

Volkmar Wolters¹, Johannes Isselstein², Hartmut Stützel³, Frank Ordon⁴, Christina von Haaren⁵, Eva Schlecht⁶, Justus Wesseler⁷, Regina Birner⁸, Margit von Lütow⁹, Nicolas Brüggemann¹⁰, Bernd Diekkrüger¹¹, Andreas Fangmeier¹², Heinz Flessa¹³, Henning Kage¹⁴, Martin Kaupenjohann¹⁵, Ingrid Kögel-Knabner¹⁶, Reinhard Mosandl¹⁷, Ralf Seppelt¹⁸

Nachhaltige ressourceneffiziente Erhöhung der Flächenproduktivität: Zukunftsoptionen der deutschen Agrarökosystemforschung Grundsatzpapier der DFG Senatskommission für Agrarökosystemforschung

Sustainable and resource efficient intensification of crop production –
Perspectives of agro-ecosystem research
Policy paper of the DFG Senate Commission on Agroecosystem Research

225

Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden Grundsatzpapier zeigt die Senatskommission für Agrarökosystemforschung Perspektiven für die Grundlagenforschung zur nachhaltigen Erhöhung der Kulturpflanzenproduktion auf.

Agrarsysteme stehen im Spannungsfeld zwischen steigendem Bedarf an landwirtschaftlichen Produkten, der Verknappung der Ressourcen, dem Verlust der Biodiversität und dem Klimawandel. Die für das Jahr 2050 prog-

nostizierte notwendige Ertragssteigerung zur Sicherstellung des Bedarfs an Nahrungsmitteln kann, ohne die Belastbarkeitsgrenzen ökologischer Systeme zu überschreiten, nur durch wissenschaftlichen Fortschritt bewältigt werden (Abb. 1), der eine nachhaltige und ressourceneffiziente Steigerung der Agrarproduktion ermöglicht (FAO, 2011; DOBERMANN und NELSON, 2013). Die nachhaltige Intensivierung stellt die Agrarwissenschaften vor neue Aufgaben, die weit über ihre klassischen Grenzen hinausgehen.

Institut

Institut für Tierökologie, Justus-Liebig-Universität Gießen¹

Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen²

Institut für Biologische Produktionssysteme, Leibniz Universität Hannover³

Institut für Resistenzforschung und Stresstoleranz, Julius Kühn-Institut Quedlinburg⁴

Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover⁵

Section Animal Husbandry in the Tropics and Subtropics, Universität Kassel und Georg-August-Universität Göttingen⁶

Lehrstuhl für Agrar- und Ernährungswissenschaft, Technische Universität München⁷

Institut für Agrar- u. Sozialökonomie in den Tropen und Subtropen, Universität Stuttgart-Hohenheim⁸

Lehrstuhl für Bodenkunde, Technische Universität München⁹

Institut für Bio- und Geowissenschaften Agrosphäre (IBG-3), Forschungszentrum Jülich¹⁰

Geographisches Institut, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn¹¹

Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie, Universität Stuttgart-Hohenheim¹²

Institut für Agrarklimaschutz, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig¹³

Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel¹⁴

Institut für Ökologie, Technische Universität Berlin¹⁵

Lehrstuhl für Bodenkunde, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan¹⁶

Lehrstuhl für Waldbau, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan¹⁷

Department Landschaftsökologie, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Leipzig¹⁸

Kontaktanschrift

Dr. Margit von Lütow, Wissenschaftliches Sekretariat der DFG Senatskommission für Agrarökosystemforschung, Lehrstuhl für Bodenkunde, Technische Universität München, 85350 Freising-Weihenstephan, E-Mail: luetzow@wzw.tum.de

Zur Veröffentlichung angenommen

7. Mai 2014

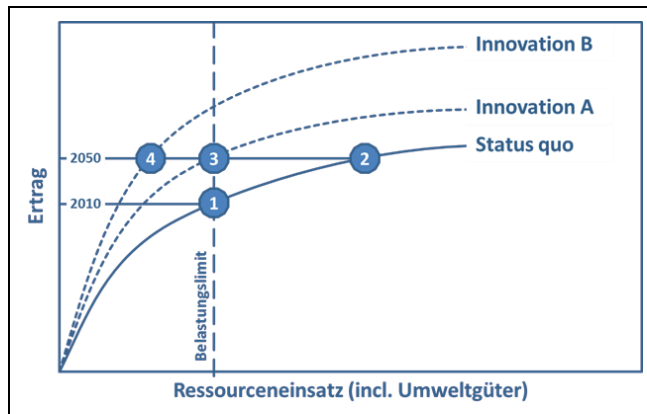


Abb. 1. Beziehung zwischen Ressourceneinsatz für die Pflanzenproduktion und dem damit erzielbaren Ertrag. Wenn das Belastungslimit bereits erreicht ist (1), ist eine Steigerung der Flächenproduktivität mit etablierten Verfahren (2) keine Option. Der hier beispielhaft für 2050 prognostizierte Bedarf lässt sich bei gleicher (3) oder reduzierter Umweltbelastung (4) nur durch Innovationen erreichen. Die im Text vorgeschlagene Belastungsreduktion durch Diversifikation des Anbaus in Raum und Zeit ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Die Senatskommission plädiert daher für eine Erweiterung der agrarwissenschaftlichen Perspektive. Die meist auf einzelne Feldfrüchte bezogene Bewertung der Relation zwischen Input und Ertrag muss ergänzt werden um die Optionen, die sich aus der räumlichen und zeitlichen Diversifikation der Produktionssysteme unter Einbeziehung der standörtlichen Eigenschaften, des Landschaftskontextes sowie des Klimawandels ergeben. Um Ökosystemleistungen einzubeziehen, müssen Produktionsstrategien entwickelt werden, die sich auf ganze Landschaften und Regionen richten und auch entsprechende sozioökonomische und agrarpolitische Rahmenbedingungen berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund schlägt die Senatskommission drei interdisziplinäre Forschungsschwerpunkte zur ressourceneffizienten Erhöhung der Flächenproduktivität vor:

(1) Ausnutzung des Potentials von Kulturpflanzen zur umweltschonenden Ertragssteigerung im Kontext ökosystemarer Bedingungen.

(2) Nachhaltige Steigerung der Pflanzenproduktion im Landschaftskontext.

(3) Ökonomische, gesellschaftliche und politische Dimensionen der Ertragssteigerung von Kulturpflanzen.

Stichwörter: Nachhaltige Intensivierung, Landschaftsbezug, Ökosystemdienstleistungen, Ressourceneffizienz

Abstract

With its policy paper the Senate Commission on Agro-ecosystem Research of the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) summarizes potential benefits of basic research for

the sustainable intensification of crop production. Agro-ecosystems critically contribute to fulfilling the need for increasing food and fiber production, diminishing resource depletion as well as counteracting biodiversity loss and climate change. Yield demands that are needed to ensure the food supply predicted for the year 2050 can only be achieved by scientific progress that allows the intensive yet environmentally friendly production of plant biomass (Figure 1), (FAO, 2011; DOBERMANN und NELSON, 2013; RAY et al., 2013). Sustainable intensification requires a scientific realignment that allows for broadening the scope of agricultural research. The productivity of farming systems should be evaluated with regard to their efficiency (input-output relation). In addition, the spatial and temporal variability of these systems must be considered by addressing local conditions, the landscape context and climate change. With respect to ecosystem services, new production strategies must be developed that take all aspects of landscape and regional complexity as well as socio-economic conditions and agricultural policy into account.

Against this background, the Senate Commission on Agro-ecosystem Research proposes three priority areas of interdisciplinary research on resource efficient intensification of crop production:

(1) Exploiting the biological potential of the individual crop plants for an environmentally friendly intensification in an ecosystem approach

(2) Exploring sustainable intensification of crop production within a landscape context

(3) Taking full account of the economic, social and political dimensions of sustainable intensification of crop production

Key words: Sustainable intensification, landscape, ecosystem services, resource efficiency

1 Die Aufgabe

Landwirtschaftlich genutzte Flächen zählen mit einer Deckung von über 35% der eisfreien Landmasse zu den größten Ökosystemen unseres Planeten (RAMANKUTTY et al., 2008). Das Potential zur weiteren Ausdehnung ist gering und dürfte – auch unter Berücksichtigung potentieller Flächenerweiterungen als Folge der durch den globalen Wandel bedingten Verschiebungen von Klimazonen – deutlich unter 5% der bislang genutzten Fläche liegen (FOLEY et al., 2011; OECD/FAO, 2012). Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass die Rate der weltweiten Ertragssteigerung mit etablierten Verfahren in Zukunft deutlich sinken wird. In den vergangenen 50 Jahren konnte die globale Agrarproduktion um mehr als das Doppelte gesteigert werden, obgleich sich die landwirtschaftliche Nutzfläche nur um ca. 12% ausdehnte (OECD/FAO, 2012). Erreicht wurde dies durch die rasante Mechanisierung der landwirtschaftlichen Produktion und vor allem durch den Anbau hoch produktiver Sorten in Verbindung mit gesteigertem Dünger- und Pflanzenschutzmitteleinsatz sowie dem Einsatz von künstlicher Bewässerung. Nach-

haltigkeitsaspekte spielten dabei eine untergeordnete Rolle. Die Verdienste der „Grünen Revolution“ um die Versorgung der Menschheit und die wirtschaftliche Entwicklung sind unbestritten. Trotzdem bedarf die landwirtschaftliche Produktion einer Neuorientierung.

Die Umweltbelastungen, die sich aus dem steigenden Nahrungsmittel- und Energiebedarf einer rasch wachsenden Weltbevölkerung ergeben und heute bereits vielfach das hinnehmbare Limit übersteigen, werden in Zukunft noch dramatisch zunehmen (DORÉ et al., 2011; GODFRAY et al., 2011; GABRIEL et al., 2013) und sich zusätzlich durch den Klimawandel verschärfen. Viele landwirtschaftliche Produktionsverfahren werden der neuen Herausforderung einer nachhaltigen und ressourceneffizienten Produktionssteigerung nicht gerecht. Sie führen bereits heute zu quantitativen und qualitativen Einbußen essentieller Ressourcen wie Boden, Wasser und Luft sowie der Biodiversität. Mit der Beeinträchtigung natürlicher Ressourcen gehen auch assoziierte Ökosystemleistungen verloren, die neben Nahrung und Rohstoffen von Agrarökosystemen bereitgestellt werden, wie z.B. regulierende Dienstleistungen (Bestäubung, Schädlingskontrolle, Klimaregulation, Bodenbildung und Nährstoffkreislauf). Eine Vielzahl von ökonomischen und sozialen Spannungen kann daraus entstehen. Die Landwirtschaft ist in diesem Prozess zugleich Verursacher und Betroffener, z.B. durch Ertragseinbußen aufgrund von Wasserverknappung oder langfristiger Bodendegradation.

Die zukünftigen Aufgaben können daher nicht allein durch Forschungsaktivitäten gelöst werden, die vorrangig die Steigerung der Agrarproduktion zum Ziel haben. Es bedarf innovativer Lösungen, die darauf abzielen, die scheinbar widersprüchlichen Ziele gleichzeitig zu erreichen: einerseits die Erträge von Nutzpflanzen ohne nennenswerte Ausdehnung der Produktionsflächen zu erhöhen bzw. auf einem hohen Niveau zu stabilisieren, und dabei andererseits die von der Produktion direkt oder indirekt betroffenen natürlichen Ressourcen zu schonen und die Umweltqualität zu verbessern (Abb. 1).

Die Erzeugung von Lebensmitteln und Rohstoffen tierischen Ursprungs ist direkt abhängig von der pflanzlichen Produktion und generiert ebenfalls sehr problematische Umweltwirkungen. Dies muss in einzelnen Forschungsvorhaben mit berücksichtigt werden, wird hier jedoch nicht weiter vertieft. Dasselbe gilt für die Nutzung der Ressource Wald und weiterer flächengebundener Verfahren der Erzeugung von Nahrungsmitteln und erneuerbaren Rohstoffen. Lösungen des Zielkonfliktes müssen überdies im Kontext gesellschaftlicher Rahmenbedingungen und alternativer technischer Optionen entwickelt werden. Solche Alternativen können sich z.B. aufgrund der Potentiale von abiotischen alternativen Energiequellen (z.B. Wind, Sonne) oder Substitutionsmöglichkeiten durch Energieeinsparungen ergeben, durch die Reduktion der Lebensmittelverschwendung, die Verbesserung infrastruktureller Rahmenbedingungen sowie durch die Veränderung der Ernährungsgewohnheiten (GODFRAY et al., 2010, CASSIDY et al., 2013), oder durch die Einbeziehung neuer Nutzungsmöglichkeiten mariner Ökosysteme in die Nahrungspro-

duktion. Das Ziel, die Flächenproduktivität umwelt- und ressourcenschonend zu erhöhen, kann nur in einem gesamtheitlichen Kontext sinnvoll bearbeitet werden und ist einer der wichtigsten Bausteine für eine nachhaltige Zukunft (TILMAN et al., 2011).

Auch für hoch entwickelte Länder wird das Potential eines solchen Ansatzes allein schon durch die regionsspezifischen Unterschiede in der Differenz zwischen der aktuellen Netto-Primärproduktion (NPP) durch Landnutzung und der potentiellen natürlichen NPP deutlich. So ist diese Differenz in Europa trotz des massiven Einsatzes von Energie und Rohstoffen mit 12,4% deutlich größer als das globale Mittel (9,6%; HABERL et al., 2010). Die geringe Effizienz der weltweiten Nutzung von Stickstoff aus Mineraldünger von nur 17% (ERISMAN et al., 2008) weist dabei auf große Defizite in der Prozess- und Systemsteuerung und die Entkopplung von Ökosystemfunktionen und -leistungen hin mit z.T. verheerenden Umweltfolgen (SUTTON et al., 2011). Um dieser Entwicklung und der damit verbundenen Expansion von Ackerflächen auf Kosten anderer Ökosysteme entgegenzuwirken, müssen die Möglichkeiten zur umweltschonenden Ertragssteigerung durch nachhaltige ressourceneffiziente Verfahren erforscht, genutzt und in den Kontext der gesamträumlich erbrachten Ökosystemleistungen gestellt werden. Im Landschaftskontext existieren sowohl Ökosystemleistungen, die auf die Produktionsflächen einwirken, als auch solche, die negative Auswirkungen der Landbewirtschaftung kompensieren oder positive verstärken können. Die Optimierung dieser Wechselbeziehungen erfordert das Ausschöpfen des vollen Potentials unserer Kulturpflanzen, unter Kenntnis der standortspezifischen Potentiale der Landnutzungssysteme und ihrer Leistungsgrenzen und Vulnerabilitäten unter den derzeitigen und zukünftigen Klimabedingungen (LOBELL et al., 2009) sowie die Intensivierung wissenschaftlicher Aktivitäten zum Verständnis und zur Verbesserung der Trade-offs zwischen einzelwirtschaftlichen und ökologischen Zielen auf der Fläche und im Landschaftskontext. Zusätzlich sind die erforderlichen sozioökonomischen Rahmenbedingungen für die praktische Umsetzung neuer Landnutzungsansätze zu erforschen. Nur im gesamtheitlichen Kontext lassen sich Strategien der pflanzlich basierten Nahrungs- und Rohstoffproduktion und Landnutzungsorganisation etablieren, die einerseits Ökosystemleistungen gezielt hervorbringen bzw. nutzen und andererseits externe Energiequellen und Rohstoffe effizient einsetzen (CHEN et al., 2011).

2 Neue Formen und Horizonte der Erforschung von Agrarökosystemen

Die beschriebene Herkulesaufgabe ist nur mit neuen Herangehensweisen zu bewältigen. Das Forschungsfeld gilt nicht ohne Grund wegen seiner Komplexität als eine der größten Herausforderungen der modernen Wissenschaft überhaupt (TILMAN et al., 2002). Die wissenschaftliche Bearbeitung erfordert die Überwindung tradierter disziplinärer und räumlicher Grenzen. Eine hohe Integration von unter-

schiedlichen Forschungsperspektiven und methodischen Ansätzen wird notwendig sein. Es gilt, mit einem Systemansatz Forschung neu zu betreiben, indem bereits bei der Entwicklung neuer Lösungen ökologische, ökonomische und soziale Folgen beachtet und in iterativen Prozessen in die Systementwicklung integriert werden. Eine solche systembezogene Herangehensweise schließt sowohl alle räumlichen Ebenen vom Genom bis zur Landschaft oder der biogeographischen Region als auch horizontale Verknüpfungen unterschiedlicher Betrachtungs- und Bewertungsperspektiven ein. Die damit verbundenen enormen Herausforderungen an die moderne Agrarökosystemforschung sollten als Chance begriffen werden. Die Wissenschaft kann bei entsprechender Ausrichtung und Förderung die innovativen Instrumente und Verfahren für die nachhaltige Entwicklung der Landnutzungssysteme zur Verfügung stellen, mit denen Akteure aus Praxis und Politik nachhaltige Systeme etablieren können. Dabei stehen die Staaten Mitteleuropas sicherlich nicht im Zentrum des Konflikts um den wachsenden Bedarf an Agrarprodukten, denn sie liegen in einer für die Erzeugung von Nahrungsmitteln und Bioenergie geeigneten Klimazone und verfügen über relativ gute Böden. Trotzdem fällt ihnen wegen einer Vielzahl historischer und ökonomischer Gründe sowie wegen ihres wissenschaftlich-technologischen Potentials eine besondere und ständig wachsende Verantwortung für die Entwicklung zukunftsorientierter und ggf. auch global bedeutsamer Produktionsstrategien zu.

Die DFG-Senatskommission für Stoffe und Ressourcen in der Landwirtschaft legte mit der Denkschrift „Perspektiven der agrarwissenschaftlichen Forschung“ (DFG Denkschrift, 2005) bereits die Basis für einen systemorientierten Ansatz, bei dem die Erhöhung der Agrarproduktion bei gleichzeitigem Schutz beziehungsweise Restaurierung natürlicher Ressourcen sowie dem Erhalt von Ökosystemleistungen im Zentrum der Forschung steht. Dort wurde die Stellung der Agrarökosysteme als Teil komplexer Landschaften präzise herausgearbeitet. Trotz der überwältigend positiven Reaktion auf die Denkschrift fehlt es jedoch bislang an wissenschaftlichen Initiativen, die das Konzept aufgreifen und daraus konkrete Projekte entwickeln. Durch die Identifizierung von interdisziplinären Forschungsaufgaben will die Senatskommission zur Überwindung dieses Defizits beitragen. In den zurückliegenden Jahren hat eine Vielzahl von hochkarätigen Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen in den landwirtschaftlichen Fakultäten und Forschungseinrichtungen sowie in anderen bio- und geowissenschaftlichen Institutionen ein enormes Potential zur Überwindung dieses Problems entwickelt. Dies gilt es durch geeignete Maßnahmen zu mobilisieren.

Bei der Initiierung fächerübergreifender Forschungsprojekte für die nachhaltige Erhöhung der Flächenproduktivität geht es letztlich auch um die Anwendung des Konzepts der Next Generation Plant Biology (KEURENTJES et al., 2011) auf agrarische Produktionssysteme. Dieser Ansatz erweitert die auf molekulare Prozesse fokussierte Pflanzensystembiologie um höhere biologische Organi-

sationsebenen. Das gesamte Spektrum umfasst damit: (i) biochemische Signalwege auf subzellulärem Level (z.B. zur Erhöhung der Photosynthese-Leistung; IMHOFF et al., 2004), (ii) Netzwerke physiologischer Prozesse auf zellulärer Ebene (z.B. zur Verbesserung der Produktivität in ariden Gebieten), (iii) Wachstum und Entwicklung der jeweiligen Nutzpflanzen, (iv) genetische Variationen innerhalb des Genpools von Kulturpflanzenarten (z.B. zur Optimierung von Leistungseigenschaften), (v) Leistungsvermögen, Konkurrenzfähigkeit und trophische Interaktionen auf der Gemeinschaftsebene (z.B. für die Etablierung standortgerechter Verfahren zur Bekämpfung von Schädlingen und Pathogenen), und (vi) Trade-offs, welche die Systemeigenschaften und -prozesse auf der ökosystemaren Ebene beeinflussen (z.B. für eine effizientere Nutzung von Stickstoff aus Mineraldüngern; ERISMAN et al., 2008). Dabei fokussiert die Next Generation Plant Biology auf die Wechselwirkungen zwischen diesen Organisationsebenen. So kann zum Beispiel die Reaktion von Kulturpflanzenbeständen auf Umweltreize nur verstanden bzw. gesteuert werden, wenn bekannt ist wie die Einzelpflanze diese Reize aufnimmt, interpretiert und integriert, wie Pflanzenpopulationen eine kohärente Antwort auf Bestandsebene organisieren und wie diese im Verhältnis zur Gegenwart von Konkurrenten, Fressfeinden, Antagonisten und Mutualisten steht (KEURENTJES et al., 2011). Das Konzept der Next Generation Plant Biology berücksichtigt sowohl die Einflüsse der verschiedenen trophischen Ebenen auf die Pflanzenproduktion, als auch die Auswirkungen auf andere Ökosystemleistungen. Beispielsweise vermindert der effiziente Düngereinsatz die Beeinträchtigung anderer Ökosystemleistungen wie die Bereitstellung von sauberem Wasser. Ein weiteres Beispiel wären Nachbarschaftseffekte zwischen halbnatürlichen Strukturen und Produktionssystemen, durch die auf der einen Seite die Biodiversität und Oberflächenretention gefördert und auf der anderen Seite die Ertragssicherheit verbessert werden kann. Es treten durch produktionsoptimierende Ansätze aber nicht immer solche Synergien auf, insbesondere wenn die Steigerung der Produktion Effizienzeffekte wieder „auffrisst“. Durch Substitution können überdies neue unerwünschte Effekte auftreten, z.B. wenn chemischer Pflanzenschutz auf verdichtungsempfindlichen Böden durch mechanische Bewirtschaftung ersetzt wird. Lösungen für Zielkonflikte mit den anderen Ökosystemleistungen der Fläche können daher nicht immer auf der Schlagebene gefunden werden, sondern müssen die unmittelbare Umgebung des Schlages und die Landschaftsebene einbeziehen, um den Raum für Kompensation von Funktionen sowie die Betrachtung von kumulativen Effekten zu vergrößern. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang u.a. Fragen der Fruchtfolgegestaltung, die nicht nur auf dem Schlag, sondern auch im räumlichen Kontext Einfluss auf die Biodiversität haben.

Die Erforschung neuer Modelle der pflanzlichen Produktion und ihrer Organisation im Landschaftszusammenhang muss von Beginn an den Menschen und seine Rahmenbedingungen hinsichtlich der Akzeptanz und Umsetzung von Innovationen mit einbeziehen. Es ist des-

halb für die Entwicklung innovativer Produktionssysteme essentiell, alle relevanten sozioökonomischen und agrarpolitischen Fragestellungen als Querschnittsthemen in die Systembetrachtung mit einzubeziehen.

Das vorliegende Strategiepapier fokussiert auf Grundlagenforschung zur Ermittlung der Potentiale für eine nachhaltige Erhöhung der Kulturpflanzenproduktion. Hoch relevante Themen wie Tierproduktion oder das Produktionssystem Wald sowie globale Probleme der Landwirtschaft werden zunächst nicht beleuchtet und sollen in nachfolgenden Abhandlungen thematisiert werden. Ein Argument für die Fokussierung auf die Pflanzenproduktion in diesem ersten Schritt liegt in der Notwendigkeit der Ernährungsumstellung zur Sicherstellung der Welt ernährung (CASSIDY et al., 2013, KASTNER et al., 2012). Ein weiterer Grund für die Priorisierung der Pflanzenproduktion ist, dass die Senatskommission auf dem Gebiet der umweltschonenden Ertragssteigerung und -sicherung besonders grundlegende und innovative Forschungsfelder identifiziert hat, deren Bearbeitung für die Bewältigung zukünftiger Herausforderungen von hoher Dringlichkeit ist. Drei in diesem Zusammenhang von der Senatskommission vorgeschlagene Schwerpunkte sind:

(1) Ausnutzung des Potentials von Kulturpflanzen zur umweltschonenden Ertragssteigerung im Kontext ökosystemarer Wechselwirkungen.

(2) Nachhaltige Steigerung der Pflanzenproduktion im Landschaftskontext.

(3) Ökonomische, gesellschaftliche und politische Dimensionen der Ertragssteigerung von Kulturpflanzen.

Diese Schwerpunkte lassen große Fortschritte der systembezogenen Grundlagenforschung erwarten, und sie sind von hoher gesellschaftlicher, politischer und wissenschaftlicher Relevanz. Die Senatskommission greift mit ihren Vorschlägen die wichtigsten Vorgaben für die gegenwärtig vollzogene Neuausrichtung der internationalen Global Change Forschung auf: (i) von der Problem- zur Lösungsorientierung, und (ii) von globalen Prozessen zu einem Mosaik regionaler Systeme. So wird die deutsche Agrarforschung in den Stand versetzt, einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung des erklärten Ziels zukünftiger Umweltprogramme zu leisten, nämlich die Schaffung einer profunden Wissensbasis für den Transformationsprozess zur globalen Nachhaltigkeit. Die internationale Sichtbarkeit der an Agrarsystemen orientierten Forschung in Deutschland wird sich dadurch deutlich erhöhen.

3 Forschungsschwerpunkte: Themen und Aufgabengebiete

3.1 Schwerpunkt 1: Optimierung des Potentials von Kulturpflanzen zur umweltschonenden Ertragssteigerung
Ziel von Schwerpunkt 1 ist die Erhöhung der Produktivität von Kulturpflanzen in Abhängigkeit von Standort und Produktionssystem. Hierzu sollen aktuelle Erkenntnisse der molekularen Pflanzenphysiologie (etwa zu den spezifischen Mechanismen des Primärstoffwechsels in Kulturpflanzen) oder der Pflanzengenetik (z.B. Genomsequen-

zierung und Identifikation genetischer Netzwerke und deren Steuerung) genutzt werden. Schwerpunkt 1 bietet damit den geeigneten Rahmen für die stärkere Vernetzung von biologischer Grundlagenforschung und Pflanzenzüchtung. Beide Disziplinen haben in den letzten Jahren enorme Wissensfortschritte erzielt, der fächerübergreifende Austausch ist aber trotz der Überschneidungen auf molekular- und zellbiologischem Gebiet verbesserungsbedürftig. Erkenntnisse der modernen Botanik, meist im Labor an Modellpflanzenarten gewonnen, sind oft nicht direkt für das System Pflanzenbestand im Kontext der natürlichen und produktionstechnischen Bedingungen nutzbar. Durch verbesserte Methoden des Upscalings könnten Fortschritte der biologischen Grundlagenforschung von der Pflanzenzüchtung, deren Effizienz durch den Einsatz neuer biotechnologischer Verfahren erheblich gesteigert wurde, besser genutzt werden. Forschungsschwerpunkt 1 adressiert daher die biologischen Organisationsebenen vom Gen bis zum Kulturpflanzenbestand. Insbesondere sollten Merkmale zur Steigerung der Umweltsicherheit und Resilienz (s. Kap. 3.2), etwa Resistenzen gegen biotische Schaderreger oder Salz- und Trockentoleranz, aber auch Merkmale, die die Nährstoff- und Wassernutzungseffizienz erhöhen, bearbeitet werden. Das dafür erforderliche Methodenspektrum reicht von der biotechnologischen Optimierung der Nutzpflanzen über die Modellierung molekularer Prozesse unter Berücksichtigung der Umweltvariation bis zur sozio-ökonomischen Bewertung (s. Kap. 3.3).

Die Senatskommission für Agrarökosystemforschung sieht in interdisziplinären Projekten von biologischer Grundlagenforschung und moderner Pflanzenzüchtung ein enormes Potential für die Agrarforschung der Zukunft. Die Einbindung des Pflanzenbaus, der Agrartechnik (verlustreduzierende Applikationstechniken, Precision Farming für die Erhöhung der Nutzungsvielfalt und der Landschaftsqualität), der Bionanotechnologie (z.B. zur Senkung von Stoffeinträgen durch steuerbare Mineraldünger), der Bodenwissenschaften (Kohlenstoffspeicherung, Wasser- und Nährstoffhaushalt), der Biodiversitätsforschung (Monitoring-, Bewertungs- und Prognoseverfahren, Fernerkundung, Biodiversitätsscreening) und anderer naturwissenschaftlicher, technischer und ökonomischer Disziplinen sollte von vornherein die Bearbeitung produktionssystembezogener Fragen und die Berücksichtigung von Umweltfaktoren sicherstellen.

Prozessverständnis der Produktionsfunktion. Die molekularen Mechanismen der standortabhängigen Produktivitätslimitierung sind nicht bekannt. Eine verbesserte Prozesssteuerung durch die Optimierung des Potentials von Kulturpflanzen ist aber nur durch fundierte Kenntnisse der Genotyp \times Umwelt \times Management-Interaktionen zu erreichen. Wenn die biologischen Grundlagen der Funktionsverläufe der Ertrag/Ressourceneinsatz-Relationen in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen verstanden werden, kann eine Vielzahl von Umweltvariablen bereits bei der Züchtung neuer Sorten berücksichtigt werden. Es gilt, die wissenschaftlichen Voraussetzungen dafür zu

schaffen. Da zum Beispiel bei Hochleistungssorten die Wasserversorgung zunehmend zum begrenzenden Faktor des Flächenertrags wird, kann die gezielte Erhöhung der Wassernutzungseffizienz (durch züchterische Maßnahmen) in Verbindung mit der Verbesserung des Wasserangebots (durch Bewirtschaftungsmaßnahmen) die Flächenproduktivität deutlich erhöhen. Beispiele für wichtige Forschungsfragen interdisziplinärer Projekte betreffen die Begrenzungen des standörtlichen Leistungspotentials von Nutzpflanzen oder die Identifizierung und Steuerbarkeit der Prozesse, welche die Produktionsfunktionen in Abhängigkeit von den Standorteigenschaften erklären.

Identifikation von Eigenschaften, welche die Anpassung an den Standort bestimmen. Ertragsrelevante Fortschritte auf dem Gebiet der molekularen Pflanzenphysiologie betreffen u.a. die Erhöhung der Photosynthese-Effizienz durch Optimierung der RuBisCO-Aktivität im Calvin-Zyklus, die Steigerung der Speicherkapazität von Kohlenstoff und Nährstoffen durch die Regulation des Nährstofftransportes in den Pflanzen, oder die Erhöhung der Stresstoleranz. Die Forschungsfragen aus den Bereichen „Steigerung der Produktivität durch Modifikation des Pflanzenstoffwechsels“ und „Verbesserung von Resistenz und Toleranz“ sind noch lange nicht beantwortet. Zudem sollten die Auswirkungen der gezielten Veränderung von molekularen Signalwegen und physiologischen Prozessen auf das Leistungsvermögen der Pflanzen unter variablen Umweltbedingungen stärker berücksichtigt werden. Dabei sollte die pflanzenbiologische Grundlagenforschung in Zusammenarbeit mit der Pflanzenzüchtung, dem Pflanzenbau und dem Pflanzenschutz vermehrt agrarisch relevante Arten berücksichtigen.

Gleichzeitig gilt es, die vielen Überlappungsfelder mit der modernen Pflanzenzüchtung zu identifizieren und den sich daraus ergebenden Mehrwert wechselseitig zu nutzen. Hochdurchsatz-Markertechnologien und stetig steigende Sequenzinformationen ermöglichen der Züchtung schon heute eine effektive Nutzung assoziationsgenetischer Verfahren zur Identifikation von molekularen Markern und Genen sowie die Nutzung genomischer Selektionsverfahren im Züchtungsprozess. Fortschritte der Transcriptomics, Metabolomics und Präzisionsphänotypisierung werden gemeinsam mit obengenannten Verfahren die Isolation von Genen bzw. genetischen Netzwerken ermöglichen, die der Ausprägung landwirtschaftlich bedeutender Eigenschaften zugrunde liegen. Ausgangspunkt der Pflanzenzüchtung wird allerdings auch in Zukunft die Erfassung der genetischen Variation im primären, sekundären oder tertiären Genpool einer Kulturart, gefolgt von deren systematischer Nutzung im Selektionsprozess, sein. Dieser Screening-Prozess blendet die subzellulären und zellulären Prozesse, die hinter der phänotypischen Ausprägung stehen, weitgehend aus. Hier eröffnet sich ein sehr erfolgversprechendes Forschungsgebiet für die botanische Grundlagenforschung. Umgekehrt kann die Züchtungsforschung von dem Erkenntnisfortschritt der Biologie enorm profitieren, wenn es gelingt,

die subzellulären und zellulären Grundlagen der Ausprägung von Merkmalen gezielt für den Selektionsprozess zu nutzen.

Entwicklung standortangepasster Sorten. Die langfristige Erstellung maßgeschneiderter Sorten für verschiedene Standorte und Produktionssysteme erfordert eine interdisziplinäre wissenschaftliche Klärung der Frage, welche Merkmalskombinationen das Anpassungsvermögen und die Leistungsfähigkeit von Nutzpflanzen an einem Standort bestimmen, und welche genetischen Netzwerke diesen zu Grunde liegen. Detaillierte Erkenntnisse, wie sich Änderungen des Genotyps und der Umwelt sowie die entsprechenden Interaktionen auf die Leistungsfähigkeit von Pflanzen auswirken, stellen die Basis für die Entwicklung von Modellen dar, welche eine Voraussage des Phänotyps ermöglichen und damit eine beschleunigte Identifikation von Genotypen mit Eignung für die jeweiligen Umwelt- und Produktionsbedingungen erlauben. Als ein Beispiel sei der „stay-green“-Effekt genannt, für den z.B. in Sorghum eine Vielzahl von Genomregionen bekannt sind, deren Einfluss auf die Ertragsleistung jedoch von einer Vielzahl von Umweltfaktoren und deren Interaktionen bestimmt wird (HAMMER et al., 2006). Züchtungsforschung vor dem Hintergrund standortoptimierter Sorten sollte sich aber nicht ausschließlich auf die Ertragsleistung per se beschränken, sondern weiterhin die Trade-offs im Lichte der jeweiligen Umweltbedingungen und das spezifische sozio-ökonomische Potential der avisierten Anbauregion berücksichtigen. Angesichts des enormen Datenbedarfs könnte die Etablierung von Modellen auf der Basis von mehrortigen Sortenversuchen in Zusammenhang mit einer durchzuführenden Genotypisierung basierend auf Hochdurchsatzplattformen ein vielversprechender erster Schritt sein, um die wissenschaftlichen Grundlagen für die Züchtung standortangepasster Sorten zu legen.

Grundlagenforschung auf Pflanzenbestandsebene. Der landwirtschaftliche Ertrag ist eine auf die Fläche bezogene Größe. Die bislang im Forschungsschwerpunkt 1 vorgeschlagenen Themenfelder für die molekulare, zellbiologische, physiologische und züchterische Grundlagenforschung müssen daher auf der räumlichen Ebene des Pflanzenbestandes zusammengeführt werden. Weitgehend offene Forschungsfragen umfassen die Definition standorts- und produktionssystemspezifisch optimaler Bestandesstruktureigenschaften, die Bedeutung morphologischer Plastizität, oder die räumlich beeinflussten Interaktionen zwischen Nutzpflanzen und Schaderregern im Bestand. Dabei ist als Brücke zu Schwerpunkt 2 auch der Landschaftsbezug zu berücksichtigen (s. Kap. 3.2). Im Sinne der „Next Generation Plant Biology“ (s.o.) müssen sowohl das Leistungsvermögen und die biotischen Interaktionen der jeweiligen Sorten auf der Bestandsebene als auch die Eigenschaften der von diesen Sorten dominierten Agrarökosysteme unter Standortbedingungen analysiert und in die Zuchtziele integriert werden.

3.2 Schwerpunkt 2: Nachhaltig ressourceneffiziente Steigerung der Pflanzenproduktion im Landschaftskontext

Forschungsschwerpunkt 2 analysiert den Einfluss der Landschaftsstruktur auf die Flächenproduktivität sowie Rückwirkungen pflanzenbaulicher Systeme auf die regionale Umgebung. Angesichts der für die Biodiversität und die ökologischen Leistungen in Agrarlandschaften enorm wichtigen Grünländer und Wälder sollten Weideflächen und forstliche Strukturen als Landschaftselemente von vornherein Berücksichtigung finden, auch wenn die Senatskommission für Agrarökosystemforschung vorschlägt, die Grundlagenforschung zur ressourceneffizienten Nutzung dieser Produktionssysteme erst in einem zweiten Schritt zu bearbeiten (vgl. Kap. 1).

Die Landschaftsorientierung ist ein, für die auf Einzelschläge fokussierte Agrarforschung, völlig neuer Ansatz. Durch die Ausdehnung auf regionale Bezüge werden die für Schwerpunkt 1 vorgeschlagenen räumlichen und zeitlichen Skalenebenen erheblich erweitert. Gemäß des Konzepts der Next Generation Plant Biology sollen die Eigenschaften der Nutzpflanzen und ihrer Populationen (= Bestände) im Kontext der Wechselwirkung von Lebensgemeinschaften und Ökosystemkomplexen untersucht werden. Dabei sollte eine enge Verbindung mit der züchterischen Forschung angestrebt werden (s. Kap. 3.1). Im Landschaftsmaßstab ergibt sich für die Bewertung des Produktionspotentials eine Vielzahl von Ertrag/Ressourceneinsatz-Relationen, die völlig neue Landnutzungsoptionen bieten. Gleiches gilt für die ressourceneffiziente Steigerung der Pflanzenproduktion, denn Anbaustrategien auf hoher räumlicher Skala schaffen innovative Möglichkeiten der nachhaltigen Bewirtschaftung. Elemente einer solchen Strategie sind die kleinräumige und zeitliche Diversifikation der Anbausysteme (z.B. Fruchtfolgen) oder die Einbeziehung von Randstrukturen und Naturhabitaten. Die Umsetzung in die landwirtschaftliche Praxis ist bei den gegenwärtigen sozioökonomischen Voraussetzungen schwierig, muss aber unter dem Gesichtspunkt des für die Zukunft zu erwartenden Wandels der Rahmenbedingungen wissenschaftlich geprüft werden (s. Kap. 3.3).

Die Chancen einer nachhaltigen Produktionssicherung sind standort- und regionalspezifisch. So ist auf Standorten mit geringerem Ertragspotential die Möglichkeit zur weiteren Ertragssteigerung mit herkömmlichen Mitteln geringer bzw. mit dem Risiko erhöhter Emissionen und ineffizienter Ressourcennutzung verbunden. In intensiven Regionen mit fruchtbaren Ackerstandorten ist dagegen das Potential zur nachhaltigen Intensivierung der Agrarproduktion größer, weil die Böden über bessere Puffer- und Speichereigenschaften verfügen. Sowohl in ertragsschwachen Regionen als auch auf Intensivstandorten lassen sich jedoch auf der Landschaftsebene durch innovative Verfahren, durch neue Produktionsziele sowie durch die geschickte Kombination von Anbausystemen (z.B. annuelle vs. perennierende Feldfrüchte) positive Effekte für die Flächenproduktivität, die Ertragsstabilität, die Nährstoffeffizienz sowie die Erbringung weiterer Öko-

systemleistungen (Regulation und kulturelle Leistungen) erreichen. Der hier dargestellte landschaftsorientierte Ansatz bietet die Chance, die aktuell mit Nachdruck vorangetriebene Forschung zu Fragen der funktionellen Biodiversität einzubinden. Für landwirtschaftliche Systeme ist dies besonders wichtig, denn die Biodiversitätskrise ist v.a. durch den Verlust funktioneller Biodiversität (und keineswegs nur den Artenverlust) ausgelöst.

Neue Wege zum Erhalt der Biodiversität in Agrarlandschaften müssen gefunden werden, weil der Nutzungsdruck auf extensiv bewirtschaftete Biotope weiter ansteigen wird, und weil die ökosystemaren Leistungen der biologischen Vielfalt ein zentrales Element der zukünftigen Agrarproduktion sein müssen. Damit sich daraus ein praxisnahes Managementkonzept entwickeln kann, muss in Schwerpunkt 2 der Einfluss von Einzelfaktoren (Inputs) des Produktionssystems – separat und im Zusammenspiel – auf die Biodiversität geklärt und quantifiziert werden.

Die Themen für Forschungsschwerpunkt 2 stehen im Zusammenhang mit dem Grundsatzpapier „Feldversuchsinfrastrukturen – Status quo und Perspektiven“ (Senatskommission für Agrarökosystemforschung, 2013), das konkrete Vorschläge für die landschaftsorientierte Agrarforschung unter Nutzung des enormen Potentials bereits verfügbarer Einrichtungen erarbeitet. Im Kern wird vorgeschlagen, die vorhandenen Versuchsgüter und deren Umgebung zu einem deutschlandweiten Netzwerk von exzellent ausgestatteten Landschaftsforschungsstationen (sog. Orbitaries) zu entwickeln. Dieses Netzwerk soll die Grundlage für die wissenschaftliche Bearbeitung der in Kap. 3.2 vorgeschlagenen Themenfelder bilden. Mit diesem Konzept bezieht sich die Senatskommission ganz wesentlich auf die Zukunftsoptionen, die in dem kommissionsübergreifenden DFG-Strategiepapier „Langzeitperspektiven und Infrastrukturen der terrestrischen Ökosystemforschung in Deutschland – ein systemischer Ansatz“ (KÖGEL-KNABNER et al., 2013) aufgezeigt werden.

Einfluss der Landschaft auf die Flächenproduktivität. Die zentrale Hypothese ist, dass die Potentiale zur Produktionssteigerung sowie zur gleichzeitigen Erbringung von anderen Ökosystemleistungen landschaftsabhängig sind, weil die Resilienz der Produktionssysteme auch auf der Landschaftsebene gesteuert wird. Dabei sind die Steuerfaktoren nicht ausreichend bekannt und bedürfen rasch der wissenschaftlichen Untersuchung. Es wird davon ausgegangen, dass bislang meist auf Schlagebene untersuchte Einflüsse der Bodenqualität oder der Wasserverfügbarkeit durch die Zusammensetzung und Struktur der Agrarlandschaft modifiziert werden. Erst die Kenntnis dieser Zusammenhänge ermöglicht die Definition landschaftsabhängiger Produktionsziele und die evtl. gezielte Gestaltung von Landschaftskomponenten. Dazu gehört, dass die derzeit nur hypothetisch formulierten Schwellenwerte hinsichtlich der Mindestausstattung einer Landschaft an Systemelementen (Fruchtfolgen, Landschaftsdiversität, Ausgleichsflächen, Monostrukturen) und deren Wechselwirkungen (angrenzende Flächen, Grenzflächen etc.) überprüft werden. Zielgrößen neben dem kumulativen

Produktionspotential und der Resilienz sind Landschaftsfunktionen wie Retentions- und Puffereigenschaften, Kompensationsmechanismen, Systemstabilität und biologische Vielfalt.

Für die erfolgreiche Bewältigung dieser Forschungsherausforderung bedarf es umfänglicher und solider agronomischer und landschaftsökologischer Datensätze. In Deutschland stehen solche Daten für eine Vielzahl von Versuchstationen, Versuchsbetrieben, Versuchsgütern, Versuchsfeldern und vergleichbaren Einrichtungen der standortgebundenen Agrarforschung prinzipiell zur Verfügung. Sie müssen aber noch durch einen bio- und geoinformatischen Kraftakt für regionsübergreifende interdisziplinäre Forschungsaktivitäten nutzbar gemacht werden. Wenn das gelingt, kann sich auf dieser Grundlage ein breites Methodenspektrum zur Beantwortung natur-, sozial- und wirtschaftswissenschaftlicher Fragen entfalten, das von der Simulation der Landschaftseffekte auf die Produktivität pflanzenbaulicher Systeme über die detaillierte Analyse der zugrundeliegenden Prozesse in geeigneten Landschaftsausschnitten bis zur agrarökonomischen Modellierung unter Einbeziehung der Landschaftsmatrix sowie der gesamtwirtschaftlichen Zusammenhänge reicht. In einem ersten Schritt dieser ambitionierten Forschungsaufgabe wäre ein Programm zur landschaftsorientierten Erhöhung der nachhaltigen Flächenproduktivität in Deutschland und gegebenenfalls Europa zu entwickeln.

Einfluss der Biodiversität auf die Flächenproduktivität. Die Senatskommission schlägt vor, die biologische Vielfalt in die hier genannten Forschungsinitiativen stärker zu integrieren. Da aber Biodiversität per definitionem ein Konzept ist, das auf höhere räumliche Skalen ausgerichtet ist, sollte ein top-down Ansatz verfolgt werden, für den die Rahmensetzung auf der Landschafts- bzw. Regionsebene erfolgt.

Auch wenn es noch erheblichen Forschungsbedarf gibt, gilt es vor diesem Hintergrund daran zu erinnern, dass eine ganze Reihe von wissenschaftlichen Untersuchungen die Möglichkeit einer förderlichen Wechselwirkung zwischen landwirtschaftlicher Produktion und biologischer Vielfalt belegen (e.g. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2010). Für die z.T. hochproduktiven kleinbäuerlichen Betriebe in den Tropen besteht eine positive Korrelation zwischen Ertrag und biologischer Vielfalt (TSCHARNTKE et al., 2012). Für die Nutzung dieses Zusammenhangs stellt sich für die sozioökonomische Forschung allerdings die Frage, wie das Problem der Trade-offs zwischen Arbeitsproduktivität und Kulturar-diversität zu lösen ist.

Beispiele für wissenschaftliche Fragestellungen auf diesem räumlichen Skalenniveau sind:

- Bewertung des Einflusses von natürlichen Habitaten und Landschaftselementen sowie extensiven Bewirtschaftungsformen auf Ökosystemleistungen und die Agrarproduktivität;
- Gesamtbilanzierung von Biodiversität unter Berücksichtigung von funktionell wichtigen Arten und bedrohten Arten der Landschaften;

- Langzeitstudien zu den Produktivitätseffekten der Biodiversität und ihrer Leistungen in Agrarlandschaften mit innovativen Anbaukonzepten (incl. Renaturierungsmaßnahmen), um ökonomische Vorteile zu identifizieren und zu modellieren.

Eine weitere, für die Umsetzung wichtige Forschungsfrage ist: Mit welchen praxisnahen Instrumenten lassen sich Agrarlandschaften so gestalten, dass die Ziele des Biodiversitätsschutzes mit den Produktionszielen harmonisieren? Die besondere Herausforderung bei der praxisnahen Bearbeitung dieser Frage ist, dass „Biodiversität“ im Hinblick auf die Agrarproduktion keineswegs grundsätzlich positiv ist. So kann z.B. ein sogenanntes spillover von wildlebenden Arten in Agrarflächen die Produktivität positiv (durch Ecosystem Services wie Bestäubung oder Schädlingsregulation) aber auch negativ (durch Ecosystem Disservices wie Erntevernichtung durch Herbivore oder Pathogene) beeinflussen (BLITZER et al., 2011).

3.3 Schwerpunkt 3: Ökonomische, gesellschaftliche und politische Dimensionen der Ertragssteigerung von Kulturpflanzen

Die Entwicklung der landwirtschaftlichen Produktionssysteme wird von ökonomischen, gesellschaftlichen und politischen Faktoren mitbestimmt, die ihren eigenen Gesetzmäßigkeiten und Dynamiken unterliegen. In Verbindung mit den zwei oben beschriebenen Schwerpunkten geht es in dieser Querschnittsaufgabe darum, die Steuerungsmöglichkeiten zu identifizieren und zu analysieren, mit denen eine nachhaltige ressourceneffiziente Erhöhung der Flächenproduktivität erreicht werden kann. Dazu sind Forschungsansätze auf drei Ebenen notwendig.

Betriebliche Ebene: Für beide von der Senatskommission für Agrarökosystemforschung vorgeschlagenen Schwerpunkte (Optimierung des Potentials von Kulturpflanzen; Pflanzenproduktion im Landschaftskontext) spielt die Ebene des landwirtschaftlichen Betriebes eine herausragende Rolle. Auf dieser Ebene werden die wesentlichen Produktionsentscheidungen getroffen, die dann einerseits die Wahl der Kulturpflanzen und deren Management auf Schlagebene beeinflussen, und die andererseits, als Folge der unabhängigen Entscheidungen aller in einem Landschaftsraum angesiedelten Betriebe, die Pflanzenproduktion im Landschaftskontext bestimmen. Ökonomische Parameter spielen eine entscheidende Rolle für einzelbetriebliche Entscheidungen. Umweltwirkungen, wie etwa der Rückgang von Biodiversität oder die Reduktion von Struktur-Elementen in der Landschaft, werden nur dann im betrieblichen Entscheidungskalkül berücksichtigt, wenn entsprechende ökonomische Anreize bestehen, die über unterschiedliche Steuerungsmechanismen, wie z.B. Umweltschutzaufgaben, beeinflusst werden können. Integrierte Forschungsansätze wie die agentenbasierte bio-ökonomische Modellierung, können neue Erkenntnisse zu diesen Fragen schaffen, da sie sowohl das einzelbetriebliche Entscheidungsverhalten als auch die Interaktion von Betrieben im Landschaftskontext abbilden.

Gesellschaftliche und politische Ebene: Im Rahmen der EU-Agrarpolitik stehen bereits heute Politikinstrumente zur „Förderung einer markt- und standortangepassten Landbewirtschaftung“ zur Verfügung. Allerdings finden Förderungsmaßnahmen bislang mehrheitlich auf einzelbetrieblicher Ebene statt. Es besteht daher Forschungsbedarf über die Wirkungen von Politikinstrumenten, die auf der Landschaftsebene ansetzen, was häufig kollektives Handeln von verschiedenen Akteuren, wie z.B. landwirtschaftlichen Betrieben, Dienstleistern, Lieferanten von Produktionsmitteln und des Absatzhandels erfordert. Über staatliche Förderungsinstrumente hinaus sind auch innovative neue Instrumente zu untersuchen, die die Bürger/-innen in den entsprechenden Regionen einbeziehen. Die bisherige Erfahrung zeigt auch, dass es zahlreiche Widerstände und Blockaden gegen eine konsequentere Ausrichtung der Agrarpolitik auf Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit gibt. Daher ist ein besseres Verständnis der gesellschaftlichen Transformationsprozesse notwendig, mit denen solche Blockaden überwunden werden können. Das Feld der gesellschaftlichen Transformationsforschung (WBGU, 2011) bietet hier neue Erkenntnismöglichkeiten.

Auf der Basis der oben aufgeführten Überlegungen lassen sich drei Forschungsfelder identifizieren, die vorzugsweise in inter- und transdisziplinären Forschungsverbünden bearbeitet werden sollten.

Entwicklung neuer Bewertungssysteme und Indikatoren. In diesem Forschungsfeld geht es um die Entwicklung von neuen Bewertungssystemen und Indikatoren, die neben der Kenngröße „Ertrag an Nahrungsmitteln bzw. Biomasse je Fläche“ sowohl in der Forschung, z.B. in Simulationsmodellen (siehe nächster Punkt), als auch in der Politikberatung verwendet werden können. Dazu zählen etwa der Energieverbrauch und der Wasserverbrauch je Ertrags-einheit, wobei genutzte Nebenprodukte in der Ertrags-einheit zu berücksichtigen sind. Auch für die Treibhausgasbilanz oder die Nutzung weiterer Ressourcen bzw. Erbringung von Ökosystemleistungen sind geeignete Indikatoren zu entwickeln, die jedoch auf einer System-Betrachtung beruhen müssen (z.B. Berücksichtigung der Fruchtfolge). Auf diesem Feld kann eine Verbindung der ökonomischen mit der ökologischen Forschung und den Planungswissenschaften wichtige Beiträge leisten: Ungeklärte Forschungsfragen betreffen auch die Analyse von Substitutionsbeziehungen und Trade-offs, Ökobilanz-Analysen unter Einbeziehung von Endpoint-Effekten auf den ersten Stufen der Wertschöpfungskette und die ökonomische Bewertung von Ökosystemleistungen verschiedener Produktionsverfahren. So ermöglicht z.B. die Einbeziehung des monetären Wertes von Ökosystemleistungen eine neue Basis für die Berechnung der gesellschaftlichen Kosten der Landnutzung. Im Zusammenhang mit der Substituierbarkeit von Ökosystemleistungen ist dabei zu klären, in welchem Maße einem Konzept starker Nachhaltigkeit zu folgen wäre, das davon ausgeht, dass Naturkapital als Hinterlassenschaft für zukünftige Generationen – im Gegensatz zum Konzept der schwachen Nach-

haltigkeit – nicht substituierbar ist (DALY, 1999). Neue Indikatoren und Bewertungssysteme sind dafür auch für die makro-ökonomische Ebene zu entwickeln. Hierzu gehört zum Beispiel der Indikator „comprehensive wealth“, der ökologische und soziale Aspekte einbezieht (ARROW et al., 2012).

Verbindung von ökonomischen und ökologischen Modellen. Einzelbetriebliche Entscheidungen spielen eine Schlüsselrolle für die nachhaltig ressourceneffiziente Steigerung der Flächenproduktivität. Daher ist eine Weiterentwicklung der Methoden zur Analyse von einzelbetrieblichen Entscheidungen notwendig, welche die im letzten Abschnitt genannten neuen Indikatoren und Bewertungskonzepte integriert. Ein vielversprechender Forschungsansatz ist dabei die agentenbasierte bio-ökonomische Modellierung (siehe z.B. SCHREINEMACHERS und BERGER, 2011) in der einerseits biologische, hydrologische und geographische Parameter mit ökonomischen Modellen verknüpft werden und andererseits die Auswirkungen einzelbetrieblicher Entscheidungen auf Landschaftsebene abgebildet werden. Eine stärkere Integration von Umwelt-Parametern ist auch für weitere Forschungs- und Modellierungsansätze relevant, die zur Bewertung des technischen Fortschritts und zur Abschätzung von Politik-Effekten auf den verschiedenen Aggregations-Niveaus (Betrieb, Region, Nation, bis global) eingesetzt werden. Bei der Integration von Umwelt-Parametern in solche Modelle ist zwischen reversiblen und irreversiblen Effekten zu unterscheiden (ARROW et al., 2012; WESSELER, 2009). Von besonderer Bedeutung ist auch die Berücksichtigung von positiven und negativen externen Effekten, die lokal, regional, national und international auftreten können. Mit einer entsprechenden Methodenentwicklung und Datenbereitstellung können neue Perspektiven für die politische Entscheidungsunterstützung und die Gestaltung von Steuerungsinstrumenten in den Bereichen Recht, Förderung/Anreiz und Kommunikation eröffnet werden. Hier kommt der Analyse der Instrumente, die im Rahmen der EU-Agrarpolitik eingesetzt werden, besondere Bedeutung zu.

Gesellschaftliche Transformationsprozesse und Unterstützung politischer Entscheidungen. Eine nachhaltige Entwicklung von Systemen mit multiplen ökologisch-ökonomischen Leistungssteigerungen erfordert eine Berücksichtigung gesellschaftlicher Prozesse sowie die Teilnahme der Akteure an der Entwicklung von fallspezifischen Lösungen. Das oben genannte neue Feld der gesellschaftlichen Transformationsforschung kann hier erhebliche Beiträge leisten (siehe z.B. LOORBACH, 2010; MARKARD et al., 2012). In diesem Forschungsfeld sind transdisziplinäre Forschungsansätze und Aktionsforschungsmethoden besonders aussichtsreich, in denen die Akteure eingebunden werden, wobei institutionelle Rahmenbedingungen wie formelle und informelle Eigentumsrechte explizit zu berücksichtigen sind (OSTROM, 2010). Dazu ist eine Weiterentwicklung von Methoden, wie etwa der partizipativen Multi-Kriterien-Analyse (siehe z.B. FONTANA et al., 2013) und von Governance-Ansätzen notwendig. Für die Unter-

stützung der Entscheidungsfindung auf Grundlage von Projektionen, die zunehmend langfristiger werden und mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet sind, müssen in solchen Ansätzen auch potentielle Unsicherheiten in der Bewertung berücksichtigt und ausgedrückt werden. Als Teil dieses Forschungsfelds ist auch die Unterstützung von politischen Entscheidungsprozessen zu sehen. Hier können Erkenntnisse aus allen im Querschnittsthema untersuchten Bereichen (Bewertungssysteme, Indikatoren, Ergebnisse aus Simulationsmodellen, Analysen zu bestimmten Sektoren wie z.B. dem Saatgutsektor, Erkenntnisse aus Verfahren mit Bürgerbeteiligung) zum Einsatz kommen. Auch sind politische Entscheidungsverfahren, die für die Entwicklung von nachhaltigen landwirtschaftlichen Produktionssystemen relevant sind, selbst als Forschungsgegenstand zu betrachten. Im Hinblick auf die Agrar-Umweltpolitik ist die Verknüpfung von politischen Entscheidungsprozessen auf verschiedenen Ebenen (EU, national, Länder-Ebene) hier von besonderer Bedeutung.

4 Exemplarische Umsetzung: Transdisziplinäre Themenvorschläge

Die Schwerpunktthemen dieses Grundsatzpapiers wurden in einem „Think-Tank“ Rundgespräch mit Nachwuchswissenschaftlern und -wissenschaftlerinnen diskutiert (Göttingen 23. bis 25. Oktober 2013, Teilnehmer s. Anlage). Ad hoc Arbeitsgruppen entwickelten daraus exemplarisch Vorschläge für drei transdisziplinäre Querschnittsthemen, die insbesondere den Schwerpunkten 1 und 2 zugeordnet werden können.

4.1 Thema 1: Bedeutung von Flächenstrukturen für die Ertragsbildung

Ziel ist die Entwicklung einer interaktionsoptimierten Pflanzenproduktion zur ressourceneffizienten Steigerung der Flächenproduktivität.

Hypothese: Durch Steigerung der Heterogenität auf verschiedenen Skalenebenen (Pflanzen-, Schlag- und Landschaftsebene) können positive Nachbarschaftseffekte sowohl zwischen Kulturpflanzen als auch zwischen Kulturpflanzen und naturnahen Strukturelementen (z.B. Hecken) gefördert werden, wodurch eine höhere Flächenproduktivität bei verringertem Ressourceneinsatz erreicht werden kann.

Methodische Ansätze/Innovation:

- Ursachenforschung von Nachbarschaftseffekten: Übertragung funktioneller Biodiversitätsforschung und Nutzung moderner Methoden der Pflanzenzüchtung zur Identifikation positiver und negativer Nachbarschaftseffekte und zur Optimierung von Pflanzen für Mischkulturen.
- Entwicklung neuer Methoden zur Optimierung der Nachbarschaftseffekte beim Anbau unter Berücksichtigung innovativer Techniken der Kulturführung und Ernte (z.B. Sortierung der Produkte aus Mischkulturen, Sensortechniken).

- Entwicklung neuer landschaftsökologischer und landschaftsplanerischer Methoden zur Integration positiver Nachbarschaftseffekte auf verschiedenen Skalenebenen: (1) Analyse bestehender Daten aus unterschiedlich strukturierten Regionen: Vergleich groß- und kleinflächiger Anbauregionen. (2) Großflächige Experimente mit gezielter Landschaftsgestaltung bzw. systematischem Anbau. (3) Einsatz moderner Monitoring-Methoden.
- Agentenbasierte bio-ökonomische Modellierung zur Entwicklung innovativer Anreizsysteme.

4.2 Thema 2: Standortoptimierte Ertragspotentiale

Ziel ist die nachhaltige Optimierung der Pflanzenproduktion in Relation zu den gegebenen spezifischen Standortbedingungen.

Hypothesen:

- Die genaue Charakterisierung eines Standorts ermöglicht eine ertragsoptimierte Fruchtfolgegestaltung.
- Durch moderne Pflanzenzüchtung lassen sich standortoptimierte Genotypen entwickeln.
- Standorte können hinsichtlich multipler Merkmale der Flächenproduktivität optimiert werden.

Methodische Ansätze/Innovation:

- Hochaufgelöste Fernerkundung standortspezifischer Parameter (z.B. Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit, Verdichtung, Klimadaten).
- Innovative Weiterentwicklung ökonomischer Modelle: Integrierung von Standort- und Klimadaten in Modelle (z.B. bodenmikrobiologische Kenngrößen, Schädlinge, standortbezogene Ertragsdaten, Marktgegebenheiten, Klimawandel).
- Genomische Selektion, Genome wide association mapping in Kombination mit bekannten Genomsequenzen und der Identifizierung von merkmalskodierenden Genen (intra- und interspezifischen Gene, die bestimmte Toleranzen (z.B. Hitze) und Funktionen (z.B. höherer Proteingehalt) von Pflanzen bedingen). Züchterische Anpassung an die Standortgegebenheiten, Organismische Interaktionen zwischen Pflanze und Bodenmikroorganismen.
- Identifikation limitierender Standortbedingungen und Entwicklung von Maßnahmen zur Reduktion der Limitierungen, beispielsweise durch Veränderungen des Managements, der Standorteigenschaften und der Umgebung (z.B. Bodenmeliorationen, Heckenpflanzung). Meta-Analysen bestehender Daten sowie Initiierung neuer (Dauer-) Versuche zur Evaluierung, Modellierung der Wirksamkeit der Maßnahmen.

4.3 Thema 3: Phänotypische Stabilität von Weizen bei nachhaltigem Nährstoffmanagement

Ziel ist die Sicherstellung der Ertragsstabilität (phänotypische Stabilität) von Kulturpflanzen unter verändertem Nährstoffmanagement. Die Sicherstellung der phänotypischen Stabilität erfordert das Prozessverständnis der

Interaktion von Management, Standort und Genotyp. Die phänotypische Stabilität des Weizens als ökonomisch relevante Kulturart stellt besonders hohe Anforderungen an ein optimales Nährstoffmanagement und soll modellhaft untersucht werden. Die Lösungskonzepte berücksichtigen verschiedene Skalenebenen.

Hypothesen:

- Nachhaltiges Nährstoffmanagement erfordert eine veränderte genetische Konstitution zur Sicherstellung der phänotypischen Stabilität des Weizens.
- Die Nährstoffeffizienz kann durch Einbeziehung der Wechselbeziehungen zwischen Bodenmikroorganismen und Pflanzen (bodeninternes Nährstoffnachlieferungspotential, N-Fixierung) erhöht werden.
- Die Entwicklung und Parametrisierung von prozessorientierten Modellen im System „Boden-Pflanze-Umwelt“ ermöglicht die Quantifizierung der Nährstofffreisetzung aus organischer Bodensubstanz.
- „Multi-Sensing-Verfahren“ können die teilflächenspezifische und bedarfsgerechte Ausbringung von Düngern ermöglichen.
- Innovationen in der Verfahrenstechnik können Nährstoffverluste minimieren.
- Die Substratqualität kann durch Additive und Aufschlussverfahren verbessert werden (z.B. Biochar).
- Das Ernterest-Management kann durch eine Optimierung der Fruchtfolgegestaltung verbessert werden.

Methodische Ansätze/Innovation:

- Das Wechselspiel zwischen Management und Standort wird sowohl experimentell als auch modellhaft analysiert. Der Fortschritt in der Genomforschung (Genomics/Transcriptomics/Proteomics/Metabolomics; Präzisionsphänotypisierung) ermöglicht die genetische Basis komplexer Merkmale zu verstehen und für die molekulare Züchtung zu nutzen. Zusätzlich wird ein molekulares Verständnis der physiologischen Mechanismen ermöglicht.
- Molekulare Diagnostik von Schlüsselorganismen der Mineralisation und trophischer Interaktionen sowie Verknüpfung von prozessorientierter Modellierung und Nahrungsnetzmodellen.
- Analyse von aktuellen und historischen Versuchs- und Wetterdaten mittels Modellierung.
- Entwicklung prozessorientierter Modelle und Integration des Systemverständnisses aus angrenzenden Skalenebenen.
- Entwicklung von Online-Entscheidungshilfen, welche statistische Modellansätze, prozessorientierte Modellansätze und Messverfahren (online/offline) kombinieren.

Beispiele: (1) Ableitung von Intensitäten durch statistische Modelle; (2) jahresspezifische Anpassung durch prozessorientierte Modelle; (3) Substrat und Bestandesmessungen für teilflächenspezifische Ausbringung (Precision Farming).

- Entwicklung von Verfahren welche die Substratqualität verbessern.
- Entwicklung von Online-Sensoren, um Substrateigenschaften zu charakterisieren.

4.4 Zusammenfassende Einschätzung der Senatskommission und Ausblick

Der inhaltliche Austausch am Think-Tank-Rundgespräch war sehr anregend und ermöglichte einen intensiven Wissens- und Erfahrungsaustausch und auch die Netzwirkbildung unter den Teilnehmern. Vor allem ist positiv zu verzeichnen, dass der wissenschaftliche Nachwuchs auf Basis des Grundsatzpapiers Ideen entwickelte und umsetzen will. Für eine solche Umsetzung und Implementierung sieht die Senatskommission für Agrarökosystemforschung die Notwendigkeit der Kombination aller möglichen Förderinstrumente der DFG (Forschergruppen, Graduiertenschulen, Sonderforschungsbereiche, Transferbereiche, Schwerpunktprogramme), da nur so eine Anwendungsorientierung und die nötige Inter- und Transdisziplinarität erreicht werden kann.

Insgesamt eröffnet dieses Grundsatzpapier die Diskussion über die Forschungsperspektiven zur globalen Sicherung der Ernährung. Neben einer nachhaltigen Sicherung und Steigerung der Produktion sollten weitere ergänzende oder substitutive, allerdings auch noch unkonkrete Pfade der Ernährungssicherung erforscht werden – wie in Kapitel 1 bereits ausgeführt. Erst in einem gesamtheitlichen Kontext, der auch die Reduktion der Lebensmittelverschwendung, die Verbesserung infrastruktureller Rahmenbedingungen oder die Veränderung der Ernährungsgewohnheiten umschließt, wird das Thema Flächenproduktivität als einer der wichtigsten Bausteine für eine nachhaltige Zukunft eingeordnet werden können.

Anlage

Teilnehmer des Think Tank Rundgesprächs „Nachhaltige Flächenproduktivität“ vom 23. bis 25. Oktober 2013 in Göttingen

Klaus Birkhofer, Lund University

Dr. Gunnar Breustedt, Universität Kiel

PD Dr. Tim Diekötter, Justus-Liebig-Universität Gießen

Prof. Dr. Michael Frei, Universität Bonn

Prof. Dr. Thomas Gottschalk, Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg

Dr. Grit Haseneyer, Technische Universität München

Dr. Sebastian Höllerl, Technische Universität München

Dr. Michael Kaiser, Universität Kassel

Dr. Daniela Kempa, Leibniz Universität Hannover

Aline Koch, Universität Gießen

Dr. Sven Marhan, Universität Hohenheim

Dr. Benjamin Neuhäuser, Universität Hohenheim

Dr. Tobias Plieninger, University of Copenhagen

Dr. Arne Ratjen, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Prof. Dr. Jochen Reif, Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung

Dr. Marc Schetelig, Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie
 Dr. Adam Schikora, Universität Gießen
 Prof. Dr. Mehmet Senbayram, Georg-August-Universität Göttingen
 Dr. Stefan Siebert, Universität Bonn
 Dr. Bettina Tonn, Universität Göttingen
 Dr. Jens Karl Wegener, Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen

Literatur

- ARROW, K., P. DASGUPTA, L. GOULDER, K. MUMFORD, K. OLESON, K., 2012: Sustainability and the measurement of wealth. *Environment and Development Economics* **17**, 317-353.
- BLITZER, E.J., C.F. DORMANN, A. HOLZSCHUH, A.M. KLEIN, T.A. RAND, T. TSCHARNTKE, 2011: Spillover of functionally important organisms between managed and natural habitats. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **146**, 34-43.
- CASSIDY, E.S., P.C. WEST, J.S. GERBER, J.A. FOLEY, 2013: Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare. *Environmental Research Letters* **8**, 034015.
- CHEN, X.P., Z.L. CUI, P.M. VITOUSEK, K.G. CASSMAN, P.A. MATSON, J.S. BAI, Q.F. MENG, P. HOU, S.C. YUE, V. RÖMHELD, F.S. ZHANG, 2011: Integrated soil-crop system management for food security. *PNAS* **108**, 6399-6404.
- DALY, H.E., 1999: *Wirtschaft jenseits von Wachstum: die Volkswirtschaftslehre nachhaltiger Entwicklung*. Salzburg, Verlag Anton Pustet, 299 S.
- DFG Denkschrift, 2005: *Perspektiven der agrarwissenschaftlichen Forschung/Future Perspectives of Agricultural Science and Research*. Denkschrift/Memorandum. Weilheim, Wiley-VCH Verlag, 72 S.
- DOBERMANN, A., R. NELSON, 2013: Opportunities and solutions for sustainable food production. United Nations sustainable development solutions network – sustainable agriculture and food systems. http://unsdsn.org/thematicgroups/tg7/tg7_resources/.
- DORÉ, T., D. MAKOWSKI, E. MALÉZIEUX, N. MUNIER-JOLAIN, M. TCHAMITCHIAN, P. TITTONELL, 2011: Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy* **34**, 197-210.
- ERISMAN, J.W., M.A. SUTTON, J. GALLOWAY, Z. KLIMONT, W. WINIWARTER, 2008: How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* **1**, 636-639.
- FAO, 2011: *Save and grow. A policymaker's guide to the sustainable intensification of smallholder crop production*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2011, ISBN 978-92-5-106871-7. <http://www.fao.org/docrep/014/i2215e/i2215e.pdf>.
- FONTANA, V., A. RADTKE, V. BOSSI FEDRIGOTTI, U. TAPPEINER, E. TASSER, S. ZERBE, T. BUCHHOLZ, 2013: Comparing land-use alternatives: Using the ecosystem services concept to define a multi-criteria decision analysis. *Ecological Economics*, **93**, 128-136.
- FOLEY, J.A., N. RAMANKUTTY, K.A. BRAUMAN, E.S. CASSIDY, J.S. GERBER, M. JOHNSTON, N.D. MUELLER, C. O'CONNELL, D.K. RAY, P.C. WEST, C. BALZER, E.M. BENNETT, S.R. CARPENTER, J. HILL, C. MONFREDA, S. POLASKY, J. ROCKSTROM, J. SHEEHAN, S. SIEBERT, D. TILMAN, D.P.M. ZAKS, 2011: Solutions for a cultivated planet. *Nature* **478**, 337-342.
- GABRIEL, D., S.M. SAIT, W.E. KUNIN, T.G. BENTON, 2013: Food production vs. biodiversity: comparing organic and conventional agriculture. *Journal of Applied Ecology* **50**, 355-364.
- GODFRAY, H.C.J., J.R. BEDDINGTON, I.R. CRUTE, L. HADDAD, D. LAWRENCE, J.F. MUIR, J. PRETTY, S. ROBINSON, S.M. THOMAS, C. TOULMIN, 2010: Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science* **327**, 812-818.
- GODFRAY, H.C.J., J. PRETTY, S.M. THOMAS, E.J. WARHAM, J.R. BEDDINGTON, 2011: Linking policy on climate and food. *Science* **331**, 1013-1014.
- HABERL, H., K.-H. ERB, F. KRAUSMANN, V. GAUBE, S. GINGRICH, C. PLUTZAR, 2010: Quantification of the intensity of global human use of ecosystems for biomass production. Background note to the World Development Report 2010 "Development and Climate Change", 1-9.
- HAMMER, G., M. COOPER, F. TARDIEU, S. WELCH, B. WALSH, F. VAN EEUWIJK, S. CHAPMAN, D. PODLICH, 2006: Models for navigating biological complexity in breeding improved crop plants. *Trends in Plant Science* **11**, 587-593.
- IMHOFF, M.L., L. BOUNOUA, T. RICKETTS, C. LOUCKS, R. HARRISS, W.T. LAWRENCE, 2004: Global patterns in human consumption of net primary production. *Nature* **429**, 870-873.
- KAMPERS, F.W.H., 2009: Opportunities for bionanotechnology in food and food industry. In: D.E. Reisner (Editor), *Bionanotechnology: Global prospects* CRC Press, ISBN 978-0-8493-7528-6, 79-90.
- KASTNER T., M.J.I. RIVAS, W. KOCH, S. NONHEBEL, 2012: Global changes in diets and the consequences for land requirements for food. *Proc. Natl Acad. Sci.* **109**, 6868-72.
- KEURENTJES, J.J.B., G.C. ANGENENT, M. DICKE, V.A.P. MARTINS DOS SANTOS, J. MOLENAAR, W.H. VAN DER PUTTEN, P.C. DE RUITER, P.C. STRUIK, B.P.H.J. THOMMA, 2011: Redefining plant systems biology: from cell to ecosystem. *Trends Plant Sci.* **16**, 183-190.
- KÖGEL-KNABNER, I., P. GRATHWOHL, E. KOTHE, G. TEUTSCH, H. VEREECKEN und 20 weitere Autoren, 2013: Strategiepapier „Langzeitperspektiven und Infrastruktur der terrestrischen Forschung Deutschlands – ein systemischer Ansatz“. 30 S. http://www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/gremien/senat/agraroekosystemforschung/strategiepapier_infrastruktur.pdf.
- LOBELL, D.B., K.G. CASSMAN, C.B. FIELD, 2009: Crop Yield Gaps: Their importance, magnitudes and causes. *Annual Review of Environment and Resources* **34**, 179-204.
- LOORBACH, D., 2010: Transition Management for Sustainable Development: A Prescriptive, Complexity-Based Governance Framework. *Governance*, **23**, 161-183.
- MARKARD, J., R. RAVEN, B. TRUFFER, 2012: Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, **41**, 955-967.
- OECD/FAO, 2012: *OECD-FAO Agricultural Outlook 2012-2021*, OECD Publishing and FAO.
- OSTROM, E., 2010: Beyond Markets and States: Polycentric Governance of Complex Economic Systems. *The American Economic Review* **100**, 641-672.
- RAMANKUTTY, N., A.T. EVAN, C. MONFREDA, J.A. FOLEY, 2008: Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles* **22**, GB1003, DOI: 10.1029/2007GB002952.
- RAY, D.K., N.D. MUELLER, P.C. WEST, J.A. FOLEY, 2013: Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS ONE*, **8**: e66428, doi:10.1371/journal.pone.0066428.
- SCHREINEMACHERS, P., T. BERGER, 2011: An agent-based simulation model of human-environment interactions in agricultural systems. *Environmental Modelling and Software* **26**, 845-859.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2010: *Global Biodiversity Outlook 3*. Montréal, pp 94.
- Senatskommission für Agrarökosystemforschung, 2013: *Feldversuchsinfrastrukturen – Status quo und Perspektiven*. Positionspapier der Senatskommission für Agrarökosystemforschung der DFG. 5 S. http://www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/gremien/senat/agraroekosystemforschung/positionspapier_feldversuchsinfrastrukturen.pdf.
- SRU, 2002: *Umweltgutachten 2002 des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen*, 548 S.
- SUTTON, M.A., O. OENEMA, J.W. ERISMAN, A. LEIP, H. VAN GRINSVEN, W. WINIWARTER, 2011: Too much of a good thing. *Nature* **472**, 159-161.
- TILMAN, D., K.G. CASSMAN, P.A. MATSON, R. NAYLOR, S. POLASKY, 2002: Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* **418**, 671-677.
- TILMAN, D., C. BALZER, J. HILL, B.L. BEFORT, 2011: Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *PNAS* **108**, 20260-20264.
- TSCHARNTKE, T., Y. CLOUGH, T. WANGER, L. JACKSON, I. MOTZKE, I. PERFECTO, J. VANDERMEER, A. WHITBREAD, 2012: Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation* **151**, 53-59.
- WESSELER, J., 2009: The Santaniello Theorem of Irreversible Benefits. *AgBioForum* **12**, 8-13.
- WBGU, 2011: *Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation*. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen. 420 S.