phänotypischer Selektion in einem einheitlichen Züchtungsansatz.
- b) Im Sinne einer Präzisionslandwirtschaft sind neue Konzepte in der Pflanzen- und Tierproduktion mit besonderer Rücksicht auf Landtechnik zu entwickeln.
- c) Strategien zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, nachhaltigen Ressourcennutzung insbesondere von Flächen, Wasser und Nährstoffen, aber auch zu biologischen oder technologischen Abwehrsystemen gegen Schadursachen, sind zu entwickeln.
- d) Alternative Produktionstechnologien aus dem Bereich der bodenunabhängigen/-sparenden Produktion (Vertical Farming, Fleisch aus Gewebekulturen, biobasierte Rohstoffe aus Aquakulturen) sollten im Hinblick auf ihren Ressourcenverbrauch und ihr Potential zur Ergänzung der bodenabhängigen Produktion analysiert und gegebenenfalls ausgebaut werden.
- e) Vertreter der konventionellen und ökologischen Landwirtschaft sollten in einen Dialog treten, um gemeinsam Effizienztechnologien zur nachhaltigen Steigerung der Erträge zu entwickeln.

5.2 Nutzungs- und Erhaltungskonzepte der Biodiversität

Biologische Vielfalt und genetische Diversität sind der Rohstoff für die Züchtung leistungs- und anpassungsfähigerer Pflanzensorten und Tierrassen und damit für eine nachhaltige Steigerung der Produktion biogener Rohstoffe. Sie sind zugleich auch ein Schlüsselfaktor für die Erforschung neuer Antago-

nistenarten von Krankheitserregern und Schädlingen sowie zur Entwicklung neuer zukunftsweisender biologischer und biotechnischer Pflanzenschutzsysteme.

- a) Genomforschung und Phänotypisierung im Feld sind unter kontrollierten Bedingungen voranzutreiben, um die Evaluierung der in den Genbanken lagernden genetischen Ressourcen zu ermöglichen. Nur so kann die genetische Vielfalt innerhalb von Arten für deren gezielte züchterische Verbesserung nutzbar gemacht werden (De novo- und Re-Sequenzierung; umfassende molekulare Profilanalysen, Allel-Mining). Diese Daten müssen der Öffentlichkeit und Züchtung zugänglich gemacht werden, um gezielt relevante genetische Ressourcen identifizieren zu können. Dazu dienen auch die Genomforschung, Evaluierung, Charakterisierung und selektive Entwicklung antagonistischer Organismen einschließlich entomopathogener Viren zur gezielten Entwicklung moderner nachhaltiger biologischer Systeme zum Schutz von Kulturpflanzen.
- b) Neue Konzepte und biostatistische Verfahren für das Pre-Breeding sollten entwickelt werden, um die schnellere und effizientere züchterische Einlagerung wertvoller Eigenschaften in angepasste, moderne Pflanzensorten und Tierrassen sowie moderne biologische Pflanzenschutzsysteme zu ermöglichen.
- c) Neue Konzepte für die Ausgestaltung und Erweiterung der Agrobiodiversität sind im Sinne einer nachhaltigen Intensivierung der Agrarproduktion zu erforschen. Dazu gehören insbesondere Konzepte für die optimale Ausgestaltung von Fruchtfolgen unter deutlicher Erhöhung der Zahl nutzbarer Kulturpflanzenarten und Tierrassen sowie biologischer Produktionssysteme. Auch an den Standort angepasste Konzepte eines optimalen Fruchtfolge- und Düngungsmanagements sind zu entwickeln, welche sowohl das von der Biodiversität bereitgestellte bodeninterne Nährstoffnachlieferungspotential als auch das Nährstoffaneignungspotential der Fruchtfolgeglieder einbeziehen, um Nährstoffkreisläufe so weit wie möglich zu schließen.
- d) Im Hinblick auf den Erhalt und die Nutzung der Biodiversität sind international abgestimmte Strategien zu entwickeln. Mögliche Effekte der nachhaltigen Produktionssteigerung auf die Biodiversität sind zu beobachten.

5.3 Methoden der Züchtungsforschung

Die prädiktive Züchtung versucht, die Erkenntnisse aus Genomforschung, Phänotypisierung und integrierender Bio- und Züchtungsinformatik bezogen auf konkrete biologische Fragestellungen zusammenzuführen. Pflanzen oder Tiere können somit biologisch besser verstanden werden. Dies ist die Grundlage für eine gezielte, wissenschaftsbasierte und vorhersagende Pflanzen- und Tierzucht:

- a) Die Genomforschung sollte mit Hilfe innovativer molekularer Technologien die genetische Vielfalt im Sinne einer verbesserten Züchtungseffizienz evaluieren.
- b) Neue physikalische und molekularbiologische Verfahren zur Phänotypisierung von Pflanzen sind zu entwickeln.
- c) Bioinformatik und -statistik sind im Sinne der Anwenderfreundlichkeit als unerlässliches Werkzeug für schnelle Entscheidungen im Selektionsprozess weiterzuentwickeln.

- d) Moderne Methoden sollen die Züchtung präziser, zielgerichteter und effizienter machen.
- e) Die finanzielle und technische Ausstattung der bestehenden Versuchsstationen sowie die Bildung eines koordinierten, langfristig angelegten Feldversuchs- bzw. Großtierversuchsnetzwerks sind notwendig, um die zukünftigen, oft disziplinübergreifenden Fragestellungen der standortbezogenen Agrarwissenschaften beantworten zu können.

5.4 Präzisionslandwirtschaft

Die Produktion pflanzlicher Rohstoffe und die Produktion von Tieren erfordern neben modernen Sorten und Rassen neue Konzepte und Technologien zur Unterstützung des präzisen, standortangepassten Pflanzenbaus und der individualisierten Tierhaltung:

- a) GPS- und sensorgesteuerte Bodenbearbeitungs-, Düngungs-, Pflanzenschutz- und Erntesysteme sollten weiterentwickelt werden, um einen möglichst auf die Einzelpflanze an ihrem jeweiligen Standort angepassten Pflanzenanbau zu ermöglichen.
- b) Neue Technologien des „smart livestock farmings“ sollten erforscht werden, also die Entwicklung und Anwendung indikatorgestützter, sensorbasierter technologischer Lösungen, wie neue RFID-Technologien und Expertensysteme, zur Steuerung und Optimierung von Ressourcenverbrauch, Energie- und Stoffflüssen entlang der Wertschöpfungskette. Dazu gehören auch autonome Maschinen zur Tierbestandskontrolle und deren Betreuung.

5.5 Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit

Etwa ein Drittel des weltweiten Ackerlandes verliert seinen Oberboden schneller, als er wiederhergestellt werden kann. Damit muss dem Erhalt der Bodenfruchtbarkeit erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Erste Schritte wurden mit dem aktuellen Förderprogramm des BMBF BonaRes (Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie) bereits unternommen. Eine nachhaltige Bodennutzungsstrategie muss abgestimmt erfolgen, um generell eine effiziente Nutzung natürlicher Ressourcen und den Erhalt bzw. die optimierte Nutzung von Ökosystemdienstleistungen zu gewährleisten. Zur Umsetzung sind standort- bzw. regionalspezifische Lösungsansätze notwendig. Es sollte die Förderung folgender Aspekte sichergestellt werden:

- a) Neue Konzepte für optimierte Fruchtfolgen sind notwendig. Mit ihnen kann die Nährstoffnutzung verbessert und gleichzeitig der Schaderreger- und Unkrautdruck gesenkt werden.
- b) Konzepte zum Erosionsschutz, z. B. durch den Anbau von Zwischenfrüchten, sollten weiterentwickelt werden.
- c) Nährstoffkreisläufe sollten mit Hilfe bodenbiologischer Prozesse (z. B. Symbionten und Antagonisten) geschlossen werden, um zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Interaktion des pflanzlichen Wurzelsystems mit dem Boden beizutragen.

- d) Neue Methoden der Bodenbearbeitung zum Schutz der Bodenstruktur und Verbesserung der Fruchtbarkeit und Ertragsleistung sollten mit Hilfe moderner Verfahren der Präzisionslandwirtschaft etabliert werden.
- e) Neue Konzepte zur Erhaltung oder zum Aufbau organischer Substanzen im Boden sollten entwickelt werden.

5.6 Steigerung der Ressourceneffizienz

Die Nutzungskonkurrenz zwischen der Verwendung biobasierter Rohstoffe für die Ernährung einerseits und die Verwendung für die energetische und stoffliche Nutzung andererseits ist zu minimieren. Dazu trägt eine effizientere Prozessierung und Nutzung der produzierten Rohstoffe genauso bei wie eine verbesserte Konversion aber auch die Reststoffverwertung, Koppel- und Kaskadennutzung. Hier werden hohe Anforderungen an die technischen Verfahren gestellt.

- a) Mit Hilfe neuer Konzepte und den Erkenntnissen aus Phytomedizin, Landtechnik, Verbraucherinformation sollen Nachernteverluste im Bereich der Lebensmittel vermieden werden. Hierzu müssen neue Infrastruktur- und Logistikkonzepte entworfen werden, um Lager- und Transportverluste zu verringern.
- b) Das Verständnis mikrobieller Prozesse sollte verbessert werden.
- c) Neue Aufschlussverfahren für den non-food-Bereich, insbesondere von Lignin, könnten die Verwertungseffizienz von biobasierten Rohstoffen erhöhen.
- d) Dynamische Ökosystem-Modelle zur ökonomisch-ökologischen Bewertung von Produktionssystemen sind zu entwickeln. Sie müssen alle Glieder der Nahrungskette sowie die Produktion und Verwertung einbeziehen.

5.7 Politische und rechtliche Rahmenbedingungen

Das begrenzte nationale Angebot an biobasierten Rohstoffen erfordert unter anderem handelspolitische Maßnahmen zur Sicherung des Zugangs zu nachhaltig produzierten biobasierten Rohstoffen, aber auch zu genetischen Ressourcen im Einklang mit der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt, die eine praktikable Auslegung der CBD und des Nagoya-Protokolls beinhalten sollte.

- a) Die Priorität der Welternährung ist durch passende Steuermechanismen sicherzustellen.
- b) Mit Hilfe von Szenarien soll eine Abschätzung der zur Substitution von fossilen Rohstoffen und für die anderen Verwendungszwecke notwendigen Rohstoffmengen und der Expansionspotentiale der Weltagrargemeinschaft ermöglicht werden.
- c) In Bezug auf eine Rohstoffsicherung sind strategische Kooperationen zu erwägen, in denen potentiellen rohstoffreichen Partnerländern produktionssteigernde Technologien und Know-how zur Unterstützung bei der Schließung von Ertragslücken zur Verfügung gestellt werden.
- d) Biologische Ressourcen sollten aufgrund ihres ökologischen Fußabdrucks sowie in Bezug auf ihre sozio-ökonomischen Auswirkungen und Nachhaltigkeit bewertbar gemacht werden – etwa durch die Weiterentwicklung von international akzeptierten Zertifikaten und Standards.

5.8 Datenbasis und Monitoring-Struktur

Die nachhaltige Rohstoffstrategie zielt darauf ab, die Nachfrage nach biobasierten Produkten durch Steigerung der Effizienz dauerhaft zu decken. Vor dem Hintergrund zahlreicher Einflussfaktoren ist eine Rohstoffstrategie jedoch nur als „lernende Strategie“ zu etablieren. Daher ist eine regelmäßige Analyse der Entwicklungen bei der Etablierung der Bioökonomie und damit die Überprüfung der Strategie notwendig.

- a) Die Entwicklung der relevanten Sektoren, Art und Umfang der eingesetzten Rohstoffe sowie die Herkunft der Rohstoffe sollte beobachtet werden, um gegebenenfalls eine Soll-/Ist-Stand sowie eine Rohstoffbedarfsanalyse zu erstellen.
- b) Mit Hilfe geeigneter Indikatoren ist die Implementierung neuer Technologien und des Fortschritts anhand von Bewertungsgrößen der Ressourcenproduktivität zu analysieren.
- c) Mit Hilfe entsprechender Analysen sollte der Einsatz biobasierter Rohstoffe in verschiedenen Wertschöpfungsketten der stofflichen und energetischen Nutzung sowie zur Nahrungsmittelherzeugung anhand von Effizienz- und Nachhaltigkeitskriterien überprüft werden, um technische Fehlentwicklungen zu vermeiden.
- d) Es sollte untersucht werden, ob Versorgungslücken (z. B. die „Eiweißpflanzenlücke“) tatsächlich kompetitiv mit heimischen Kulturpflanzen „geschlossen“ werden müssen, obwohl dies die Konkurrenz der Flächennutzung zusätzlich verstärkt.
- e) Es sollte eine Monitoring-Struktur für die Messung von Umwelteffekten der Landwirtschaft aufgebaut werden, um neue Methoden auf ihre externen Effekte hin überprüfen zu können.

5.9 Allgemeine Empfehlungen

- a) Integrierende Forschungsinfrastrukturen und ein deutsches Infrastrukturnetzwerk sind zu etablieren und bilden die Grundlage für umfangreiche nationale und internationale Forschungsk Kooperationen.⁷⁸
- b) In Deutschland ist die Forschung auf allen Ebenen, von der Grundlagen-, über die anwendungsorientierte bis hin zur angewandten Forschung zu fördern. Dabei sollte explizit darauf geachtet werden, wissenschaftliche Ergebnisse ökonomisch zu verwerten und die Wirtschaft in die Entwicklung von Forschungsprogrammen einzubeziehen (z. B. Public Private Partnerships).
- c) Zur Ausschöpfung der Potentiale der Bioökonomieforschung müssen für Wissenschaft und Wirtschaft verlässliche und umsetzbare – auch rechtliche – Rahmenbedingungen geschaffen werden, so dass eine adäquate finanzielle Förderung sichergestellt wird, die auch langfristig orientierte Förderprogramme berücksichtigt.
- d) Der Wandel hin zu einer Bioökonomie stellt eine gesamtgesellschaftliche Herausforderung dar. Aus diesem Grunde sollte die Politik Maßnahmen initiieren und fördern, die auf eine stärkere gesellschaftliche Beteiligung hinwirken, ressourcenintensives Konsumverhalten reduzieren und im Dialog mit der Gesellschaft auf einen verantwortungsvolleren und nachhaltigeren Konsum – nicht nur in Bezug auf biobasierte Produkte – hinwirken.

Quellen:

- 1 Bundesministerium für Bildung und Forschung. (2010). Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030.
- 2 FAO. (2012). World Agriculture Towards 2030.
- 3 Royal Society. (2009). Reaping the benefits.
- 4 Bioökonomierat. (2010). Berichte aus dem Bioökonomierat Nr. 01.
- 5 Bioökonomierat. (2010). Berichte aus dem Bioökonomierat Nr. 02.
- 6 Bioökonomierat (2014), mündliche Kommunikation.
- 7 Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft (2007). The challenge of sustaining soils: lessons from historical experience for a sustainable future.
- 8 FAO. (2012). Globally almost 870 million chronically undernourished - new hunger report.
- 9 Charles J., Godfray et al. (2010). The challenge of Feeding 9 Billion People. Science 327, 812.
- 10 Heinrich-Böll-Stiftung. (2014). Fleischatlas.
- 11 FAO. (2012). World Agriculture Towards 2030.
- 12 Heinrich-Böll-Stiftung. (2014). Fleischatlas.
- 13 von Witzke et. al. (2008). Global agricultural market trends and their impacts on EU agriculture. Working Paper 84/2008.
- 14 Pflanzenforschung.de (7.10.2013).
- 15 Godfray et al. (2010), S. 2770.
- 16 Cassidy et al. (2013). Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare. Env. Res. Lett. S. 2.
- 17 Heinrich-Böll-Stiftung. (2013). Fleischatlas. S. 29.
- 18 Flachowsky et al. (2008). Fleischrinder als Opfer und Mittäter bei der Klimadiskussion. S.15.
- 19 nova-Institut. (2012). Stoffliche Nutzung von Biomasse – Basisdaten für Deutschland, Europa und die Welt. S. 19.
- 20 Verband der chemischen Industrie. (2013). Prognos-Studie – die deutsche chemische Industrie 2030.
- 21 Bioökonomierat (2015) Die deutsche Chemieindustrie – Wettbewerb und Bioökonomie.
- 22 Kaltschmitt et al. (2009). Energie aus Biomasse. Springer.
- 23 Isermeyer et. al. (2012). Bewertung der Leopoldina-Studie zur Bioenergie. S. 27.
- 24 Isermeyer. (2012). Interne Präsentation AG Wettbewerb im Bioökonomierat am 25.11.
- 25 Bioökonomierat (2012). Empfehlungen des Bioökonomierats zur Bioenergie 03.

- 26 REN21 report. (2013). Renewables 2013 Global Status Report – REN21.
- 27 Faaij et al. (2014). International Bioenergy Trade – History, Status & Outlook. Springer.
- 28 BP. (2014). Energy Outlook.
- 29 Dirksmeyer, Fluck. (2013). Wirtschaftliche Bedeutung des Gartenbaus in Deutschland. S. 93.
- 30 Ray et al. (2013). Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. PLoS ONE 8(6): e66428.
- 31 Bringezu et al. (2012). Trends globaler Landnutzung und Perspektiven eines nachh. Ressourcenmanagements. Vortrag Wuppertal-Institut 6.12.2013.
- 32 Foley et al. (2011). Solutions for a cultivated planet. Nature 478, 337–342.
- 33 Godfray et al. (2010), S. 2774; Bringezu et al. (2012).
- 34 Thrän et al. (2011). Die Rolle der Bioenergie in einer zukünftigen Energieversorgung. Lifis Online 4.10.11.
- 35 Bringezu et al. (2012).
- 36 Europäische Umweltagentur. (2003). Dritter Lagebericht.
- 37 FAO. (2012).
- 38 Brown. (2009). Could food shortages bring down civilizations?. Scientific American.
- 39 Oldemann. (1990). Elements of Sylvology.
- 40 Europäische Energieagentur. (2000). Energiepreisentwicklung.
- 41 Destatis, (2013). Landwirtschaftlich genutzte Fläche in Deutschland.
- 42 Brown (2009a). S. 84.
- 43 Brown. (2009a).
- 44 Godfray et al. (2010).
- 45 Brown. (2009a). S. 84.
- 46 Brown. (2009a). S. 84.
- 47 OECD. (2008). S. 5.
- 48 von Witzke. (2008). S. 23.
- 49 Feldmann et al. (2007). Mycorrhizal fungi as biological components. Mycorrhizal Works. Deutsche Phytomed. Gesellschaft.
- 50 Smith/Read (2008). Mycorrhizal Symbiosis. Third Edition. Elsevier.
- 51 Poehling et al. (2013). Seasonal abundance of western flower trips. Journal of Pest Science 86 (3).
- 52 Oerke. (2006). Crop losses to pests.

- 53 www.klimawandel-und-klimaschutz.de/auswirkungen-des-klimawandels/auswirkungen-fuer-die-landwirtschaft/
- 54 Schwerin et al. (2012).
- 55 Godfray et al. (2010), S. 2774.
- 56 OECD. (2008). OECD-Umweltausblick bis 2030. S. 4.
- 57 Godfray et al. (2010), S. 2774.
- 58 Fargione et al. (2008). Land clearing and the Biofuel Carbon Debt.
- 59 Foley et al. (2011).
- 60 Godfray et al. (2010), S. 2774; von Witzke/Nolleppa (2008), S. 4.
- 61 BMELV. (2013). Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln.
- 62 Erisman et al. (2008). Gruber/Galloway. (2008). Connecting the wheels – on the role of nitrogen for the carbon cycle.
- 63 Erisman et al. (2008).
- 64 Rockström et al. (2009). Identifying and quantifying planetary boundaries.
- 65 von Braun. (2009). Land grabbing by foreign investors in developing countries.
- 66 Crews/Peoples. (2004). Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs.
- 67 Galloway (2004) Nitrogen Cycles: past, present and future, *Biogeochemistry* 70, 153-226.
- 68 Erisman et al. (2008). *Nature Geoscience*. S. 637.
- 69 ebd.
- 70 Aust et al. (2003). Phytochemicals.
- 71 Matern. (2009). Verwenden statt Verschwenden.
- 72 Arnold/von Geibler/Bienge/Stachura/Borbonus/Kristof. (2009). Kaskadennutzung von nachwachsenden Rohstoffen: Ein Konzept zur Verbesserung der Rohstoffeffizienz und Optimierung der Landnutzung.
- 73 BMU (2011): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt.
- 74 FAO. (2012). Voluntary Guidelines on the Responsible Governance of Tenure of Land, Fisheries and Forests in the Context of National Food Security.
- 75 von Witzke/Nolleppa. (2008). Die gesellschaftliche Bedeutung der Pflanzenzüchtung. S. 18.
- 76 Hoestra et al. (2011). IluC-Faktor, Wasser-Fußabdruck.
- 77 Foley. (2011). Can We Feed the World SuStain the planet?

78 Kögel-Knabner/Grathwohl/Kothe/Teutsch/Vereecken und weitere Autoren. (2013). Strategiepapier „Langzeitperspektiven und Infrastruktur der terrestrischen Forschung Deutschlands – ein systemischer Ansatz“, S. 30.