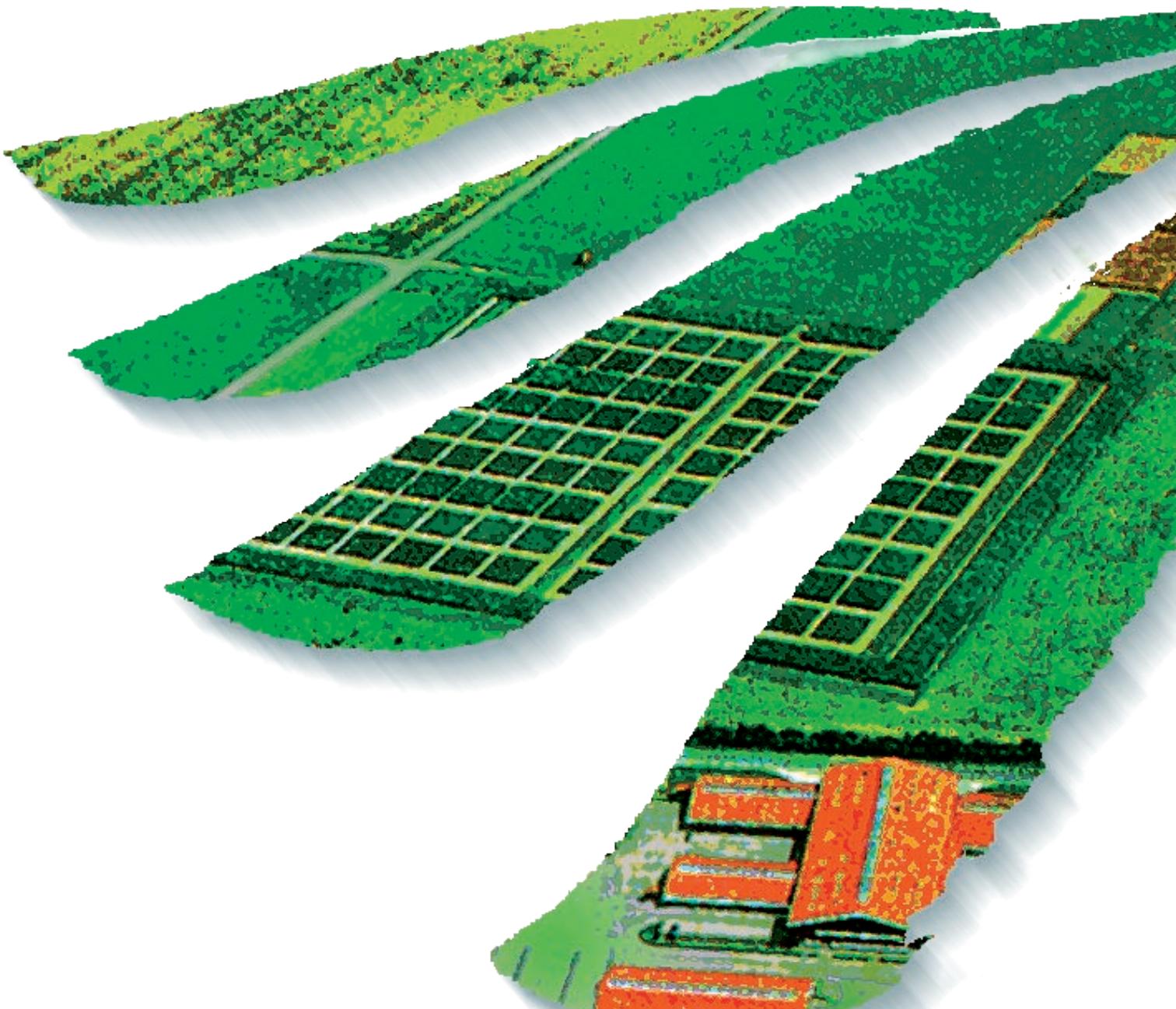


Landbauforschung
Völkenrode
FAL Agricultural Research

**Analyse des Sachstands zu Auswirkungen
von Klimaveränderungen auf die deutsche
Landwirtschaft und Maßnahmen zur An-
passung**

Michaela Schaller und Hans-Joachim Weigel



Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

2007

**Landbauforschung Völkenrode - FAL Agricultural Research
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany**

landbauforschung@fal.de

Preis / Price: 16 €

**ISSN 0376-0723
ISBN 978-3-86576-041-8**

Sonderheft 316
Special Issue



Landbauforschung
Völkensrode
FAL Agricultural Research

**Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von
Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirt-
schaft und Maßnahmen zur Anpassung**

Michaela Schaller und Hans-Joachim Weigel

Endredaktion: Stefan Schrader

Vorwort

Landwirtschaft und Klimawandel stehen in vielfältiger Wechselbeziehung. Neben den Beiträgen der Landwirtschaft zum Klimawandel durch Freisetzung von klimarelevanten Spurengasen ist die Landwirtschaft auch vom Klimawandel betroffen bzw. muss sich an diesen anpassen. Landwirtschaft kann darüber hinaus Beiträge zur Minderung des Klimawandels leisten. Wegen seiner unmittelbaren Abhängigkeit von Witterung und Klima gehört der Agrarsektor prinzipiell zu den sensiblen Bereichen, die der Klimawandel in den nächsten Jahrzehnten betrifft. Die in den letzten Jahren aufgetretene ungewöhnliche Wettervariabilität einerseits und die immer konkreter werdenden Modell-Projektionen des Klimawandels der Zukunft andererseits haben dazu beigetragen, dass sich in jüngster Zeit die politische und wissenschaftliche Aufmerksamkeit mehr auf den Aspekt der möglichen Folgen des Klimawandels für den Agrarsektor verschoben hat.

Immer deutlicher wird, dass der für die nächsten Jahrzehnte vorhergesagte Klimawandel nicht mehr aufzuhalten ist. Landwirtschaft und ländlicher Raum insgesamt müssen sich diesem Wandel stellen. Dazu müssen Szenarien über die möglichen bzw. wahrscheinlichen Folgen dieses Wandels bekannt sein, um entscheiden zu können, ob und welche Maßnahmen daraus zur Anpassung zu entwickeln sind. Die Bedeutung des Klimawandels auf der globalen Ebene ist dabei ebenso zu bewerten wie mögliche Ursache-Wirkung-Szenarien auf der regionalen Ebene, da diese von den globalen Trends abweichen können.

Auch die deutsche Landwirtschaft ist vom Klimawandel betroffen. Welche möglichen Folgen sich aus dem Klimawandel für die einheimische Landwirtschaft ergeben könnten und welche Anpassungsmaßnahmen bestehen, kann aus zahlreichen Prozessuntersuchungen und aus einigen Regionalstudien auf nationaler und internationaler Ebene abgeleitet werden. Zu beiden Aspekten ist bisher keine aktuelle Zusammenfassung mit Bezug zur einheimischen Landwirtschaft vorhanden. Letztmalig wurde vor ca. 15 Jahren (Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ 1992-1994) eine Bewertung des Erkenntnisstandes möglicher Klimafolgen für die deutsche Landwirtschaft vorgenommen. Zwischenzeitlich sind wichtige neue wissenschaftliche Erkenntnisfortschritte erzielt bzw. neue Entwicklungen in der Landwirtschaft selbst eingetreten. Die vorliegende Studie trägt diese neuen Informationen in einem Bericht zusammen.

Die vorliegende Sachstandsanalyse wäre nicht zustande gekommen ohne den Beitrag einer Vielzahl von Personen, die bereitwillig und mit großem Engagement fachliche Hilfe geleistet haben. Wissen und Erfahrungen zahlreicher Interviewpartner aus dem wissenschaftlichen und administrativen Bereich verschiedener Einrichtungen in Deutschland sowie verschiedener Fachkolleginnen und -kollegen sind in den Bericht eingeflossen. Dafür sei an dieser Stelle gedankt. Unser Dank gilt auch den Mitarbeitern des Instituts für Agrarökologie für den bereichernden fachlichen Austausch und insbesondere Frau Dörte Prüfert für die redaktionelle Hilfe sowie dem BMELV für die Bereitstellung zusätzlicher Personalmittel.

Prof. Dr. Hans-Joachim Weigel und Dr. Michaela Schaller

Braunschweig, Dezember 2007

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis.....	5
1 Einführung	7
1.1 Hintergrund und Zielsetzung der Studie	7
1.2 Methodik	8
2 Klima und Klimawandel	8
2.1 Veränderungen physikalischer und chemischer Klimaelemente.....	9
2.2 Globale Klimaentwicklung	13
2.2.1 Beobachtungen seit 1900	13
2.2.2 Zukunftsszenarien	15
2.3 Klimaentwicklung in Deutschland.....	23
2.3.1 Beobachtungen seit 1900	23
2.3.2 Zukunftsszenarien	26
3 Produktionsbedingungen für die Landwirtschaft in Deutschland.....	33
3.1 Die deutsche Landwirtschaft im europäischen und internationalen Kontext.....	34
3.2 Naturräumliche Gliederung Deutschlands	35
3.3 Standort- und Klimaansprüche, Verbreitung und Ertragsentwicklung der Haupt- und Sonderkulturen	41
3.3.1 Getreide.....	43
3.3.2 Blattfrüchte.....	52
3.3.3 Grünland.....	55
3.3.4 Sonderkulturen	56
3.3.5 Der Hitzesommer 2003 (2006) als Beispiel von Extremwirkungen auf die pflanzliche Produktion.....	59
3.4 Verbreitung und Produktionsniveau der Veredelungswirtschaft	63
3.5 Interaktionen zwischen Landwirtschaft und Klimawandel.....	66
3.5.1 Landwirtschaft als Quelle von Treibhausgasen	67
3.5.2 Beitrag der Landwirtschaft zur Minderung von Treibhausgasemissionen.....	69
4 Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft.....	77
4.1 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf pflanzenphysiologische Prozesse und die Ertragsleistung der wichtigsten Kulturpflanzen.....	80
4.1.1 Auswirkungen der Temperaturerhöhung	81
4.1.2 Auswirkungen zunehmender CO ₂ -Konzentrationen in der Atmosphäre	88
4.1.3 Auswirkungen von troposphärischem Ozon	101
4.1.4 Auswirkungen von UV-B-Strahlung.....	105
4.1.5 Auswirkungen von veränderten Niederschlägen, einschließlich Starkregenereignissen	106
4.1.6 Kombinationswirkungen verschiedener Klimaelemente	108
4.1.7 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Qualität pflanzlicher Produkte	112
4.2 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Boden bzw. im Boden ablaufende Prozesse.....	116
4.3 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Schadorganismen (Unkräuter, Schädlinge und Krankheiten).....	123
4.3.1 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Unkräuter	123

4.3.2	Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Schädlinge	126
4.3.3	Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Krankheitserreger	131
4.4	Auswirkungen der Klimaveränderungen auf Nutztiere	135
4.4.1	Grünlandproduktivität und -management	135
4.4.2	Tierhaltung	137
4.5	Auswirkungen von Klimaveränderungen auf betriebliche Bewirtschaftungs- formen, wie Bodenbearbeitung und Dünge- und Pflanzenschutzmitteleinsatz	142
4.6	Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Agrarproduktion in Deutschland	143
4.6.1	Regionale Auswirkungen der Klimaveränderung	147
4.6.2	Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die wichtigsten landwirtschaftlichen Produktionszweige in Deutschland	152
4.7	Auswirkungen auf den ländlichen Raum	157
4.7.1	Auswirkungen auf die wirtschaftliche Entwicklung von landwirtschaftlichen Betrieben	158
4.7.2	Auswirkungen auf und Interaktionen mit benachbarten Sektoren	158
5	Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft an den Klimawandel	162
5.1	Anpassung des Pflanzenbaus an Klimaveränderungen	163
5.1.1	Anpassungsmaßnahmen von Seiten der landwirtschaftlichen Betriebe	164
5.1.2	Anpassungsmaßnahmen der Pflanzenzüchtung	172
5.2	Anpassung der Nutztierhaltung an Klimaveränderungen	177
5.3	Anpassungsmaßnahmen der landwirtschaftlichen Beratung	180
5.4	Weitere Anpassungsmaßnahmen	181
5.5	Anpassungsmaßnahmen auf der Politikebene	183
6	Nationale und Internationale Forschung und Programme bzw. Maßnahmen zum Thema Klimawandel und Landwirtschaft	185
6.1	Deutschland	185
6.2	Europa und sonstiges Ausland	187
7	Offene Fragen und Forschungsbedarf	189
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	192
9	Zusammenfassung	193
	Literaturverzeichnis	201
	Abbildungsverzeichnis	235
	Tabellenverzeichnis	236
	Abkürzungsverzeichnis	237
	Anhänge	242
	Interviews bzw. Anfragen zu Maßnahmen in Bezug auf Auswirkungen von Klimaveränderungen und auf Anpassungen der deutschen Landwirtschaft	242
	Teilnahme an Workshops etc. zum Thema Klimawandel mit Bezug zur Landwirtschaft	246

1 Einführung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung der Studie

Eine der letzten Zusammenstellungen zum Thema Klimawandel und Auswirkungen auf die Landwirtschaft in Deutschland war der Sachstandsbericht der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages aus dem Jahr 1994 (Enquete Kommission 1994). Seitdem sind zahlreiche neue wissenschaftliche Erkenntnisse sowohl zum Ausmaß der Klimaänderungen als auch zu möglichen Auswirkungen auf die Landwirtschaft gewonnen worden. Hinzu kommt, dass seit einigen Jahren ein „Extremwetterereignis“ dem nächsten folgt und es dadurch zu einer Inflation in der Verwendung von Superlativen kommt:

- Jahrhundertsommer,
- Jahrhundertflut,
- heißester Juli (2006) seit Beginn der Temperaturlaufzeichnungen sowie
- wärmste 12-Monats-Periode zwischen Juni 2006 und Mai 2007, in der die bundesweite Durchschnittstemperatur nach Analysen des Potsdamer Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) mit 11°C drei Grad höher als in jedem anderen Zwölfmonatszeitraum seit Beginn der Temperaturlaufzeichnung 1893 lag.

Sollte diese Tendenz anhalten, wäre das ein weiterer Hinweis auf eine dramatische Beschleunigung des Klimawandels. Eine

Vielzahl von regionalen, nationalen und internationalen Gremien und Tagungen zum Klimawandel und seinen Auswirkungen auf Ökosysteme und Gesellschaft spiegelt das Interesse sowie die Betroffenheit nicht nur von Seiten der Wissenschaft sondern auch der Politik sowie der breiten Öffentlichkeit wider. In Fachkreisen ist mittlerweile unbestritten, dass der so genannte „Treibhauseffekt“ das globale Klima aufheizt (Latif, 2005a). Darüber hinaus setzt sich immer mehr die Erkenntnis durch, dass der Klimawandel nicht nur droht, sondern bereits in vollem Gange ist, und dass es nicht mehr nur ausreichen wird, Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen zu ergreifen, sondern dass man sich bereits heute bzw. in naher Zukunft an das sich verändernde Klima anpassen müssen (EEA, 2005; UBA, 2006a; BFN, 2006; KOM(2007)).

Dabei hängt die Landwirtschaft neben der Forstwirtschaft wie kaum ein anderer Wirtschaftszweig vom Wetter und vom Klima ab und ist damit unmittelbar vom Klimawandel betroffen. Für Mitteleuropa gab der Extremsommer 2003 einen Vorgeschmack darauf, wie das Klima in Zukunft aussehen könnte und worauf sich die Landwirtschaft in vielen Regionen der Erde einstellen müssen. So gehen aktuelle Klimaszenarien davon aus, dass solch ein heißer und trockener Sommer wie 2003 im Jahre 2100 in Zentral- bzw. Mitteleuropa mit einer Wahrscheinlichkeit von circa 30% oder gar noch häufiger eintreten könnte (Schär *et al.*, 2004; Weisheimer und Palmer, 2005).

Vor dem Hintergrund dieser Klimaszenarien einerseits und der Vielzahl von neuen Studien bzw. Erkenntnissen der letzten Jahre zu möglichen Folgen des Klimawandels für die Landwirtschaft auch in Mitteleuropa andererseits war es Zielsetzung der vorliegenden Studie, den aktuellen Sachstand über mögliche Wirkungen des Klimawandels auf die deutsche Landwirtschaft sowie über mögliche Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel zusammenzustellen bzw. zu analysieren. Dabei standen die wichtigsten landwirtschaftlichen Produktionszweige bzw. Produkte im Vordergrund. Berücksichtigt werden neben regionalen Besonderheiten auch Studien aus dem europäischen und internationalen Raum mit ähnlichen Voraussetzungen und Zielsetzungen. Weitere Aspekte zum Thema Klimawandel und Landwirtschaft, wie vor allem zur Rolle der Landwirtschaft als Quelle von Treibhausgasen sowie zu den Beiträgen der Landwirtschaft zur Minderung klimawirksamer Spurengase werden nur insoweit behandelt, als sie für den Gesamtkontext Klimawandel und Landwirtschaft von Bedeutung sind.

1.2 Methodik

Der vorliegende Bericht fasst den aktuellen¹ Kenntnisstand zu Klimaveränderungen und Auswirkungen auf die (deutsche) Landwirtschaft sowie zu möglichen Anpassungsmaßnahmen zusammen. Eine detaillierte Sichtung und Zusammenfassung der sehr vielfältigen, vorwiegend internationalen Originalliteratur zum

¹ Stand: 09/2007.

Thema Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft konnte dabei nicht erfolgen. Vielmehr wird überwiegend auf Übersichtsartikel wie auch auf eine Auswahl einschlägiger Artikel der umfangreichen Originalliteratur zu den verschiedenen Aspekten des Klimawandels zurückgegriffen. Ergänzt werden diese Informationsquellen durch Ergebnisse eigener wissenschaftlicher Arbeiten zum Thema, durch den Austausch mit Fachleuten auf Veranstaltungen zum Klimawandel mit Bezug zur Landwirtschaft und durch Interviews² mit landwirtschaftlichen Einrichtungen in ganz Deutschland zu laufenden bzw. geplanten und abgeschlossenen Forschungsarbeiten, Projekten und Erfahrungen sowie Erwartungen bzw. Prognosen für die Zukunft. Ansprechpartner waren neben den zuständigen Ministerien und Landwirtschaftsämtern der einzelnen Bundesländer auch landwirtschaftliche Forschungseinrichtungen der Universitäten bzw. des Bundes und der Länder sowie Landwirtschaftsverbände und Züchter. Eine Zusammenstellung der interviewten Institutionen und wesentlicher Gesichtspunkte der Interviews sowie der besuchten Workshops findet sich im Anhang.

2 Klima und Klimawandel

Die Klimafolgenforschung hat in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte gemacht: leistungsstarke Großrechner ermöglichen mittlerweile die Berechnung komplexer, zeitlich und räumlich hoch

² Die Interviews wurden überwiegend im Frühjahr 2006 durchgeführt, so dass Projekte und Forschungsarbeiten jüngerer Datums nur zum Teil erfasst werden konnten.

aufgelöster Klimamodelle. Während vor ein paar Jahren die räumliche Auflösung der globalen Klimamodelle noch bei ca. 250 x 250 km lag, liegen heutzutage regionale Klimamodelle mit einer Gitternetzweite von 10 x 10 km vor. Allerdings können die Veränderungen der einzelnen Klimaelemente (s.u.) nur mit unterschiedlicher Präzision berechnet werden. So sind Projektionen für großräumige Temperaturveränderungen mit relativ hoher Eintrittswahrscheinlichkeit möglich, wohingegen Niederschlagsprojektionen auf Grund ihres stärker regional ausgeprägten Charakters noch größeren Unsicherheiten unterliegen. Noch unsicherer sind die Simulationen für Extremereignisse wie Dürren oder Stürme, etc. Eine besondere Bedeutung haben des Weiteren so genannte Kippunkte, bei deren Überschreitung sich sprunghafte Klimaveränderungen ergeben könnten (z.B. Schellnhuber, 2007). Der für Nord- und Mitteleuropa wichtigste Kippunkt ist das mögliche Abbrechen des Golfstromes, was eine dramatische Abkühlung zur Folge hätte; von weltweiter Bedeutung ist u.a. der Erhalt des Amazonasregenwaldes.

2.1 Veränderungen physikalischer und chemischer Klimaelemente

Unter dem Begriff „Klima“ versteht man in der Meteorologie den über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten (typischer Weise 30-40 Jahre) durch Mittelwerte und Summen physikalischer Größen beschriebenen Zustand der Erdatmosphäre an einem bestimmten Ort. Neben Mittelwerten sind Extremwerte, Variabilitäten und

Trends von besonderem Interesse. Ausgehend von der Problematik der Vergleichbarkeit von Klimageschehen bzw. Klimabedingungen hat die *World Meteorological Organization* (WMO³) so genannte *Klimanormalperioden* festgelegt. Diese umfassen einen fest definierten Referenzzeitraum von 30 Jahren. Die festgelegten Intervalle sind die schon abgeschlossenen Zeiträume von 1931 bis 1960 und 1961 bis 1990, sowie die derzeitige Klimanormalperiode von 1991 bis 2020. Viele Szenarien der zukünftigen Klimaentwicklung beziehen sich auf das Jahr 2050 bzw. 2080, also auf das jeweilige Ende der nächsten Klimanormalperioden.

Zu den wichtigsten *physikalischen* Klimaelementen zählen u.a. Lufttemperatur, Strahlung, Niederschlag, Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Bewölkung, Luftdruck und Wind. Dazu treten die *chemischen* Klimaelemente, d.h. Klimaeigenschaften, die durch die stoffliche Zusammensetzung der Luft und der Niederschläge charakterisiert sind. Dabei wird diese Atmosphärenchemie v.a. durch die Konzentration an Kohlenstoffdioxid (CO₂), bodennahem Ozon (O₃), Ammoniak (NH₃), Stickoxiden (NO_x), flüchtigen organischen Substanzen („volatile organic compounds“, VOC) und Schwefeldioxid (SO₂) bestimmt (Dämmgen und Weigel, 1998).

³ Spezialorganisation der Vereinten Nationen für Meteorologie, Hydrologie und damit verbundene Geophysik.

Der anthropogene Treibhauseffekt und weitere Ursachen von Klimaveränderungen

Diese oben genannten Klimaelemente, insbesondere Temperatur und Niederschlag, haben sich seit Beginn der Industrialisierung z.T. deutlich verändert. Als Ursache wird vor allem die anthropogene Erhöhung der Konzentration von Stoffen in der Atmosphäre angesehen, die den natürlichen Treibhauseffekt verstärken, indem sie die Wärmeausstrahlung in den Weltraum reduzieren (Abbildung 1). Hierzu zählen neben Wasserdampf (H_2O) in erster Linie Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O), Ozon (O_3) sowie fluorhaltige Chlorkohlenwasser-

stoffverbindungen (FCKWs) und Schwefelhexafluorid (SF_6). Das überwiegend natürlich vorkommende „Treibhausgas“ Wasserdampf trägt zwar mit ca. 60% am meisten zum Treibhauseffekt bei; allerdings wird seine Konzentration v.a. durch die Temperatur und nicht durch Emissionen bestimmt. Darüber hinaus besitzt es im Gegensatz zu den meisten anderen Treibhausgasen (THG) eine kurze Lebensdauer (Tabelle 1). Auf Grund des überwiegend langsamen Abbaus der THG in der Stratosphäre wird sich ihr Einfluss noch in ferner Zukunft auswirken, was die Notwendigkeit zu Anpassungsmaßnahmen als komplementäre Strategie zur Minderung des THG-Ausstoßes deutlich macht.

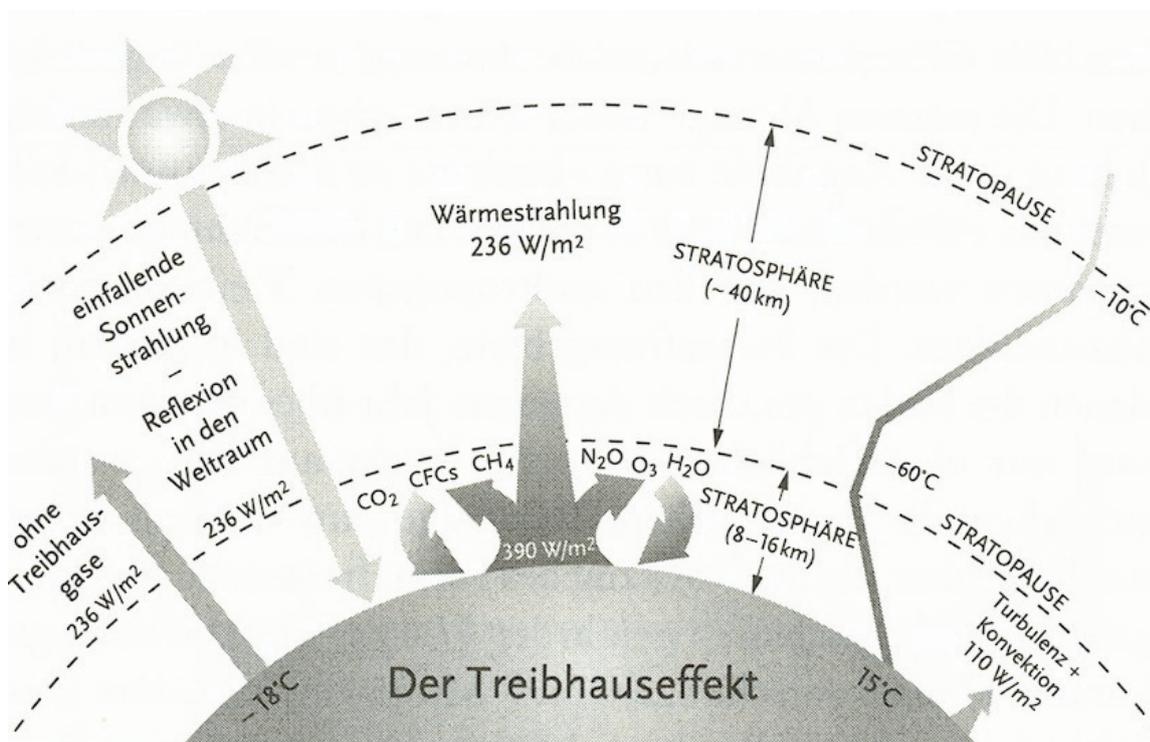


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Treibhauseffektes. Ohne ihn betrüge die Oberflächentemperatur der Erde ca. -18°C . Aufgrund des Treibhauseffektes beträgt die Temperatur dagegen ca. $+15^\circ\text{C}$ (Quelle: Latif, 2005a).

Tabelle 1: Lebensdauer, Konzentrationszunahme und das Global Warming Potential (GWP) ausgewählter Treibhausgase (Quelle: IPCC, 2001a und 2007a)

Treibhausgas	Lebensdauer (Jahre)	Vorindustrielle Konzentration	Aktuelle (2005) Konzentration	GWP
CO ₂	Variabel	< 280 ppm	379 ppm	1
CH ₄	8,4-12	ca. 715 ppb	1774 ppb	23
N ₂ O	114-120	ca. 270 ppb	319 ppb	296
SF ₆	3200	?	5,6 ppt	22200

So hat der Gehalt von CO₂ in der Atmosphäre bei einem jährlichen Ausstoß von mehr als 30 Gigatonnen (IPCC, 2007a) von weniger als 280 ppm in vorindustrieller Zeit auf mittlerweile ca. 385 ppm zugenommen. Der größte Anteil der globalen, anthropogenen THG-Emissionen geht auf die Nutzung fossiler Brennstoffe zurück, die für ca. 80% der jährlichen CO₂-Emissionen seit Beginn des 21. Jahrhunderts verantwortlich ist (IPCC, 2007a). Die verbleibenden ca. 20% werden durch landwirtschaftliche Flächennutzung, insbesondere auch Landnutzungsänderungen wie die Rodung tropischer Regenwälder, verursacht.

Dagegen ist die Landwirtschaft zu einem beträchtlichen Anteil am Anstieg der Konzentrationen von CH₄ und N₂O (Tabelle 1) beteiligt, die zusammen etwa halb so stark zu der Erwärmung beitragen wie CO₂ (IPCC, 2007a). Innerhalb der EU 25 lag der Beitrag der Landwirtschaft zu den THG-Emissionen 2003 mit 10% (Eurostat-Pressestelle, 2005) deutlich unter dem globalen Mittel, in Deutschland mit 8,6% sogar noch darunter (UBA, 2005a). Insgesamt betragen in Deutschland die Treibhausgasemissionen 2004 ca. 980 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente, zusammengesetzt aus ca. 89% CO₂, 5% CH₄ und 6% N₂O; dabei war die Landwirtschaft an den

Emissionen von CH₄ zu ca. 48% und von N₂O zu ca. 80% beteiligt (BMELV, 2006a). Das Konzept der Kohlenstoff-Äquivalente trägt der Tatsache Rechnung, dass die Gase unterschiedliche Klimawirksamkeiten haben, das so genannte „*global warming potential*“ (GWP; Tabelle 1). Bei den FCKWs tritt neben den Treibhauseffekt – an dem sie in den 80er Jahren zusammen mit weiteren chemischen Produkten wie Halonen u.ä. zu ca. 20% beteiligt waren – der Abbau von O₃ in der Stratosphäre. Zusätzlich scheint der O₃-Abbau in der Stratosphäre durch die treibhausgasbedingte Erwärmung der Troposphäre, die eine Abkühlung in der Stratosphäre nach sich zieht, verschärft zu werden (Shindell *et al.*, 1998; Kirk-Davidoff *et al.*, 1999). Da der Gebrauch von FCKWs seit Inkrafttreten des Montrealer Protokolls zum Klimaschutz im Jahre 1989 deutlich rückläufig ist, deutet sich mittlerweile eine Erholung der stratosphärischen O₃-Gehalte⁴ an (Yang *et al.*, 2006).

Als Folge des Abbaus von O₃ in der Stratosphäre gelangt mehr energiereiche Strahlung – und zwar in erster Linie UV-B-

⁴ Allerdings werden die überwiegend in der Kühlmitelindustrie verwandten Treibstoffe in der Regel durch andere klimawirksame Gase ersetzt, wie z.B. teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe. Auch Brom, das die Ozonschicht stärker als Fluorverbindungen angreift, wird weiterhin in Pestiziden in der Landwirtschaft eingesetzt.

Strahlung – auf die Erdoberfläche. Besonders hoch ist die UV-Belastung im antarktischen Frühjahr in Abhängigkeit von Lage und Ausdehnung des „Ozonlochs“. Dabei muss bei einer O₃-Abnahme von 1% in etwa mit einem 2%igen Anstieg der UV-B-Strahlung gerechnet werden (Esser, 1994). Allerdings wird die energiereiche Strahlung noch durch weitere Faktoren beeinflusst: neben dem Einfallswinkel und der Höhe über dem Meeresspiegel wirken sich auch atmosphärische Veränderungen aus, wie z.B. durch Wolken, Luftverschmutzung, in erster Linie Aerosole, und troposphärische O₃-Konzentrationen.

Im Gegensatz zu den stratosphärischen O₃-Konzentrationen haben die troposphärischen O₃-Konzentrationen während des letzten Jahrhunderts in der Nördlichen Hemisphäre um ca. 35% zugenommen (IPCC, 2001a). Dabei hat sich bei tendenziell abnehmenden Spitzenkonzentrationen die Hintergrundbelastung insbesondere in ländlichen Gebieten im gleichen Zeitraum verdoppelt bis verdreifacht (Vingarzan, 2004). Für die nördliche Hemisphäre liegt der durchschnittliche Hintergrundwert zwischen 20 und 45 ppb (Vingarzan, 2004) und Werten zwischen 40 und 75 ppb während der Vegetationsperiode von April bis September (Bender und Weigel, 2002). Allerdings handelt es sich auf Grund der Vielzahl von Einflussfaktoren nicht um einen einheitlichen Wert, zumal die O₃-Konzentration auch von der Strahlungsintensität und damit der Höhe über dem Meeresspiegel abhängt.

Dagegen wirken *Aerosole*, Staubpartikel unterschiedlicher Größe (0,001-100 µm)

natürlichen und anthropogenen⁵ Ursprungs der Erwärmung entgegen, da sie das Reflexionsvermögen von Wolken durch die Bildung vieler winziger Tropfen anstelle weniger größerer fördern. Dieses Phänomen wird auch als „Globales Dimmen“ bezeichnet (z.B. Flannery, 2006). So wird z.B. der Rückgang der globalen Temperatur zwischen 1940 und 1970 unter anderem auf die hohe Luftverschmutzung, v.a. durch SO₂, zurückgeführt. Entsprechend berechneten ältere Klimamodelle unter der Annahme höherer Aerosolkonzentrationen auch noch einen geringeren Temperaturanstieg (IPCC, 1996; Schönwiese, 2003). Da Aerosole mit dem Regen ausgewaschen werden und damit nur eine kurze Verweildauer in der Atmosphäre haben, wirk(t)en sich Anstrengungen zur Luftreinhaltung, in erster Linie die Reduktion von Schwefelemissionen aus Kraftwerken und sonstigen Verbrennungsprozessen, unmittelbar auf die Klimaerwärmung aus. Allerdings ist das Ausmaß des Effektes der Aerosole auf die Globalstrahlung und insbesondere ihr Einfluss auf das Reflexions- und Niederschlagsverhalten von Wolken noch nicht genau bekannt (Memon, 2004).

Des Weiteren beeinflusst der Mensch auch durch *Landnutzungsänderungen*, v.a. Entwaldung und Flächenversiegelung aber auch Bewässerung das Klima, da sich unterschiedliche Landoberflächen durch ihre spezifische Strahlungsabsorption bzw. -reflexion, die so genannte *Albedo*, charakterisieren. Am deutlichsten wird dies in Großstädten, die im Vergleich zum Umland höhere Durchschnitts- und Maximal-

⁵ Ca. 25-50% aller Aerosole.

temperaturen aufweisen und i.a. auch über ein eigenes Niederschlagsregime verfügen. Selbst der mittlere jährliche Anstieg der Nettoprimärproduktion (NPP) von ca. 1% über Europa während der letzten zwei Jahrzehnte des 20ten Jahrhunderts führte zu einem veränderten Reflexionsverhalten der Vegetation und lässt sich als so genannter „Greening“-Effekt (Lucht *et al.*, 2002) von Satelliten aus beobachten (Nemani *et al.*, 2003). Als Ursache treten hier allerdings neben die Aufhebung wachstumslimitierender Faktoren durch die Klimaerwärmung auch die beträchtliche Stickstoffdeposition und Wiederaufforstung in Teilen Europas.

Neben den *anthropogen* verursachten Klimaveränderungen unterliegt das Klimasystem *natürlichen* Schwankungen, bedingt durch interne und externe Faktoren. Allerdings können diese Faktoren ohne Einbeziehen der anthropogenen Erhöhung der Treibhausgase nicht den seit der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts beobachteten Temperaturanstieg erklären. Zu den wichtigsten *externen* Faktoren werden periodische Veränderungen in der Sonnenaktivität sowie hochexplosiver, aschereicher Vulkanismus gerechnet. So unterliegt die Sonneneinstrahlung Schwankungen, die auch mit der Sonnenfleckenaktivität zusammenhängt. Gemittelt über die letzten 100 Jahre stieg die Solarkonstante⁶ an, und liegt heutzutage um ca. 0,25% höher. Nach Klimamodellberechnungen trug die verstärkte Sonnenaktivität mit ca. 0,2°C im letzten Jahrhundert jedoch nur zu einem Drittel zur globa-

len Erwärmung bei (Latif, 2005a). Der heftige Ausbruch des Pinatubo im Jahr 1991 brachte nur für eine kurze Zeit von ca. 2 Jahren eine geringfügige Abkühlung von wenigen Zentigraden.

Das wohl am besten erforschte Phänomen *interner* Klimavariabilität ist das *ENSO*-Phänomen – die so genannte „*El Niño Southern Oscillation*“ – die periodisch zu Wetterextremen auf der Südhalbkugel führt und mittlerweile recht gut vorhergesagt werden kann. Dagegen sind die Mechanismen, die die *Nordatlantische Oszillation* (NAO) bestimmen, noch weitgehend unbekannt. Die NAO bestimmt zu einem großen Teil die Klimavariabilität über dem Nordatlantik und Europas. Seit einigen Jahrzehnten ist ein Anstieg des NAO-Index⁷ zu beobachten, der stärkere und häufigere Winterstürme über dem Nordatlantik und mildere und feuchtere Winter in Europa mit sich bringt. Bisher ist noch nicht geklärt, ob dieser Anstieg natürlichen oder anthropogenen Ursprungs ist; wahrscheinlich sind beide Einflussfaktoren beteiligt (Gillett *et al.*, 2003).

2.2 Globale Klimaentwicklung

2.2.1 Beobachtungen seit 1900

Der Beginn der Klimaaufzeichnungen reicht in das Jahr 1856⁸ zurück. Eine Rekonstruktion älterer Klimate ermöglicht neben Literaturquellen die Auswertung konservierter Klimazeugen, wie z.B. von Baumringen, Fossilien und vor allem von

⁶ Bezeichnet die senkrecht auf eine Fläche außerhalb der Atmosphäre treffende Solarstrahlung $s = 1,37 \text{ kW/m}^2$.

⁷ Luftdruckdifferenz zwischen Messstationen auf den Azoren und auf Island.

⁸ Seit 1901 in Deutschland.

Eisbohrkernen, die den Verlauf der irdischen Temperaturen und die Zusammensetzung der Atmosphäre während der vergangenen 100 000 Jahre speichern.

Die globale *Durchschnittstemperatur* ist während des vergangenen Jahrhunderts um 0,6 bzw. 0,7°C ($\pm 0,2^\circ\text{C}$) angestiegen (IPCC, 2001a bzw. 2007a), wobei sich Europa mit 0,95°C stärker erwärmt hat (EEA, 2004). Der Temperaturtrend weist dabei weltweit zwei Perioden stärkerer Erwärmung auf: zwischen 1910 und 1945 und insbesondere seit 1976 (Abbildung 2). So war die 1990er Dekade die wärmste im Beobachtungszeitraum seit 1850 und der Trend setzt sich in den ersten Jahren des 21. Jahrhunderts fort: 2005 war das wärmste Jahr seit Beginn der Klimaaufzeichnungen gefolgt von 1998, 2002 und 2003.

Dabei stieg die Erwärmung im Winterhalbjahr mit durchschnittlich 1,1°C für Europa deutlicher an als im Sommer mit 0,7°C. Ferner betrug der Anstieg der Tagesminima ca. das Doppelte der Tagesmaxima (Walther et al, 2002), was eine Verringerung der täglichen Temperaturamplitude nach sich ziehen würde. Allerdings wurde dieser Trend durch die erweiterte Datengrundlage⁹ des vierten IPCC-Reports nicht bestätigt (IPCC, 2007a). Die höheren Nachttemperaturen werden v.a. durch die Zunahme des absoluten Wasserdampfes, der Bewölkung und der Niederschläge verursacht. Die stärkere Erwärmung während der kalten Jahreszeit geht mit einer Reduzierung extrem kalter Tem-

peraturen einher und weltweit einer Abnahme der Anzahl von Frosttagen. Besonders ausgeprägt ist die Erwärmung in den mittleren und vor allem in den hohen nördlichen Breiten, in denen die Ausdehnung von Schnee- und Meereisflächen abnimmt. Die hellen Eis- und Schneeflächen werden durch dunkleres Wasser und schneefreies Land ersetzt. Damit wird ein größerer Anteil der Sonneneinstrahlung in Wärme verwandelt, wodurch die Temperatur weiter ansteigt – der so genannte *Eisalbedo-Temperatur-Rückkopplungseffekt*.

Gleichzeitig hat die Anzahl von Sommertagen ($T > 25^\circ\text{C}$) und Hitzeperioden zugenommen, wenn auch in einem geringeren Ausmaß. Die Verringerung der durchschnittlichen Jahresamplitude der Temperatur lässt insgesamt auf eine geringere *Variabilität* der globalen interannuellen Temperaturwerte während der vergangenen Dekaden schließen. Damit kann die neben der Klimaerwärmung entscheidende Frage nach der Temperaturvariabilität und nach Extremwerten im globalen Maßstab bisher dahingehend beantwortet werden, dass sich die Temperaturkurve überwiegend um den Grad der Erwärmung nach rechts verschoben hat, wobei die Wahrscheinlichkeit extrem kalter Temperaturen ab-, die extrem heißer dagegen in geringfügigerem Ausmaß zugenommen hat.

In Übereinstimmung mit diesem Trend

- sind weltweit die Gletscher – von wenigen Ausnahmen abgesehen – auf dem Rückzug;
- hat sich die räumliche und zeitliche Ausdehnung der Schneedecke auf der nördlichen Halbkugel deutlich verringert;

⁹ Danach scheint die Tagesamplitude der Temperatur in den letzten Jahrzehnten – bei starken regionalen Abweichungen – weitgehend konstant geblieben zu sein.

- zeigt das arktische Eis eine dramatische Abnahme (IPCC, 2001a);
- ist der Meeresspiegel im weltweiten Durchschnitt zwischen 10 und 20 cm angestiegen;
- hat sich die Oberflächentemperatur der Ozeane erhöht, wenn auch in einem geringeren Ausmaß als die Temperatur der Landoberflächen; und
- führt die zunehmende CO₂-Speicherung im Meerwasser zu einer Absenkung seines pH-Wertes mit dramatischen Konsequenzen für zahlreiche Meeresbewohner, insbesondere für kalkausscheidende Wirbellose, die bei einer fortschreitenden Versauerung der Ozeane nicht mehr in der Lage sein werden, ihr Kalkgehäuse (z.B. viele Mollusken) oder ihr Kalkgerüst (z.B. Korallen und Bryozoen) zu bilden (WBGU, 2006).

Im Zuge der Industrialisierung haben weltweit insgesamt auch die *Niederschläge* zugenommen: die ansteigenden Temperaturen und der höhere troposphärische Wasserdampfgehalt beschleunigen den Wasserkreislauf und führen insbesondere in Regionen mit erhöhtem Niederschlag zu vermehrten und extremeren Niederschlagsereignissen. In anderen Regionen nimmt der Niederschlag dagegen ab bzw. Trockenperioden zu, wie z.B. in einigen ohnehin trockenen Regionen (IPCC, 2007a; Abbildung 3). Im Durchschnitt führt dabei eine Temperaturerwärmung um 1°C zu einem Anstieg des Niederschlags um 1% (Hadley Centre, 2003). Im Gegensatz zu dem relativ gleichmäßigen globalen Temperaturanstieg erfolgt die Veränderung des Niederschlages jedoch

innerhalb einer kleinräumigeren Skala. So hat z.B. in Nordeuropa der Niederschlag v.a. im Winter um 10-40% zugenommen, wohingegen in Südeuropa ca. 20% weniger Niederschlag fiel. Ferner haben in Südeuropa Niederschlagsextreme ab-, in Nord- und Mitteleuropa dagegen zugenommen (EEA, 2004).

Gesicherte Aussagen zu Veränderungen weiterer physikalischer Klimatelemente, wie z. B. dem Wind, sind auf Grund einer geringeren Datenbasis schwerer zu treffen. Die höheren Oberflächentemperaturen der Ozeane begünstigen das Entstehen von Hurrikanen; ob auch ihre Stärke auf Grund der Klimaerwärmung zunimmt wird noch kontrovers diskutiert (Michaels *et al.*, 2006; Elsner, 2006). Außerdem zeigen die Häufigkeit und Intensität sowohl tropischer als auch außertropischer Zyklone und schwerer Stürme keine klar erkennbaren Trends sondern Fluktuationen über mehrere Jahrzehnte. Darüber hinaus hat sich durch den Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen die Atmosphärenchemie verändert (s. Kapitel 2.1).

2.2.2 Zukunftsszenarien

Klima ist ein chaotisches System, das sich nur schwer vorhersagen lässt (Latif, 2005b). So hat noch heute die tägliche Wettervorhersage nur eine Gültigkeit von wenigen Tagen. Zur Abschätzung künftiger Klimaveränderungen wurden verschiedene Szenarien mit jeweils unterschiedlichen Annahmen zur Entwicklung der vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen entwickelt.

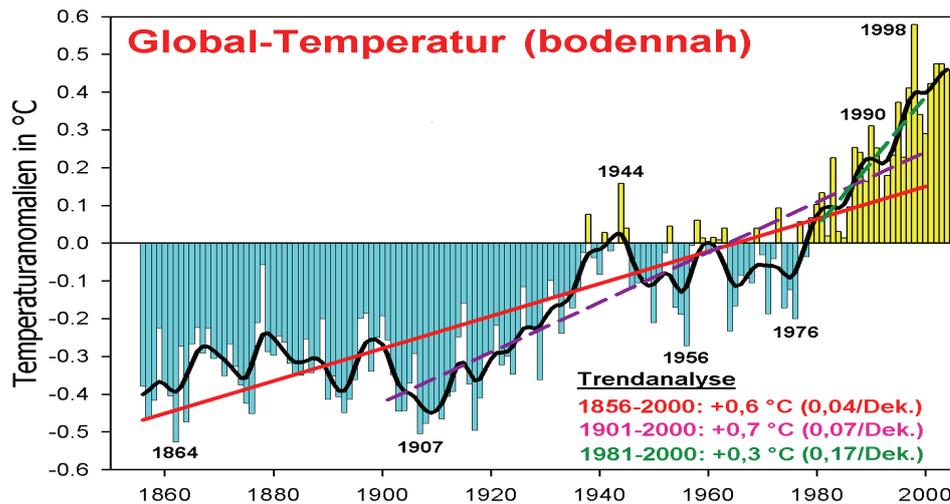


Abbildung 2: Jährliche Anomalien (Referenzintervall: 1961-1990) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1856-2004, basierend auf direkten Messungen (Land- und Ozeangebiete; Säulen), 10-jährige Glättung (schwarze Kurve) und lineare Trends (Quelle: Schönwiese und Janoschitz, 2005 unter Verwendung von Daten von Jones *et al.*, 1999).

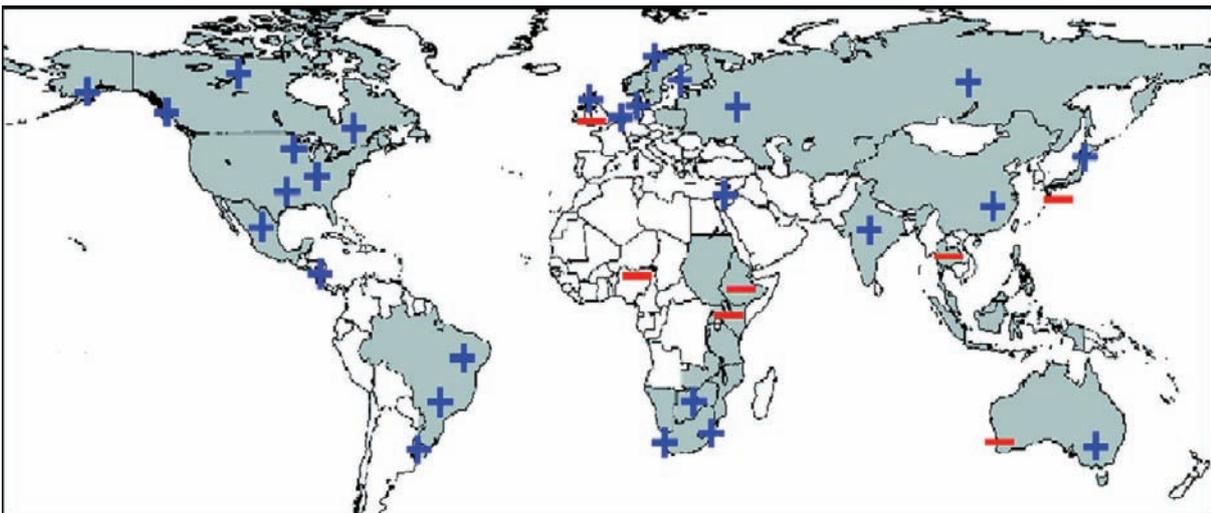


Abbildung 3: Beobachtete Veränderungen in den globalen Niederschlagsereignissen einschließlich Starkregenereignissen bzw. Trockenperioden (Quelle: IPCC, 2007a).

Sozioökonomische Randbedingungen für zukünftige Klimaänderungen

Vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der WMO wurde 1988 der „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC), d.h. der „Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen“, ins Leben gerufen. Das der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nati-

onen (UNFCCC) beigeordnete Gremium hat die Hauptaufgabe, Risiken des Klimawandels zu beurteilen und Vermeidungsstrategien zu entwickeln und dies in Statusberichten nieder zu legen. Der dritte Statusbericht, der so genannte „Third Assessment-Report“ (TAR) aus dem Jahr 2001 stellt die momentan noch dominierende Basis der politischen und wissen-

schaftlichen Diskussionen über die globale Erwärmung dar. Der vierte Bericht („*Forth Assessment Report*“, AR4) wird im Jahr 2007 vorliegen.

Den verschiedenen Szenarien künftiger Klimaveränderungen liegen unterschiedliche Randbedingungen – die so genannten SRES¹⁰-Storylines – zugrunde, die eine gewisse Bandbreite in der Abschätzung von Klimafolgen ermöglichen. Anstrengungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen durch Umweltschutz- bzw. Klimaschutzmaßnahmen, wie sie z.B. im Kyoto-Protokoll oder in der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen festgeschrieben sind, werden in diesen Szenarien nicht berücksichtigt. Haupteinflussfaktoren sind die Projektionen der zukünftigen Entwicklung der Bevölkerung, Wirtschaft, Technologien und des Energieverbrauches, der Landnutzung und des Umweltschutzes.

Dabei werden die *A-Szenarien* durch eine überwiegend ökonomische, die *B-Szenarien* dagegen von einer eher sozialen und umweltverträglichen Entwicklung geprägt. Die *Ziffer 1* steht für eine globale, die *Ziffer 2* für eine eher regionale Ausrichtung der zukünftigen globalen Entwicklung. Eine Einschränkung des SRES-Systems ist seine globale Ausrichtung ohne Richtlinien für eine Regionalisierung. Darüber hinaus hat es einen allgemeinen, qualitativen Charakter: wahrscheinliche Änderungen einzelner Sektoren, wie z.B. der Landwirtschaft, werden nicht erfasst (Rounsevell *et al.*, 2005). Im Einzelnen beschreibt das

– *A1 Szenarium* eine zukünftige Entwicklung geprägt durch ein sehr rasches wirtschaftliches globales Wachstum, das sein Maximum in der Mitte des 21sten Jahrhunderts erreicht und dann abnimmt, und einer raschen Einführung neuer und effizienter Technologien. Die Bevölkerungszahl erreicht bis Mitte dieses Jahrhunderts ihr Maximum und ist danach rückläufig. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die substantielle Reduktion regionaler Unterschiede in dem Pro-Kopf-Einkommen durch die Annäherung von Regionen und *Know-how* sowie zunehmende kulturelle und soziale Interaktionen. Für die Landwirtschaft wird eine Konzentration auf optimale Produktionsstandorte erwartet. Das *A1-Szenarium* wird darüber hinaus in drei Untergruppen eingeteilt, die Alternativen des technologischen Wandels auf dem Energiesektor aufzeigen:

- *A1f-Szenarium*, das überwiegend auf dem Verbrauch fossiler Energien beruht;
- *A1t-Szenarium* mit überwiegend nicht-fossilen Energiequellen; und
- *A1B-Szenarium*, das einen ausgewogenen Energiemix voraussetzt unter der Voraussetzung, dass alle Energiequellen einen ähnlichen technologischen Fortschritt erfahren;

– *A2-Szenarium* eine sehr heterogene Welt: entscheidendes Kriterium ist das Autarkiebestreben der einzelnen Regionen und das Bewahren lokaler

¹⁰ Special Report on Emission Scenarios (Nakićenović *et al.*, 2000).

Identitäten. Auswirkungen auf den landwirtschaftlichen Sektor ergeben sich durch regionalen Protektionismus aus Gründen der nationalen Versorgungssicherheit. Die Geburtenraten der verschiedenen Regionen gleichen sich nur sehr langsam an, was zu einer kontinuierlich wachsenden Weltbevölkerung führt. Die ökonomische Entwicklung erfolgt in erster Linie in den Regionen und das Pro-Kopf-Einkommen und der technologische Fortschritt wachsen langsamer und ungleichmäßiger als in den anderen Szenarien;

- *B1-Szenarium* eine homogene Welt mit der gleichen globalen Bevölkerungsentwicklung wie unter A1 skizziert, allerdings mit einem raschen Wandel der ökonomischen Strukturen hin zu einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft gekennzeichnet durch eine Verringerung des Ressourcenverbrauches und die Einführung sauberer und effizienter Technologien. Der Schwerpunkt liegt in globalen Lösungen für ökonomische, soziale und ökologische Nachhaltigkeit einschließlich verbesserter Chancengleichheit, allerdings ohne zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen. Dementsprechend wird sich die Produktion landwirtschaftlicher Kulturen, wie unter A1, auf produktive Standorte konzentrieren unter Beibehalten einer extensiven Grünlandnutzung;
- *B2-Szenarium* eine Weltgemeinschaft mit lokalen Lösungen auf ökonomische, soziale und ökologische Fragen. Es zeichnet sich durch eine kontinu-

ierlich aber langsamer als unter A2 wachsende Weltbevölkerung aus, ein mittleres Niveau der wirtschaftlichen Entwicklung und ein langsamerer aber differenzierterer technologischer Wandel als in den *B1-* oder *A1-Szenarien*. Während das *B2-Szenarium* sich auch am Umweltschutz und der Chancengleichheit orientiert, liegen die Lösungen im lokalen bzw. regionalen Bereich. Für die Landwirtschaft wird eine zunehmende Extensivierung, bzw. ein zunehmend organischer Anbau sowie eine gesteigerte Produktion von Biomasse erwartet mit insgesamt geringen Änderungen in der Flächennutzung;

- *IS 92a-Szenarium* eine Entwicklung, die weitgehend mit “*business as usual*” bezeichnet werden kann. Es handelt sich um ein älteres Szenarium, das aus Gründen der Vergleichbarkeit älterer und neuerer Klimasimulationen weiterhin berücksichtigt wird.

Darüber hinaus existieren weitere Klimaszenarien, die durch große Industrieunternehmen, wie z.B. Shell, bzw. Wirtschafts- oder Energieinstitutionen, wie z.B. die Internationale Energiebehörde (IEA), etc. erstellt werden.

Für die Abschätzung künftiger Klimaveränderungen ist die Verwendung Globaler Zirkulationsmodelle (*Global Circulation Model*, GCM) Standard der heutigen weltweiten Klimaforschung. Diese haben in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte gemacht und beziehen zunehmend komplexere Faktoren in die Simulationsberechnungen mit ein (Southworth, 2002). Darüber hinaus kann die aktuelle Genera-

tion an globalen Zirkulationsmodellen nicht nur die Klimaveränderungen in Bezug auf einen definierten Zeitpunkt in der Zukunft, i.a. bei Erreichen der doppelten CO₂-Konzentration¹¹ (*equilibrium GCM*), simulieren, sondern auch die progressiven Veränderungen, was man als *transiente* Klimamodelle bezeichnet.

Die zwei Hauptkomponenten der so genannten gekoppelten GCMs sind im Allgemeinen ein Atmosphären- und Landoberflächenmodell sowie ein Ozeanmodell, erweitert um die durch die verschiedenen IPCC-Szenarien vorgegebenen Konzentrationen an Treibhausgasen und – in Abhängigkeit vom Modell – auch an Aerosolen, den Kohlenstoffkreislauf, die dynamische Vegetation und die Atmosphärenchemie (IPCC, 2001a). Der Test von Klimamodellen erfolgt in der Regel in mehreren Stufen: zunächst werden die einzelnen Modellkomponenten entwickelt und optimiert; in einem zweiten Schritt werden die gekoppelten Modelle in Simulationen über mehrere Jahrhunderte getestet. In dem nächsten, entscheidenden Schritt wird geprüft, ob das Modell in der Lage ist, bei Vorgabe des beobachteten Antriebes – Treibhausgase, Aerosole, Sonneneinstrahlung, Vulkaneruptionen, etc. – den beobachteten Klimatrend des 20-sten Jahrhunderts zu reproduzieren.

Ein wichtiger Aspekt bei der Modellierung ist die temperaturabhängige und damit reversible Speicherung von ca. der Hälfte der bisherigen CO₂-Emissionen in den Ozeanen und der Landoberfläche, v.a. Boden und Vegetation, die somit nicht in eine

äquivalente Temperaturerhöhung umgesetzt wurde. Gleichzeitig wurden auch ca. 80% der bisher produzierten Wärme in den Ozeanen gespeichert (IPCC, 2007a). So gehen jüngste Klimaszenarien (Clausen *et al.*, 2006) auf Grund einer geringeren CO₂-Festlegung bis hin zu einer zunehmenden CO₂-Freisetzung aus Ozeanen und organischem Material mit ansteigender Temperatur von einem wesentlich stärkeren Rückkopplungseffekt des Treibhauseffektes als ältere Szenarien aus. Dies könnte dazu führen, dass der Anstieg der globalen Temperaturen um 15% bis 78% nach oben korrigiert werden muss. Der hohe CO₂-Anstieg in der Atmosphäre innerhalb der letzten Jahre könnte bereits ein erster Hinweis darauf sein, dass die Biosphäre in Folge der 2002/03-Temperaturanomale weniger CO₂ aufnimmt (Knorr *et al.*, 2007).

Auch in Bezug auf ihre räumliche Auflösung wurden die GCMs der weltweit führenden Klimarechenzentren kontinuierlich weiterentwickelt, so dass mittlerweile Auflösungen von weniger als 2° erreicht werden. Dies entspricht einem Gitterabstand von ca. 200 km am Äquator und entsprechend weniger in höheren Breiten. Das weltweit führende globale Klimamodell ist wohl das HadCM (4) des „*Hadley Centers*“ in England (Flannery, 2006). Ebenfalls sehr leistungsfähig und renommiert sind das amerikanische Modell NCAR CSM des „*National Center for Atmospheric Research*“ sowie ECHAM (5) des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg gefolgt von dem kanadischen Modell CGM (2) und dem Australischen Modell CSIRO.

¹¹ doppelte CO₂-Konzentration (560 ppm) im Vergleich zum vorindustriellen Wert (280 ppm)

Diese Modelle unterscheiden sich nicht nur in technischen Details, wie z.B. einer unterschiedlichen Auflösung, sondern auch in ihren Projektionen, insbesondere in Bezug auf Niederschläge und Temperaturverhalten. So reicht die Temperaturerhöhung bei Erreichen der doppelten CO₂-Konzentration im Vergleich zu vorindustriellen Werten (*equilibrium temperature* für [CO₂] = 560 ppm) z.B. von 2°C für das NCAR CSM Modell bis zu 4.3°C für das australische, in diesem Sinne extremere Modell (Southworth, 2002). Diese Unsicherheiten in Bezug auf zukünftige Klimaszenarien lassen es empfehlenswert erscheinen, nicht nur verschiedene Emissionsszenarien sondern auch verschiedene Klimamodelle für die Abschätzung von Folgen der Klimaerwärmung zu verwenden.

Darüber hinaus unterliegt die Analyse von Klimaänderungen mit Hilfe von GCMs weiteren Einschränkungen auf Grund der Schwierigkeiten der Modelle bei der Simulation von Wolken und damit auch von Niederschlag, Extremereignissen, Ozeanströmungen sowie den Interaktionen zwischen Vegetation und Boden, die häufig nicht in den Modellen enthalten sind. Für eine kleinräumige Betrachtung insbesondere stark gegliederter Landoberflächen ist ihre Auflösung nicht ausreichend und erfordert die Entwicklung von Regionalmodellen. Ferner erstellen GCMs keine unmittelbaren Projektionen von Wetterlagen.

Trotz der dargelegten Unsicherheiten gibt es mittlerweile eine weitgehende Übereinstimmung der verschiedenen Modelle bezüglich der Tendenz der projizierten Klimaveränderungen; in ihrer Größenordnung

unterscheiden sie sich allerdings z.T. noch erheblich (mündliche Mitteilung Jacob, Workshop des UBA zu künftigen Klimaänderungen 04.2006). So wird in Abhängigkeit von dem zugrunde gelegten Emissionsszenarium¹² sowie dem angewandten Klimamodell bis zum Jahr 2100

- ein Anstieg der CO₂-Konzentration von heute ca. 385 ppm auf Werte zwischen 540 und 970 ppm bzw. ein Anstieg der CO₂-Äquivalentkonzentration von heute ca. 550 ppm auf 650 bis 1215 ppm prognostiziert (IPCC, 2001a und 2007a);
- eine weitere globale Erwärmung um 1,4 bis 5,8°C erfolgen; in Europa sogar um 2,0 bis 6,3°C (IPCC, 2001a);
- die wahrscheinlichste Temperaturzunahme 3°C betragen, bei 1,8°C für das B1-Szenarium und 4,0°C für das A1f1-Szenarium (Abbildung 4);
- neben der globalen mittleren Temperaturerwärmung – dem aktuellen Trend entsprechend – eine stärkere Erwärmung der Landmassen der höheren nördlichen Breiten insbesondere im Winter erwartet¹³, während sich die Landmassen der Südhalbkugel unterdurchschnittlich erwärmen;

¹² Während früheren Klimasimulationen häufig die Szenarien A1, A2 und B2 zugrunde gelegt wurden, liegt der Schwerpunkt mittlerweile auf A1B, A2 und B1.

¹³ In den nördlichen Breiten erfolgt die Klimaerwärmung besonders schnell, da durch die Neigung der Erdoberfläche im Sommer die sinkende Albedo bei weniger Schnee zu einer extrem verstärkten Aufnahme von Energie führt.

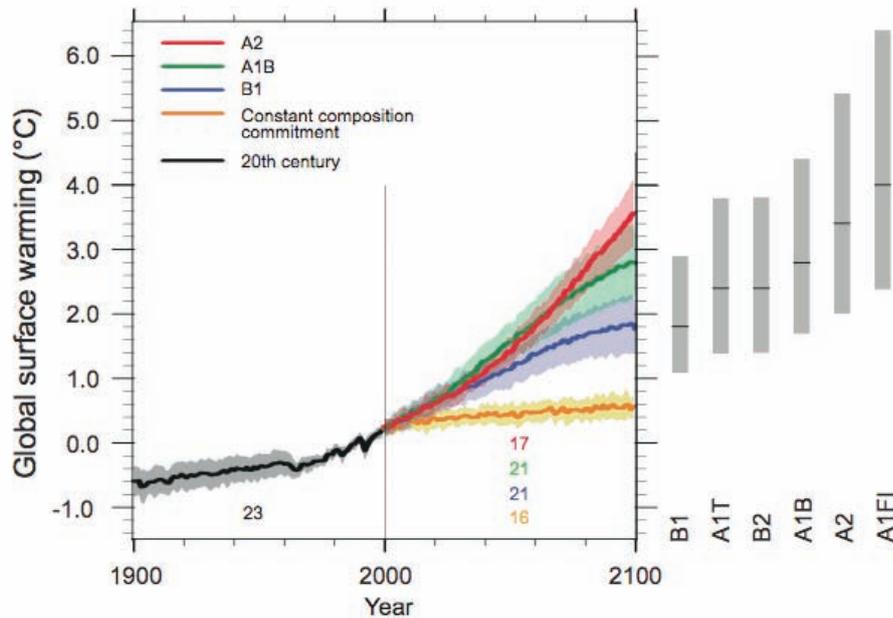
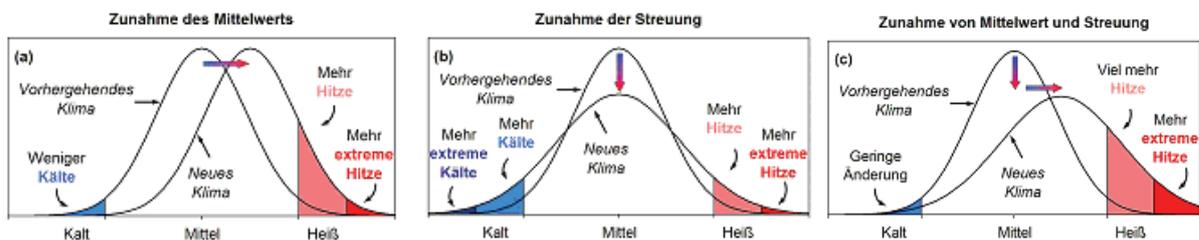


Abbildung 4: Prognostizierter globaler Temperaturanstieg entsprechend der verschiedenen Emissions-szenarien. Die farbigen Nummern geben die Zahl der Simulationsläufe an, der schattierte Bereich die Standardabweichung vom Mittelwert (durchgezogene Linie) (Quelle: IPCC, 2007a).

Extremes Klima? → Häufigkeitsanalyse



Hier gezeigt am Beispiel der Normalverteilung (NV, Gauß-Verteilung)

Abbildung 5: Schematisierte Darstellung der Zunahme von Temperaturmaxima in Folge des Zusammenspiels der Zunahme von Durchschnittstemperaturen und zunehmender Klimavariabilität (Streuung) (nach IPCC, 2001a).

- weiterhin die Wahrscheinlichkeit für höhere Maximaltemperaturen und mehr heiße Tage sowie höhere Minimumtemperaturen und weniger Frosttage stark zunehmen;
- Extremwerte der Temperaturmaxima aller Wahrscheinlichkeit nach sowohl infolge des generellen Temperaturanstieges zunehmen als auch durch die

Zunahme der Temperaturvariabilität (s. Abbildung 5).

Neueste Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass sich die tatsächliche Entwicklung wohl eher im oberen Bereich dieser Schätzung abspielen wird und auf Grund von positiven Rückkopplungsmechanismen gar eine Erwärmung um bis zu 7,7°C möglich ist (Claussen *et al.*, 2006). So übersteigt der aktuelle Anstieg der

CO₂-Emissionen sogar den in dem A1f1 Zukunftsszenarium prognostizierten: betrug die Zunahme der CO₂-Emissionen in den 90er Jahren noch ca. 1% pro Jahr, so erreichte sie zu Beginn des 21ten Jahrhunderts bereits über 3% (Spiegel-online, 22.05.07). Damit erhöht sich u.a. die Gefahr, dass bei Auftauen der Permafrostböden in nördlichen Breiten gewaltige Mengen des darin gespeicherten Methans freigesetzt werden – ein weiterer Kipppunkt des Klimasystems. Neben der absoluten Erwärmung ist auch die Geschwindigkeit von entscheidender Bedeutung: sollte die Rate mehr als 0,1-0,2°C pro Jahrzehnt überschreiten, wird die Anpassungskapazität insbesondere sensibler Ökosysteme überschritten und die Gefahr chaotischer Reaktionen bzw. signifikanter Schäden steigt (Hare, 2003).

Weitere Klimaveränderungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts basieren auf (IPCC, 2007a)

- der Erhöhung der Verdunstung und der Beschleunigung des hydrologischen Kreislaufes¹⁴ auf Grund des Temperaturanstiegs: so nimmt weltweit die Intensität der Niederschläge und die damit verbundene Hochwassergefahr zu. Wahrscheinlich führt die Intensivierung des Wasserkreislaufes bei höheren Temperaturen auch zu einer stärkeren Wettervariabilität;
- dabei nimmt in feuchten Klimazonen, wie vor allem den Tropen sowie mittleren und hohen geographischen Brei-

ten, die Niederschlagsmenge eher weiter zu, in trockenen Klimazonen, in erster Linie den Subtropen, dagegen ab;

- durch die Zunahme der Dauer von Trockenperioden weltweit – insbesondere im Mittelmeergebiet, in Südafrika und Australien – vergrößern sich die Gegensätze zwischen feuchten und trockenen Klimazonen, aber auch die Niederschlagsextreme an einem Ort;
- in Mitteleuropa nimmt die Intensität der Winterstürme zu, im Mittelmeergebiet die Sturmintensität dagegen ab;
- durch die Erwärmung des Oberflächenwassers der Ozeane wird auch eine Zunahme der Intensität von tropischen Zyklonen, wie Hurrikanen und Taifunen wahrscheinlich;
- durch die Erwärmung nimmt in Europa die winterliche Schneemenge bis Ende des Jahrhunderts um 80-90% ab, in den Hochlagen der Alpen und der norwegischen Gebirge um 30-50%;
- die Arktis wird durch die ausgeprägte Erwärmung bis 2100 im Sommer wahrscheinlich eisfrei sein;
- auf Grund der thermischen Ausdehnung der Ozeane steigt der Meeresspiegel um weitere 30 bis 80 cm an; hinzu kommen weitere ca. 15 cm durch die Schmelze des Grönlandeeises, während verstärkter Schneefall in der Antarktis den globalen Meeresspiegel um ca. 5 cm absenkt.

¹⁴ U.a. führt die Zunahme des Wasserdampfes zu einem verstärkten Wasserdampftransport von den Ozeanen zu den Kontinenten und damit einer Zunahme des Niederschlages über Landgebieten (Latif, 2005b).

Die Berücksichtigung aller SRES Emissions-Szenarien ergibt einen Meeresspiegelanstieg von bis zu 88 cm nach dem dritten IPCC-Bericht und von 19 bis 37 bzw. 26-59 cm für das Szenarium nach dem vierten, aktuellen IPCC-Bericht (IPCC, 2007a). Allerdings gehen kritische Stimmen auch davon aus, dass der letzte Bericht den Meeresspiegelanstieg unterschätze: nach Ansicht von Prof. Schellnhuber, Direktor des Potsdamer Instituts für Klimafolgenforschung, ist z.B. auch ein Anstieg des Meeresspiegels im Nordseebereich von zwei Metern möglich, was dramatische Konsequenzen für die Küstenregion impliziert (Spiegel-online, 02.02.2007a).

Sollten die großen Eispanzer Grönlands oder der Antarktis abschmelzen, wäre ein deutlich höherer Anstieg von ca. 7 bzw. über 60 m zu erwarten; allerdings wird die Frage nach der Stabilität der großen Eisschilde in der Klimaforschung noch kontrovers diskutiert (Latif, 2005b). Weiter verringern höhere Temperaturen und Niederschläge die Dichte des Oberflächenwassers im Nordatlantik und damit auch die *thermohaline* Zirkulation¹⁵. Die projizierte Abnahme von 25-30% hat aber keinen nennenswerten Einfluss auf das europäische Klima, das sich infolge der zunehmenden Treibhausgaskonzentrationen weiter erwärmt (IPCC, 2007a; MPI-M, 2006).

¹⁵ Die Thermohaline Zirkulation ist eine großräumige Zirkulation im Ozean, ausgelöst durch Unterschiede in Temperatur und Salzgehalt des Wassers. Im Nordatlantik besteht die thermohaline Zirkulation aus warmem, nordwärts fließendem Oberflächenwasser und kaltem, südwärts fließendem Tiefenwasser – daraus resultiert ein polwärts gerichteter Wärmetransport, der für das milde Klima in West- und Nordeuropa verantwortlich ist.

2.3 Klimaentwicklung in Deutschland

2.3.1 Beobachtungen seit 1900

Die *Jahresmitteltemperatur* hat in Deutschland von 1900 bis 2000 – ähnlich wie im europäischen Mittel – um ca. 0,8 bis 1,0°C zugenommen (Rapp, 2000; DWD, 2004). Im Unterschied zur globalen Entwicklung folgte einer stärkeren Erwärmung bis 1911 eine wechselhafte Periode. Nach den relativ warmen 40er Jahren folgte eine Phase neuerlicher Abkühlung, die Ende der 70er Jahre durch einen beträchtlichen Temperaturanstieg von 0,17°C pro Dekade (UBA, 2005b) abgelöst wurde, der bis heute anhält. Die 90er Jahre waren in Deutschland ebenso wie im weltweiten Durchschnitt die wärmste Dekade und die ersten Jahre des 21. Jahrhunderts folgen diesem Trend. Dabei variiert die Temperaturentwicklung regional mit einem überdurchschnittlichen Temperaturanstieg in Süd- und Südwestdeutschland (Zebisch *et al.*, 2005) mit einem Maximum von 1,5°C in den Alpen.

Bei Betrachtung der letzten 20 Jahre zeigt die Erwärmung darüber hinaus auch in Deutschland einen saisonalen Gang (Tabelle 2): die stärkste Erwärmung erfolgte mit 2,3°C im Winter, gefolgt von 1,3°C im Frühjahr, 0,7°C im Sommer und mit -0,1°C sogar einem negativen Temperaturtrend im Herbst. Dieser Trend wird u.a. mit einer Zunahme der Häufigkeit von winterlichen zonalen Wetterlagen in Zusammenhang gebracht, die milde ozeanische Luft nach Deutschland bringen (Günther, 2004).

Tabelle 2: Übersicht der beobachteten bodennahen Temperatur- und Niederschlagstrends in Deutschland (Quelle: Schönwiese und Janoschitz, 2005 unter Verwendung von Daten von Rapp, 2000 und DWD).

Klimaelement		Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur	1901-2000	+ 0,8°C	+ 1,0°C	+ 1,1°C	+ 0,8°C	+ 1,0°C
	1981-2000	+ 1,3°C	+ 0,7°C	- 0,1°C	+ 2,3°C	+ 1,1°C
Niederschlag	1901-2000	+ 13%	- 3 %	+ 9%	+ 19%	+ 9%
	1971-2000	+ 13%	+ 4%	+ 14%	+ 34%	+ 16%

Der *mittlere Niederschlag* nahm zwischen 1900 und 2000 und insbesondere seit den 70er Jahren in Deutschland zu, wobei regional und saisonal deutliche Unterschiede auftraten (Rapp, 2001). Den stärksten Effekt findet man im Winter, wo eine – besonders im Süden und Westen ausgeprägte – Zunahme von ca. 25% zu verzeichnen ist. Im Sommer nahmen die Niederschläge hingegen geringfügig – im Osten auch deutlicher – ab (Schönwiese, 2003). Damit ist das Klima aus dem Blickwinkel des veränderten Jahresganges des Niederschlags offenbar maritimer geworden. Da gerade im Sommer konvektive und somit relativ kleinräumige Niederschlagsereignisse dominieren, müssen diese Trends allerdings sehr vorsichtig interpretiert werden, da es möglich ist, dass ein abnehmender Niederschlagstrend durch häufigere extreme Starkniederschläge maskiert bzw. sogar im Vorzeichen verändert wird (Schönwiese, mündliche Mitteilung ZUFO-Umweltsymposium, Münster 2006).

Darüber hinaus führt das veränderte Niederschlagsverhalten zusammen mit den höheren Temperaturen zu einer geringeren Dauer der winterlichen Schneedecke: in Baden-Württemberg und Bayern nahm diese in Lagen unter 300 Metern zwischen 30 und 40% und in mittleren Lagen bis 800 m zwischen 10 und 20% ab. In höhe-

ren Lagen über 800 m sind auf Grund der vermehrten Niederschläge im Winter und ausreichend niedriger Temperaturen nur geringe Abnahmen, vereinzelt auch Zunahmen beobachtet worden (Günther, 2004).

Da die Zunahme des Niederschlags im letzten Jahrhundert bisher die Temperaturzunahme für Deutschland kompensiert hat, ist Deutschland mit Ausnahme der östlichen Bundesländer nach dem *Martonne'schen Index*¹⁶ überwiegend feuchter geworden. Betrachtet man nur die letzten drei Jahrzehnte, so zeigt sich allerdings eine Tendenz zur Sommertrockenheit bei gleichzeitig ansteigenden Temperaturen und eine Zunahme des Ariditätsindex im Jahresverlauf für weite Teile Deutschlands. Am kritischsten ist die Situation in Brandenburg und Umgebung, ohnehin die arideste Region Deutschlands (Rapp, 2001).

Wichtiger als die Veränderung von Durchschnittswerten sind die Veränderungen in dem Auftreten von *Extremereignissen* auf Grund ihres extrem hohen Schadenspotentials (MüRück 2000 bis 2005; UBA, 2006a). Allerdings lässt sich die bisherige Zunahme von Klimaextremen wie Hitze-

¹⁶ Martonne'scher Ariditätsindex berechnet aus mittlerem Jahresniederschlag und mittlerer Jahrestemperatur: $i = N \text{ [mm]} / (T \text{ [}^\circ\text{C]} + 10)$.

wellen, Starkniederschlägen oder Stürmen nur teilweise belegen (Stock, 2003).

Bei Betrachtung von *Temperaturextremen* lässt sich ein eindeutiger Trend für Hitzeextreme wie Hitzetage ($T > 30^{\circ}\text{C}$) oder Hitzewellen (Zeitintervalle von mehr als 3 Tagen, in denen die Tagesmaxima über einer, bezogen auf das stationsabhängige Temperaturniveau hohen oberen Schwelle liegen) feststellen: so hat sich die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von Hitzetagen in den Sommermonaten Juli und August in fast ganz Deutschland in den letzten hundert und insbesondere in den letzten zwanzig Jahren erhöht. Die

Wahrscheinlichkeit eines Hitzesommers wie im Jahr 2003 hat seit 1960/70 um mehr als das 20-fache zugenommen (Schönwiese *et al.*, 2004). Der Sommer 2003 war mit $3,4^{\circ}\text{C}$ über dem 30-jährigen Mittel der mit Abstand heißeste Sommer seit Beginn der Wetteraufzeichnung in Deutschland und Europa. Darüber hinaus zeichnete sich das Jahr 2003 durch eine außergewöhnlich lang anhaltende Trockenphase von Februar bis August aus.

Die bei den Tagesdaten ab ca. 1970 stark beschleunigte Wahrscheinlichkeitszunahme extrem warmer Tage führt auch zu einer Wahrscheinlichkeitsabnahme extrem kalter Tage und damit auch Frosttagen, vor allem in Süddeutschland. Darüber hinaus dominieren bei den Monatsdaten der Temperatur abgesehen vom Herbst in allen Jahreszeiten positive Trends im Mittelwert, überwiegend ohne Änderung der Varianz. Dementsprechend hat in gleichem Ausmaß die Eintrittswahrscheinlichkeit extrem warmer Monate zu- und kalter Monate abgenommen.

Beim *Niederschlag* hat die Wahrscheinlichkeit für Starkregenereignisse im Winter zugenommen (Jonas *et al.*, 2005). Da hierbei sowohl ein positiver Trend der Mittelwerte als auch der Varianz feststellbar ist, nimmt die Wahrscheinlichkeit für extrem niedrige Niederschlagsereignisse nicht im gleichen Ausmaß ab. Dagegen zeigt sich im Sommer eher eine Abnahme extrem hoher Niederschläge, was offenbar vorwiegend mit einer geringeren Streuung zusammenhängt. Ferner weist die Wahrscheinlichkeit extrem hoher Tagesniederschläge – und damit auch die Hochwassergefahr (KLIWA, 2004) – vor allem im Winter und Herbst eine zunehmende, im Sommer dagegen eher eine abnehmende Tendenz auf. Das Elbe-Hochwasser des Sommers 2002 ist demnach als ein nicht im Trend liegendes, seltenes Extremereignis anzusehen, das auf eine für Westeuropa untypische sommerliche Wetterlagenkonstellation – eine so genannte Vb-Wetterlage¹⁷ – zurückging (SMUL, 2005). Auf die Bedeutung der klassischen Wetterlagen für die Regionale Klimamodellierung wird im nächsten Kapitel eingegangen.

Die Analyse der *Winddaten*, d.h. der Häufigkeit und Intensität von Sturmböen, hat kaum zu systematisch interpretierbaren Ergebnissen geführt, was neben der großen räumlich-zeitlichen Variabilität vermutlich auch mit relativ großen Messfeh-

¹⁷ Die nach Van Bebber benannte Wetterlage transportiert warme, feuchte Luft aus dem Mittelmeergebiet auf der Ostseite der Alpen nach Mitteleuropa. Großflächiges Aufgleiten auf die in Mitteleuropa liegende Kaltluft mit ausdauernden und ergiebigen Niederschlägen kann Hochwassergefahr vor allem in Österreich sowie dem Einzugsgebiet von Elbe und Oder mit sich bringen.

lern zusammenhängt. Tendenziell hat die Wahrscheinlichkeit extrem hoher täglicher Maxima im Winter – abgesehen vom Küstenbereich – überwiegend zugenommen. So wurden signifikante Veränderungen der Dauer von Großwetterlagen im Winter nachgewiesen, die mit Weststürmen und starken Niederschlägen einhergehen. Im Sommer haben dagegen mit Ausnahme von Süddeutschland Stürme überwiegend abgenommen (Jonas *et al.*, 2005).

2.3.2 Zukunftsszenarien

Für Deutschland insgesamt sowie eine beträchtliche Anzahl an Bundesländern und einzelnen Naturräumen liegen Projektionen über zukünftige Klimaveränderungen (und ihre Auswirkungen auf wichtige gesellschaftliche Bereiche – inklusive die Landwirtschaft) vor. Eine Übersicht über die verschiedenen regionalen Klimastudien einschließlich der verwandten Methoden, insbesondere der regionalen Klimamodelle und Emissionsszenarien gibt Tabelle 3. Zur Vereinheitlichung der Datengrundlage und für eine zuverlässige Abschätzung der Folgen der Klimaveränderung für Deutschland wurden z.B. vom Umweltbundesamt detaillierte regionale Klimastudien (REMO, WETTREG, s.u.) in Auftrag gegeben, deren Ergebnisse als Planungsgrundlage für die entsprechenden Ministerien, Behörden, wissenschaftlichen Einrichtungen und sonstige Betroffene („Stakeholder“) dienen sollen und seit 2006/07 im Internet frei verfügbar sind.

Regionale Klimamodelle

Die globalen Klimamodelle (GCM) sind auf Grund ihrer geringen räumlichen Auflösung bisher nicht in der Lage, die Entwicklung des Klimas auf nationaler bzw. regionaler Ebene zuverlässig zu simulieren. Um Klimaprognosen in einer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung zu erhalten, werden verschiedene Methoden zum Herunterskalieren, dem so genannten „down-scaling“, angewandt. Dabei gilt als Faustregel, dass die betrachtete Skala mindestens das Vierfache des Rechengitterabstandes betragen muss (Graßl, mündliche Mitteilung Fachtagung Klimawandel und Klimafolgen in Hessen, 2006). Als Regionalisierungsansätze lassen sich die drei unten aufgeführten Methoden unterscheiden, die in der Regel Ergebnisse der globalen Modellsimulationen als Eingangsgrößen verwenden (SMUL, 2005; Zebisch *et al.*, 2005). Mögliche Fehlerquellen bzw. Unsicherheiten in den GCMs gehen somit im Allgemeinen in die Regionalmodelle ein. Darüber hinaus können die Abweichungen zwischen verschiedenen regionalen Klimamodellen weiter zunehmen, da bei der Betrachtung kleinerer räumlicher Einheiten zusätzliche Phänomene und Prozesse modelliert werden müssen (Rowell, 2006). Für die überwiegende Anzahl der Klimastudien in Deutschland wird dabei das globale Zirkulationsmodell ECHAM (3-5) des Hamburger Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) zu Grunde gelegt.

Tabelle 3: Regionale Klimastudien unter Einbeziehen der Landwirtschaft nach Bundesländern bzw. Naturräumen und für Deutschland gesamt.

Gebiet	Studie (Abkürzung)	Jahr	Autor/Hrsg.	IPCC-SRES-Szenarium	global circulation model (GCM)	Berücksichtigung des CO ₂ -Düngeeffekts ^{*)}	Zeithorizont	Downscaling
Bayern	Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen (BayFORKLIM)	1999	Bayerischer Klimaforschungsverbund	2xCO ₂	ECHAM3	nein	2050	Statistisch – dynamisch und explizit dynamisch
Baden-Württemberg	Verbundvorhaben Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung (KLARA)	2005	Potsdamer Klimafolgenforschung (PIK)	A1	ECHAM4-OPYC3	nein	2055	Statistisch (STAR)
Hessen	Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen (INKLIM 2012)	2005	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG)	B2	ECHAM4-OPYC3	nein	2020, 2100	Statistisch (Enke, Meteo-Research)
Sachsen	Klimawandel in Sachsen. Sachstand und Ausblick	2005	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL)	B2	ECHAM4-OPYC3	nein	2050	WEREX
Brandenburg	Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven (PIK-Report No. 83)	2003	Gerstengarbe <i>et al.</i>	A1B	ECHAM4-OPYC3	ja, Modell-Berechnung	2055	Statistisch
Märkisch-Oderland	Entwicklung eines integrierten Klimamanagements für Brandenburg	2005	Wiggering <i>et al.</i> (ZALF)	A1B	ECHAM4-OPYC3	ja, Modell-Berechnung	2055	Statistisch
Elbe	Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet (GLOWA Elbe)	2005	Wechsung <i>et al.</i>	A1, B2	ECHAM4-OPYC3	nein	2020-2050	Dynamisch (REMO), statistisch (STAR), statistisch-dynamisch
Unterweserregion	Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion (KLIMU)	2005	Schuchardt und Schirmer	IS92a	ECHAM4-OPYC3	nein	2050	Statistisch
Bundesrepublik Deutschland	Klimawandel in Deutschland.	2005	Zebisch <i>et al.</i>	A2 (A1, B1, B2)	HadCM3 (PCM, CSIRO2, CGCM2)	nein	2020, 2050, 2080	Statistisch

*) i.a. wurden keine Anpassungsmaßnahmen, wie Sorten- oder Bewirtschaftungsmaßnahmen berücksichtigt, genauso wenig wie geänderter Krankheits- und Schädlingsbefall

1. Dynamische Regionalmodelle

Das physikalisch-dynamische *Downscaling* bettet regionale Klimamodelle in die Gitterpunkte von Globalmodellen ein und stellt so atmosphärische Prozesse für das Untersuchungsgebiet in einer Auflösung von 10 bis 50 km dar („Nesten“). In Deutschland wird v.a. das Regionale Klimamodell REMO (Jacob und Podzun, 1997) verwandt, das auch vom MPI-Meteorologie Hamburg entwickelt wurde, bzw. kontinuierlich weiterentwickelt wird.

2. Statistisch-empirisches Downscaling

Dabei handelt es sich um rein statistische Verfahren, die einen Zusammenhang zwischen simulierten Klimavariablen auf der großräumigen Skala – z.B. abgeleitet aus GCMs – und regionalen Messreihen erstellen, wie z.B. nach Werner und Gerstengarbe (Werner und Gerstengarbe, 1997) des PIK.

3. Statistisch-dynamisches Downscaling (gemischte Methode)

Hier werden zwei Verfahren unterschieden: a) die Verwendung genereller Aussagen zu großskaligen Klimavariationen zur Simulation kleinskaligen Klimaverhaltens auf der Basis von Beobachtungsdaten unter Verwendung statistischer Verfahren; und b) das *Wetterlagen-Konzept*: hierbei wird ein hoch auflösendes dynamisches Modell für typische Wetterlagen berechnet oder – bei stark gegliederter Topographie – auch Anströmrichtungen der Luftmassen. Mit Hilfe dieser für typische Wetterlagen durchgeführten regionalen Modellsimulationen wird über die Häufigkeits-

verteilung der Wetterlagen eines Klimaszenarios das lokale Wetter simuliert. Am weitesten verbreitet ist das WETTREG – Modell der Firma CEC (Climate & Environment Consulting GmbH, Potsdam), die ebenso wie das MPI-M-Hamburg im Auftrag des UBA regionalisierte Klimaprojektionen für ganz Deutschland erstellte.

Die Ergebnisse der einzelnen Verfahren weisen unter Umständen eine erhebliche Bandbreite auf (KLIWA, 2005). Grundsätzlich haben statistische Methoden gegenüber dynamischen Modellen den Vorteil größerer Robustheit und geringerer Rechenzeiten und damit der Möglichkeit, mehrere Modellrechnungen pro Klimaszenarium zu realisieren. Sie übernehmen allerdings z. T. stärker Fehler bzw. Unsicherheiten aus den GCMs und beinhalten meist nur Mittelwerte von Klimaparametern. Auch Extremereignisse können mit den meisten statistischen Methoden nicht simuliert werden (Zebisch *et al.*, 2005). Ein weiteres Problem stellt die Interpolierbarkeit der Daten dar, die an Klimamessstationen gebunden sind. Dagegen können dynamische Klimamodelle auch komplexe Wetterphänomene darstellen, wie Wind und ansatzweise Extremereignisse. Sie bringen insbesondere in Gebieten mit stark gegliederter Topographie, sich ändernden Oberflächeneigenschaften und Landnutzung Vorteile. Sie sind allerdings schwer zu kalibrieren und sehr rechenaufwändig, was Simulationen in der Regel auf einen Modelllauf beschränkt. Auf Grund dieser Einschränkung erlauben sie keine Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der simulierten Klimaveränderungen. Für eine umfassende Abschätzung der Folgen von Klimaverän-

derungen ist es deshalb empfehlenswert, mehrere Methoden einzusetzen, wie z.B. in dem europäischen Forschungsprojekt PRUDENCE¹⁸, in dem mit Hilfe von verschiedenen Ensembleläufen die Wahrscheinlichkeit von Klimaveränderungen untersucht wurde.

Veränderung mittlerer Temperaturwerte

Bei zu Grunde legen des globalen Klimamodells ECHAM 5 und des (gemäßigten) A1B-Szenariums wird die Temperatur in Deutschland im Mittel – sowohl nach REMO – als auch WETTREG-Simulationen – zum Ende des 21. Jahrhunderts ca. 2,5-3,5°C höher liegen im Vergleich zur Referenzperiode von 1961 bis 1990 (UBA, 2006a und b). Modellläufe mit anderen GCMs liegen mit einer Erwärmung von 1,6 bis 3,8°C bis zum Jahr 2080 unter Berücksichtigung verschiedener Emissionsszenarien in einer ähnlichen Größenordnung (Zebisch *et al.*, 2005). Dem bisherigen Trend entsprechend, wird die Erwärmung regional und saisonal unterschiedlich stark ausgeprägt sein: während weiterhin generell die stärkste Erwärmung im Winter erwartet wird, unterscheiden sich die regionalen Klimamodelle in ihren jeweiligen Projektionen: so berechnet das REMO-Modell die stärkste Erwärmung für den Süden bzw. Südwesten mit bis zu 4°C – im Alpenraum auch bis zu über 5°C – über dem Referenzwert. Dagegen fällt nach der WETTREG-

Simulation bei einer insgesamt deutlich geringeren Erwärmung die regionale Temperaturerhöhung am stärksten für Norddeutschland aus (Abbildung 6).

Auch der Sommer dürfte in Zukunft eine stärkere Erwärmung zeigen, da sich das Azorenhoch mit seiner warmen und trockenen Luft ab ca. Mai stärker nach Nordosten ausdehnt (Jacob, mündliche Mitteilung; Workshop des UBA zu künftigen Klimaveränderungen, 04. 2006). Allerdings unterscheiden sich hierin die beiden regionalen Klimamodelle mit deutlich geringeren Sommertemperaturen gegen Ende des 21. Jahrhunderts bei WETTREG. Ältere regionale Klimasimulationen hatten sogar eine Temperaturzunahme von 6°C bis Mitte des 21. Jahrhunderts für den Bodenseeraum im Sommer berechnet (BayFORKLIM (Bayerischer Klimaforschungsverbund, 1999)). Der Anstieg der Jahresmitteltemperatur bewirkt ferner einen weiteren Rückgang von Frosttagen und eine Zunahme von Hitzetagen einschließlich „Tropennächten“, d.h. Nächten mit Temperaturen oberhalb von 20°C.

Veränderung der Niederschläge

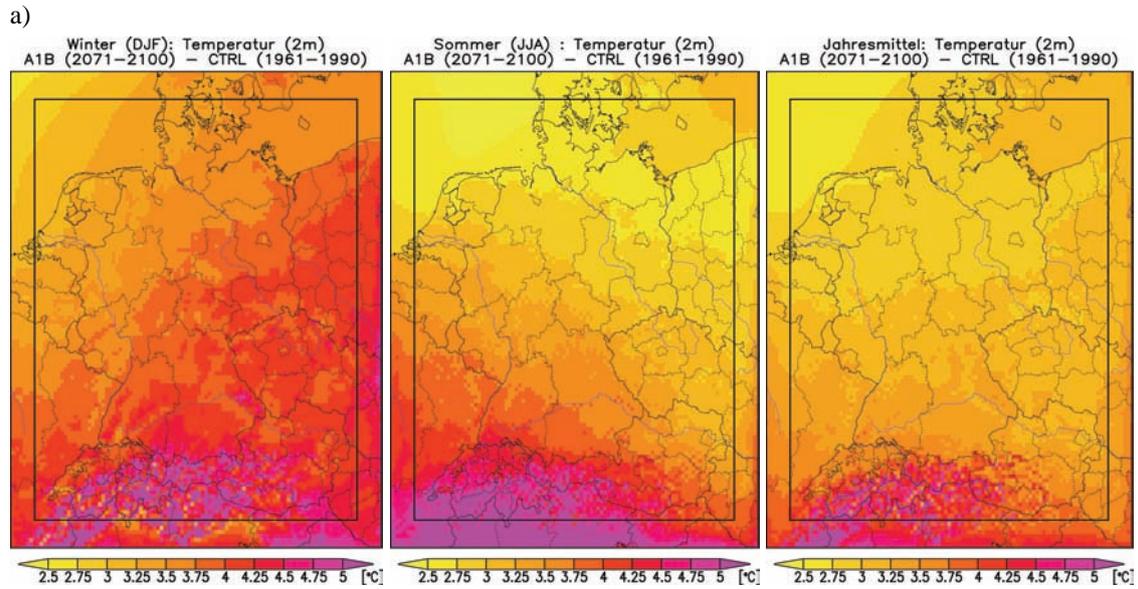
Bei insgesamt in etwa gleich bleibenden bzw. leicht zunehmenden Niederschlagsmengen zeigen die meisten Szenarien (REMO, WETTREG, etc.) – dem bisherigen Trend folgend – eine Verschiebung der Niederschläge in den Winter, wobei diese bei den emissionsstärkeren Szenarien A1 und A2 stärker als bei den umweltorientierten B1 und B2-Szenarien ausfällt (Zebisch *et al.*, 2005). Dabei gehen die Sommerniederschläge bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit bis zu 30% be-

¹⁸ Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects: Europa-weit durchgeführtes Forschungsprojekt zur Verbesserung der regionalen Klimamodellierung in Hinblick auf ihre Verwendung für die Klimaanpassung und –mitigation.

sonders stark im Süden und Südwesten sowie im Nordosten bzw. in den zentralen Gebieten Ost-Deutschlands zurück (Abbildung 7). Dagegen könnten die Niederschläge im Winter in ganz Deutschland zunehmen. Insbesondere in den Mittelgebirgen Süd- und Südwest-Deutschlands wird mit einer Zunahme von über 30% gerechnet. Im Schwarzwald könnten die Niederschläge auf der Westseite etwas abnehmen auf der Ostseite dagegen zunehmen auf Grund vermehrter Ostwind-Wetterlagen mit hoher Luftfeuchte (Jacob, 2006). Darüber hinaus lassen gleichzeitig steigende Wintertemperaturen den Niederschlag in Zukunft häufiger als Regen denn als Schnee fallen. Allerdings sind die Modellaussagen in Bezug auf die Höhe von Niederschlagsänderungen mit größeren Unsicherheiten als für Temperaturmittelwerte behaftet – wie auch aus den Unterschieden zwischen WETTREG- und REMO-Simulationen ersichtlich (s. Abbildung 7). Immerhin folgen mittlerweile die meisten Klimasimulationen dem gleichen Trend (Jacob, 2006).

Veränderungen im Auftreten von Extremereignissen

Noch größeren Unsicherheiten unterliegen die Projektionen von Extremereignissen, die erst Ende 2007 vollständig durch das MPI-M- und CEC-Team abgeschlossen sein werden (UBA, 2006b). Generell ist mit einer Zunahme auf Grund der höheren Energie in der Atmosphäre zu rechnen. Eine Zunahme der Häufigkeit von Hitzeperioden und eine Abnahme der Zahl von Frosttagen gelten als relativ gesichert. Nach Schär *et al.* (2004) wird sich die Temperaturvariabilität in Europa, mit Schwerpunkt auf Zentral- und Ost-Europa, um 100% erhöhen: Sommer wie 2003 könnten bis zum Ende des Jahrhunderts dann alle 2 Jahre auftreten. Weisheimer und Palmer (2005) berechnen für Mitteleuropa bis Ende 2100 gar Wahrscheinlichkeiten extrem heißer Sommer von bis zu 80%. Auch die Zunahme der Intensität von Starkniederschlägen – vor allem im Winter, in (Süd-) Westdeutschland allerdings auch im Sommer – ist ebenso wahrscheinlich; zudem sind häufigere Stürme möglich (Jonas *et al.*, 2005; PIK, 2005).



b)

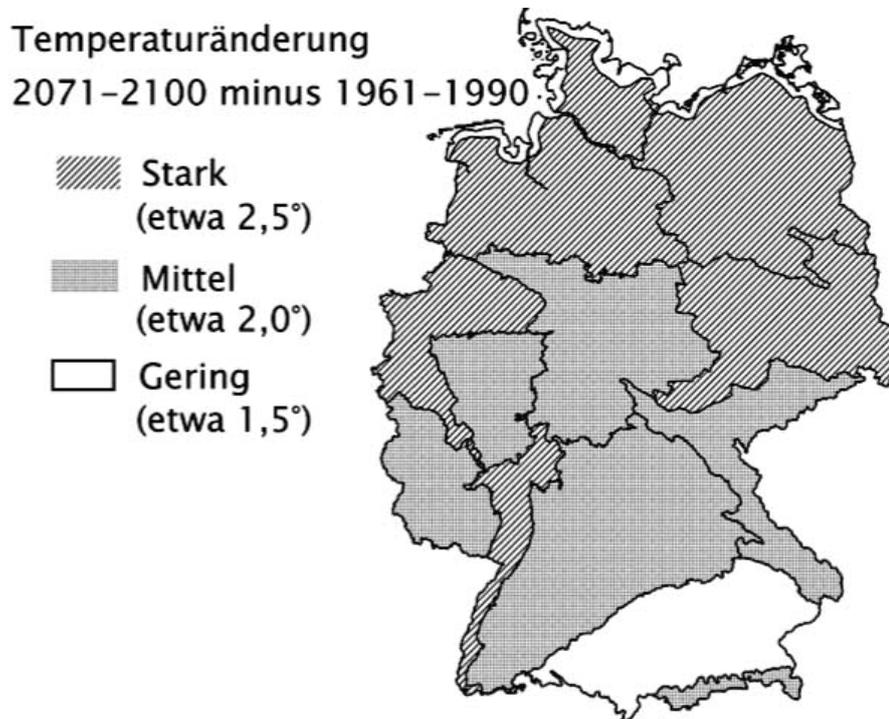
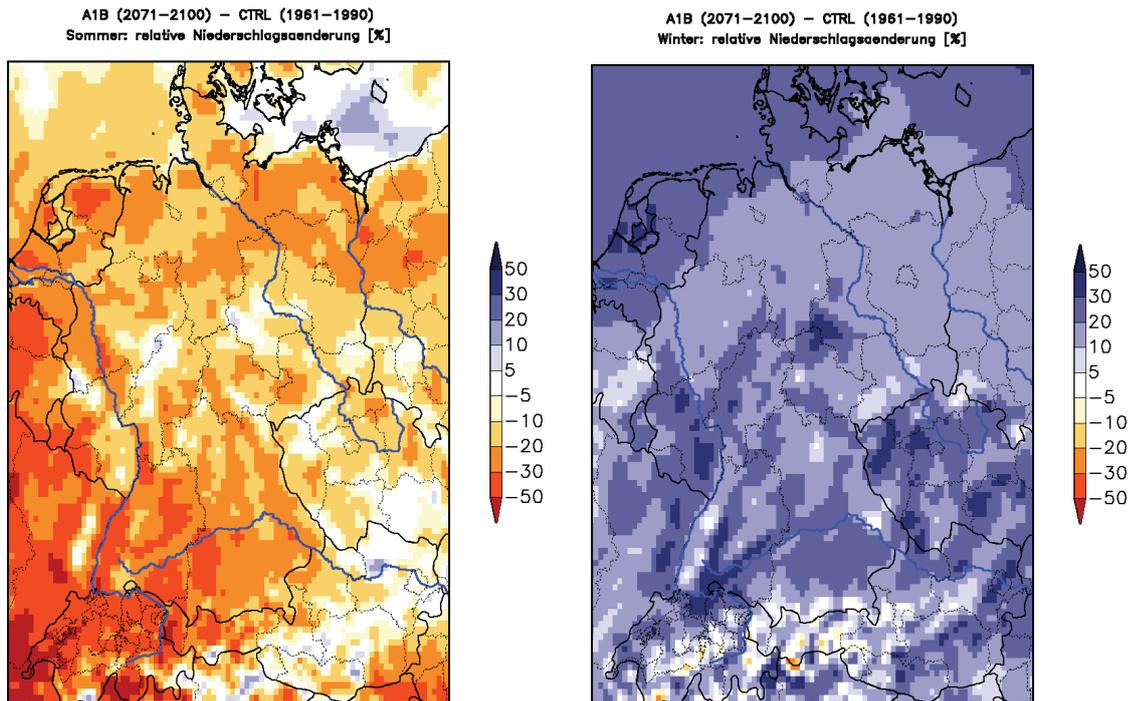


Abbildung 6: Die aktuell mit dem regionalen Klimamodell REMO projizierten regionalen Temperaturerhöhungen für verschiedene Jahreszeiten (a) (Quelle: MPI-M). Im Vergleich dazu (b) die WETTREG-Temperatursimulationen (Quelle: Spiegel-online).

a)



b)

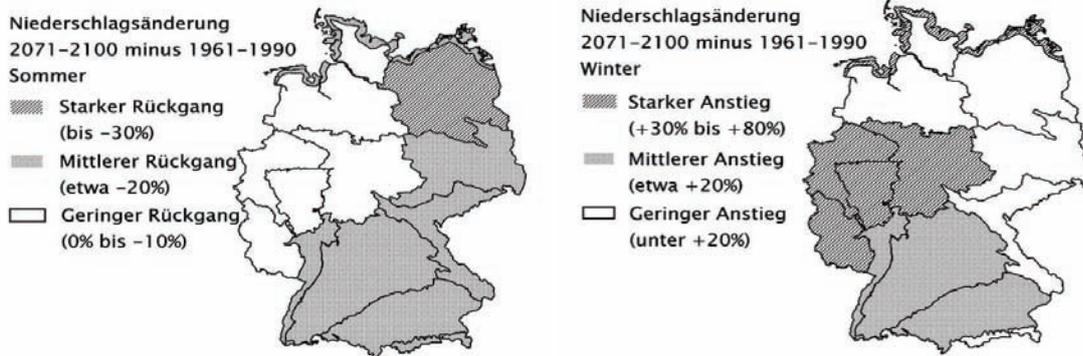


Abbildung 7: Änderungen des Niederschlages im Sommer- und Winterhalbjahr nach a) REMO- und b) WETTREG-Simulationen (Quelle: MPI-M, Hamburg; Spiegel-online).

3 Produktionsbedingungen für die Landwirtschaft in Deutschland

Im Jahr 2005 betrug die landwirtschaftlich genutzte Fläche in Deutschland rund 17 Millionen Hektar (Statistisches Bundesamt, 2006a), ca. 54% der Gesamtfläche. Den größten Anteil stellte mit 11,9 Millionen Hektar Ackerland, gefolgt von 4,9 Millionen Hektar Dauergrünland. Weitere landwirtschaftliche Nutzungen durch Sonderkulturen wie Nutzgarten- und Obstanlagen, Baumschulen und Rebland fallen mit je 5, 66, 22 und 97 Tausend Hektar flächenmäßig zwar nicht ins Gewicht, tragen jedoch überproportional zur Wertschöpfung innerhalb der Landwirtschaft bei¹⁹. Bayern ist mit einer landwirtschaftlich genutzten Fläche von 3,3 Millionen Hektar flächenmäßig das bedeutendste Agrar-Bundesland, gefolgt von Niedersachsen mit 2,6 Millionen Hektar und Nordrhein-Westfalen mit 1,5 Millionen Hektar. Die Stadtstaaten, Berlin, Hamburg²⁰ und Bremen, werden hier nicht weiter berücksichtigt und auch das Saarland spielt für die landwirtschaftliche Produktion nur eine untergeordnete Rolle.

Der seit Jahren stattfindende Strukturwandel in der Landwirtschaft führt zu einer zunehmenden Flächenkonzentration (z.B. Hahlen, 2006; BMELV, 2006b). Im Jahr 2005 verteilte sich die landwirtschaftlich genutzte Fläche auf insgesamt 366 600

landwirtschaftliche Betriebe mit mehr als zwei Hektar Fläche (BMELV, 2006a). Bei einer durchschnittlichen Flächenausstattung von mittlerweile ca. 46 Hektar schwanken die Betriebsgrößen nach wie vor erheblich zwischen den einzelnen Bundesländern: in Bayern finden sich mit 33 Hektar im Schnitt die kleinsten Höfe, in Mecklenburg-Vorpommern mit 219 Hektar die größten (DLG, 2000). Generell weisen die neuen Bundesländer auf Grund der ehemaligen landwirtschaftlichen Organisation in Landwirtschaftliche Produktionsgenossenschaften (LPGs) noch heute erheblich größere Flächen auf und gleichzeitig auch den höchsten Prozentsatz an gepachtetem Land. Die Zahl der in der Landwirtschaft haupt- oder nebenberuflich beschäftigten Arbeitskräfte nahm im Laufe der letzten Jahre kontinuierlich ab und betrug 2005 1,26 Millionen. Mit rund 60% stellten weiterhin Familienarbeitskräfte den größten Anteil gefolgt von 24% Saisonarbeitskräften. Die Nettowertschöpfung betrug im selben Jahr 12,1 Milliarden Euro (BMELV, 2006a).

Während die primären Produktionsbedingungen in erster Linie von den regionalen naturräumlichen Gegebenheiten (s. Kap. 3.2) abhängen, wird die zunehmende Globalisierung der Agrarmärkte bei gleichzeitiger Lockerung der EU-Agrarsubventionspolitik in Zukunft noch in einem stärkeren Maß die nationale Landwirtschaft beeinflussen. Steigende Preise von Agrarprodukten auf Grund von verändertem Konsumentenverhalten und dem Bioenergieboom (s. auch Kap. 3.5.2.2) sind hier erste Anzeichen. Zusätzlich wird der Klimawandel sowohl direkt durch die Veränderung des regionalen Klimas als

¹⁹ Die Wertschöpfung der Gartenbauproduktion einschließlich Obst-, Gemüse, Baum- und Zierpflanzenproduktion betrug 1999 mit 4,3 Mrd. Euro fast 50% der gesamten Landwirtschaft (FH Erfurt, Gartenbau).

²⁰ Hamburg besitzt eine verhältnismäßig große Anbaufläche von Äpfeln und eine geringere von Gemüse.

auch indirekt durch die Auswirkungen auf die globale Nahrungsmittelproduktion die heimische Landwirtschaft beeinflussen.

3.1 Die deutsche Landwirtschaft im europäischen und internationalen Kontext

Europa ist weltweit einer der größten und effektivsten Produzenten von Faserstoffen und Nahrungsmitteln, vor allem von Feldfrüchten und tierischen Erzeugnissen. Dabei beträgt die durchschnittliche Agrarfläche 27% und der Anteil an Grünland bzw. Weidefläche 18% der gesamten Landfläche. Deutschland gehört auch nach der Erweiterung der Europäischen Union (EU-25) nach wie vor zu den drei größten Agrarproduzenten (Hahlen, 2006) und besitzt nach Frankreich und Spanien die drittgrößte landwirtschaftlich genutzte Fläche. Darüber hinaus hat Deutschland in der EU-25 einen bedeutenden Anteil an der Fleisch- und Milcherzeugung: es ist der größte Schweineproduzent und nach Frankreich der zweitgrößte Rinderproduzent der Wirtschaftsgemeinschaft.

Innerhalb Europas wird im Norden die landwirtschaftliche Produktion insbesondere von Ackerkulturen durch die kurze Vegetationsperiode, in den atlantisch oder montan beeinflussten Regionen durch die geringe Verfügbarkeit von Solareinstrahlung, und im mediterranen Klimabereich durch die begrenzte Wasserverfügbarkeit, Hitzestress sowie die kurze Kornfüllungsperiode begrenzt. Unter dem Aspekt des Klimas und der Böden befinden sich die produktivsten Regionen in Europa entlang der fruchtbaren Börden, die sich von Süd-

ost-England über Frankreich, Benelux und Deutschland bis nach Polen erstrecken (Maracchi *et al.*, 2005).

Neben natürlichen – u.a. klimaabhängigen – Standortfaktoren ist für die landwirtschaftliche Produktion innerhalb Europas vor allem die gemeinsame Agrarpolitik der EU bestimmend – ebenso für den Agrarhandel zwischen EU-Mitgliedern und sonstigen Agrarproduzenten bzw. -konsumenten. Weltweit bedeutende Agrarproduzenten für Ackerfrüchte und tierische Produkte sowie Obst und Wein sind neben der EU die Vereinigten Staaten und Kanada, Argentinien, Brasilien, Australien sowie Russland und weitere Osteuropäische Länder, die ihre ursprünglich sozialistisch ausgerichtete Produktion zunehmend am Markt orientieren.

Die Europäische Agrarpolitik und internationaler Agrarhandel

Ziel der Gemeinsamen Europäischen Agrarpolitik (GAP bzw. Common Agricultural Policy, CAP) ist seit ihrer Gründung im Jahr 1958 die Sicherung eines angemessenen Lebensstandards der Landwirte, die Versorgung der Verbraucher mit hochwertigen Nahrungsmitteln zu vernünftigen Preisen und die Erhaltung des ländlichen Erbes (Europa, 2006). Da die Subventionierung von Grundnahrungsmitteln zur Versorgungssicherung zusammen mit dem produktionstechnischen Fortschritt seit Mitte der 80er Jahre zu einer gewaltigen Überproduktion führte, traten eine Reihe von Reformen in Kraft, um diese übermäßige Produktion zu bekämpfen, die Wettbewerbsfähigkeit zu fördern und die Ausgaben – auch in Hinblick auf die Oster-

weiterung – zu begrenzen. Zu einer tiefgreifenden Wende in der bisherigen Agrarpolitik führte die Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik im Jahr 2003, die ein besseres Gleichgewicht zwischen Marktpolitik²¹ und ländlicher Entwicklungspolitik schaffen wollte und noch weit über die „Agenda 2000“²²- Beschlüsse hinausging.

Kernelemente der Reform, die seit Anfang 2005 angewandt wird, sind die *Entkoppelung* der Beihilfen von der Produktion durch eine produktionsunabhängige einzelbetriebliche Zahlung (Fischler, 2006), die Bindung der Direktzahlungen an die Einhaltung von Umwelt-, Tierschutz- und Qualitätsvorschriften als neue Voraussetzung zur Gewährung der Prämien („*Cross Compliance*“) und die Stärkung des ländlichen Raums durch Mittelumschichtung im Rahmen der *Modulation* (asymmetrische Kürzung von Direktzahlungen). In manchen Fällen kann die beschlossene Reform zu erheblichen Prämienkürzungen führen, wie z.B. bei intensiven Bullenmastbetrieben oder Milchviehbetrieben, die vorwiegend auf Ackerland wirtschaften und bzw. oder hohe durchschnittliche Milchleistungen aufweisen.

Durch diese Maßnahmen soll eine nachhaltigere Landwirtschaft gefördert werden mit höheren Qualitäts- und Hygienestandards und größerem Marktbezug. Erhofft wird sich eine Senkung der Treibhausgasemission durch den Rückgang der Tierproduktion sowie geringere N₂O-Emissionen durch geringeren Düngemiteleinsatz und bessere Düngepraxis.

²¹ 1. und 2. Säule (pillars) der Agrarpolitik

²² Umfassendes Aktions- und Reformprogramm der EU-Agrarpolitik zur Stärkung der Gemeinschaftspolitik in Hinblick auf die EU-Erweiterung.

„*Cross Compliance*“ dürfte auch durch einen besseren Bodenschutz Auswirkungen auf die THG-Emissionen haben. Allerdings hat sich in Großbritannien gezeigt, dass der Einfluss der *Agenda 2000* auf die THG-Emissionen gering ist (DEFRA, 2006). Gleichzeitig reagiert die EU mit der Reform auf die Forderungen der Welthandelsorganisation nach einem Abbau von Exportsubventionen einerseits und von Importzöllen andererseits. Durch die Neugestaltung der Zuckermarktordnung wandelte sich die EU z.B. vom zweitgrößten Zuckerexporteur zum Netto-Importeur (Europa, 2006). Generell gingen seit 1990 die Netto-Exporte in jedem Sektor zurück. Da die EU weltweit der größte Importeur und der zweit-größte Exporteur von Lebensmitteln ist, hat sie einen großen Einfluss auf den Weltmarkt (Lacroix, 2005). Allerdings nimmt die Kaufkraft in den BRIC²³-Staaten zu und damit auch ihr Einfluss auf den Agrarmarkt; dies gilt insbesondere für den Agrargiganten Brasilien (Cardy-Brown, 2007) und China. Auch die steigende Nachfrage nach Biotreibstoffen verändert den globalen Agrarmarkt zusehends (Bickert, 2007).

3.2 Naturräumliche Gliederung Deutschlands

Als Naturraum wird eine Region bezeichnet, die einheitliche geologische und klimatische sowie faunistische und floristische Merkmale und damit auch ähnliche Produktionsbedingungen für die Landwirtschaft besitzt. Ausgehend von den drei Großregionen Deutschlands – Norddeut-

²³ Brasilien, Russland, Indien und China

ches Tiefland, Mittelgebirge und Alpenvorland – werden immer kleinere naturräumliche Einheiten ausgeschieden. Einen Überblick über die wichtigsten großräumigen Naturräume Deutschlands gibt die Abbildung 8 und die der Bodenbildung zu Grunde liegenden Ausgangsgesteine in Abbildung 9.

Abbildung 10 zeigt die mittlere Durchschnittstemperatur, die durchschnittliche Niederschlagshöhe und die mittlere Sonnenscheindauer als Folge der Höhe über NN, Luv- und Leeeffekten der Mittelgebirge sowie der allgemeinen Exposition im Verhältnis zur Mitteleuropäischen, d.h. in

erster Linie Nordatlantischen Wetterzirkulation.

Da in Deutschland eine Vielzahl von Gebietsgliederungen existiert, ist in den letzten Jahren von den Anstalten und Ämtern für Landwirtschaft bzw. den Landwirtschaftskammern der Bundesländer und der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft ein Konzept der „Boden-Klima-Räume der Bundesrepublik Deutschland“ entwickelt worden, das in Zukunft für die Erstellung von Gebietsgliederungen im landwirtschaftlichen Bereich verwandt werden soll (Roßberg *et al.*, 2007).

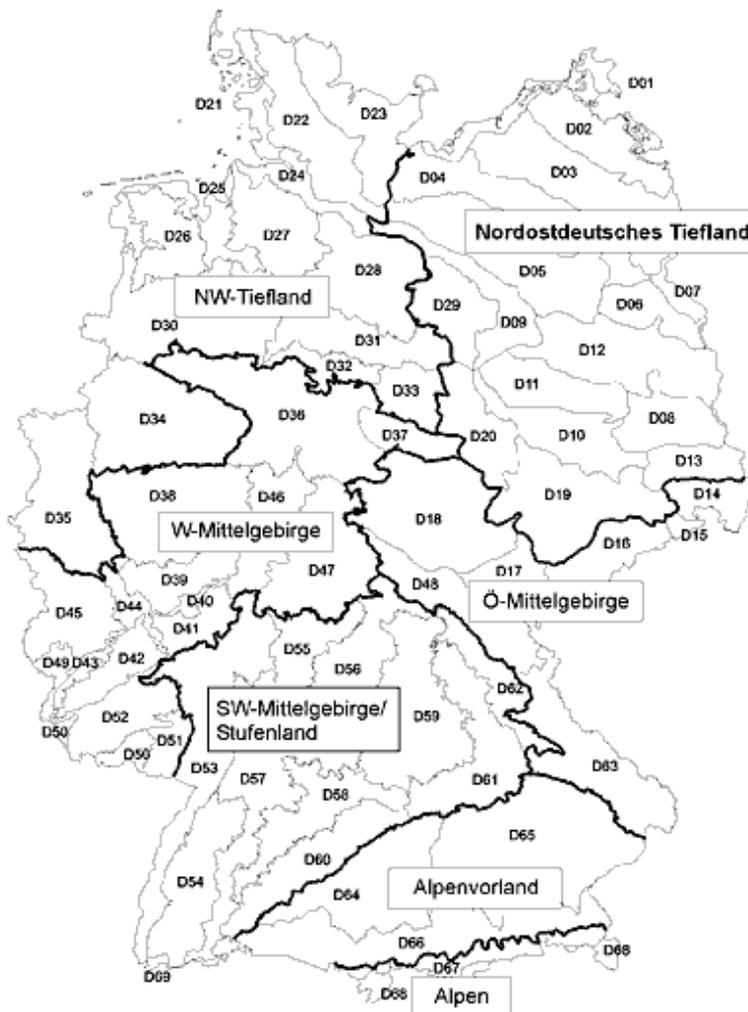


Abbildung 8: Naturräumliche Einheiten Deutschlands (Quelle: BfN).

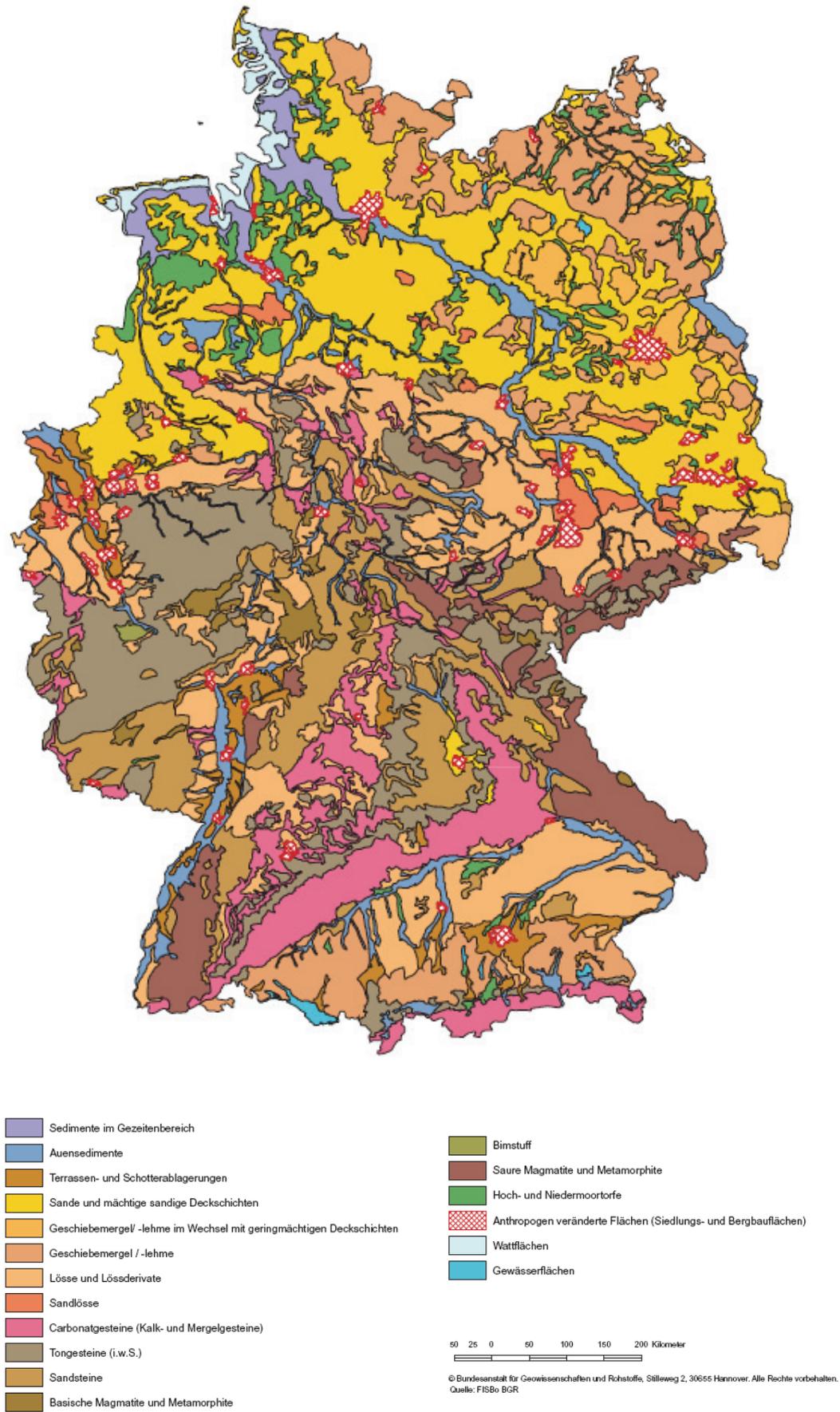


Abbildung 9: Karte der Bodenausgangsgesteine (Maßstab 1: 500000) (Quelle: BGR)

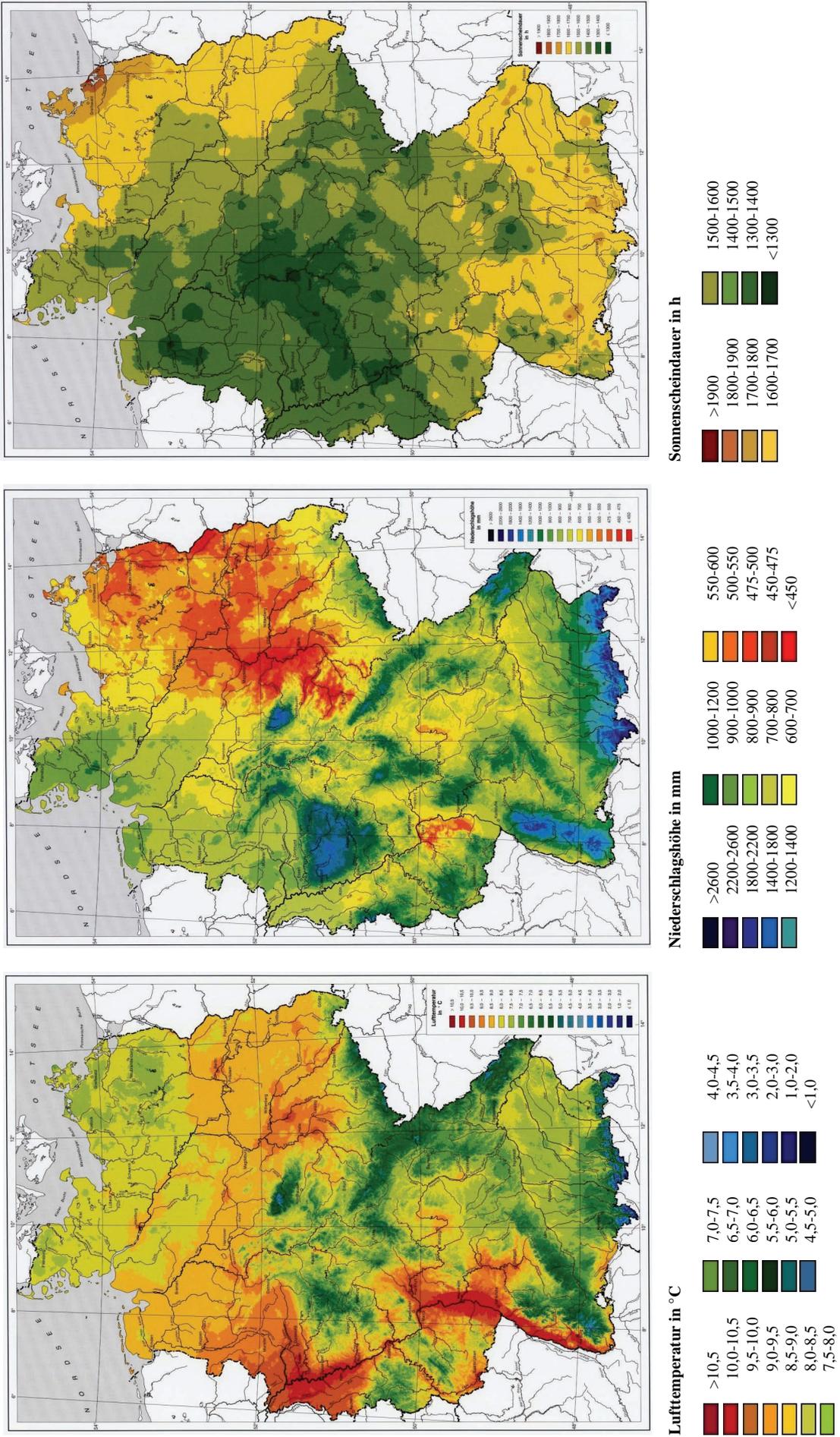


Abbildung 10: Mittlere Jahresdurchschnittstemperatur (1961-1990) (links), mittlere jährliche Niederschlagshöhe (1961-1990) (Mitte) und mittlere Sommerscheindauer (rechts) (Quelle: Klimaatlas DWD).

Das *Norddeutsche Tiefland* wurde maßgeblich durch die letzten Eiszeiten sowie nacheiszeitliche Prozesse geformt (Ellenberg, 1996). Das Relief ist eben bis wellig; die tiefsten Punkte liegen in Niedermooren bzw. altem Marschland bei wenigen Metern unter dem Meeresspiegel, die höchsten bei ca. 200 m über NN. Die küstennahen Gebiete bestehen aus holozänen²⁴ See- und Flussmarschen bzw. Boddenlandschaften, denen sich pleistozäne²⁵ Alt- und Jungmoränenlandschaften²⁶ in verschiedenen Ausprägungen und Verwitterungsstadien anschließen. Nach bzw. bei Rückzug der Gletscher bildeten sich oft Flugsanddünen, die später durch die Vegetation festgelegt wurden: Brandenburg war beispielsweise schon in historischer Zeit als „Streusandbüchse“ berüchtigt. Darüber hinaus ließen anthropogene Eingriffe offene Heideflächen entstehen, wie z.B. in der Lüneburger Heide, und sorgten durch Abholzung und Plaggenhieb, d.h. der Verwendung des natürlichen fruchtbaren Oberbodens als Dünger, für eine großflächige Verarmung (*Podsolierung*) der Böden.

Die fruchtbarsten Böden und Grundlage einer ertragreichen Landwirtschaft sind die jungen Marschen entlang der Küste und die sich von West nach Ost zwischen der Moränenlandschaft und der Mittelgebirgsstufe erstreckenden lössreichen Börden. Die dort vorherrschenden Braun- bzw. Schwarzerden erreichen Bodenzahlen²⁷

um ca. 90, wie z.B. in der Hildesheimer und Magdeburger Börde oder der Altmark (s. auch Abbildung 11). Im geomorphologisch besonders jungen nordöstlichen Teil befindet sich eine Vielzahl von Seen als Relikte der letzten Eiszeit, wie z.B. in der Mecklenburgischen Seenplatte. Die nordwestdeutsche Geest ist dagegen auf Grund des höheren Alters schon deutlich stärker verwittert und reliefärmer mit ärmeren Böden.

Klimatisch ist der Küstenstreifen der Nordsee *eu-ozeanisch*²⁸ geprägt. Nach Süden schließt sich ein breiter Streifen *ozeanisch* bzw. *subozeanisch* geprägten Klimas an, der sich von der Ostküste Schleswig-Holsteins bis zu den westlichen Mittelgebirgsrändern zieht. In südöstlicher und östlicher Richtung wird das Klima allmählich *subkontinental*, d.h. mit steigenden Temperaturunterschieden zwischen Sommer und Winter, geringeren Niederschlägen sowie mehr Sonnenscheinstunden (s. Abbildung 11 u. Abbildung 12). Im Regenschatten von Harz und anderen Erhebungen hat sich zum Teil ein trockeneres, kontinentales Lokalklima ausgeprägt.

Bodenart, Zustandsstufe des Bodens und seiner Entstehung. Der Ertrag eines Standortes wird jedoch nicht nur durch den Boden bestimmt, sondern gleichermaßen sind das Klima, die Hangneigung und die Exposition, die Geländegestalt entsprechend den Eigenschaften von Kleinformen und Rauheiten, die kleinräumige Homogenität bzw. Heterogenität der Bodengesellschaften und Besonderheiten wie das Vorkommen von Waldschatten, Wasserdruck, Überschwemmungsgefährdung etc. als Standortfaktoren zu berücksichtigen. Diese zusätzlichen Einflussgrößen werden in Prozentwerten ausgedrückt und entsprechend ihrer Summenprozente von der Bodenzahl subtrahiert bzw. addiert (*Ackerzahl*); ähnlich wird für die Bewertung von Grünland (*Grünlandzahl*) verfahren, bei dem Klima- und Wasserverhältnisse wichtiger als Bodenart und geologische Entstehungsart sind und entsprechend gewichtet werden.

²⁴ Das Holozän ist die jüngste geologische Epoche in der Erdgeschichte.

²⁵ Eiszeitalter geprägt durch Wechsel von Kalt- und Warmzeiten (erdgeschichtliche Epoche vor Holozän).

²⁶ Moräne (von fr. *moraine* Geröll), eiszeitliche Schuttablagerungen durch Gletscher.

²⁷ Bewertungsgrundlage der Ertragsfähigkeit von Ackerböden mit einer Skala von 7-100, berechnet aus

²⁸ Aus der Ökologie: eu=sehr; höchste Ausprägungsstufe des ozeanischen, d.h. milden Klimas.

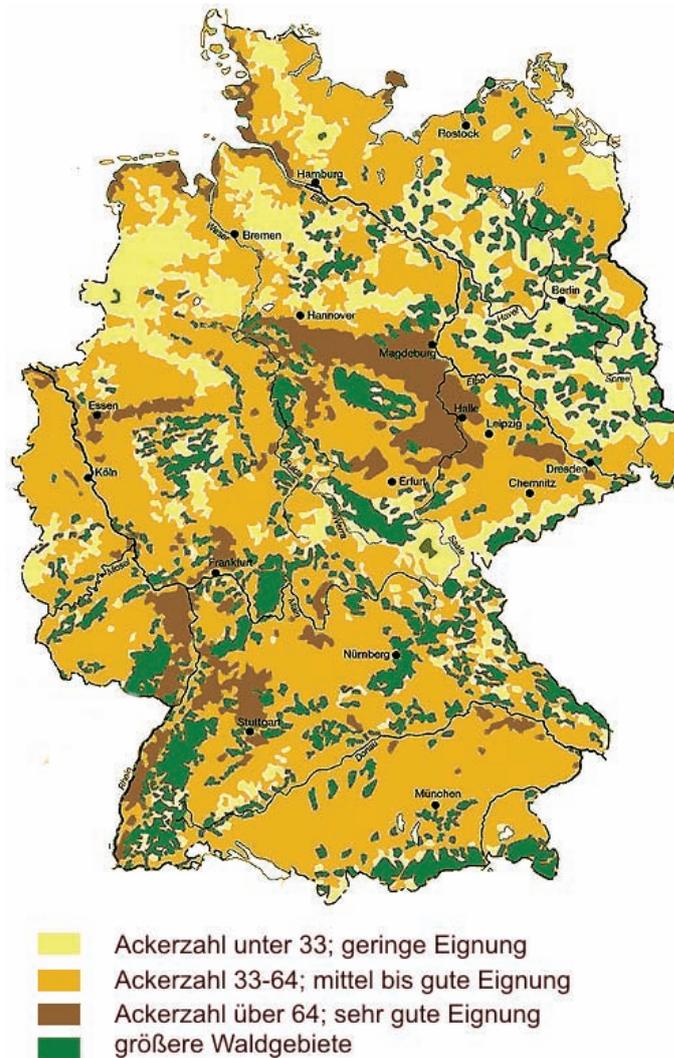


Abbildung 11: Standorteignung für landwirtschaftliche Nutzung in Deutschland auf Basis der Ackerzahl (aus Zebisch *et al.*, 2005 nach Liedtke und Marcinek, 2002).

Die *Deutsche Mittelgebirgsschwelle* ist vielgestaltig und vielfach gegliedert. Das deutlich ältere, stärker verwitterte geologische Material u.a. aus Trias und Devon führt zu ärmeren und durch die fortgeschrittene Bodenentwicklung stärker versauerten Böden, die in Hanglage darüber hinaus flachgründig sind. Ein großer Teil der Mittelgebirge und insbesondere die steileren Lagen sind bewaldet; ansonsten findet sich extensive Landwirtschaft. Fruchtbarere Böden finden sich in Süddeutschland, das insbesondere entlang der Flüsse Rhein, Main und Donau eine jünge-

re geologische Vergangenheit mit Vorkommen aus Jura und Tertiär aufweist.

Das deutsche *Alpenvorland* schließt sich östlich an den Höhenzug der Schwäbischen Alb an, folgt diesem zunächst nach Norden und dann der Donau nach Nordosten. Das Alpenvorland ist geologisch ein randlicher Meerestrog der Alpen, in dem in der Tertiärzeit bis zu 5000 Meter mächtige Sedimente aus Ton, Sand und Geröll abgelagert wurden. Es fällt von Südwesten nach Nordosten ab, von ca. 1000 m über dem Meeresspiegel am Alpenrand bis knapp 300 m bei Passau. Seine heutige –

flache bis hügelige – Gestalt verdankt es insbesondere den Eiszeiten, die auch zu einer ähnlichen Bodenvergesellschaftung wie im Norddeutschen Tiefland führten mit Jung- und Altmoränenlandschaften, fruchtbaren Deckenschotterplatten mit Lößböden und Tertiärhügelländern (s. auch Abbildung 9). Das Alpenvorland weist im Landesvergleich überdurchschnittlich fruchtbare Böden auf. Fruchtbarere Böden finden sich nur in den Lößgebieten Süd-Niedersachsens und Süd-Sachsen-Anhalts, sowie in den rheinland-pfälzischen bzw. hessischen Weinanbaugebieten und kleinen Teilen des westlichen Nordrhein-Westfalens (Dieterich, 2003). Klimatisch wird der Voralpenraum in die Kategorie des mitteleuropäischen Übergangsklimas eingeordnet, was gemäßigte Sommer und Winter bedeutet. Die Menge der Niederschläge nimmt mit zunehmender Entfernung von den Alpen ab. Insgesamt ist das Alpenvorland reich an Niederschlägen, aber auch an Sonnenschein und die Vegetationsperiode umfasst mit den Monaten April bis Oktober noch mehr als 200 Tage, was für das Pflanzenwachstum günstige Bedingungen bedeutet. Nach einer Typisierung landwirtschaftlicher Produktionsbedingungen nach Vegetationszeit und Wasserversorgung (Saatenunion, 2007) gehören große Teile des Alpenvorlandes damit zu den feuchten Standorten (> 650 mm Niederschlag) mit mittlerer bis längerer intensiver Vegetationszeit (5-7 Monate über 10°C Durchschnittstemperatur). Die gleichen Standortbedingungen weisen Mittelgebirgslagen zwischen 300 und 500 m über NN sowie viele westdeutsche Anbaulagen auf. Trockenere Standorte (< 650 mm Nieder-

schlag) mit mittlerer bis längerer Vegetationszeit findet sich in weiten Teilen des Oberrheins, der ostdeutschen Börden, Brandenburgs und Niederbayerns. Auf nicht weizenfähigen Standorten (Bsp. Brandenburg) kann hier Mais als trocken-tolerante C₄-Pflanze das Standortpotential nutzen. Auf feuchten Standorten mit kürzerer Vegetationszeit (< 4 Monate > 10°C), wie in süddeutschen Anbaulagen über 600 m über NN, in Mittelgebirgslagen über 500 m über NN und Mais-Grenzstandorten in Norddeutschland ist neben der traditionellen Grünlandnutzung heutzutage vor allem der Biomasseanbau, speziell die Getreide-Ganzpflanzen-silage²⁹, eine interessante Alternative.

3.3 Standort- und Klimaansprüche, Verbreitung und Ertragsentwicklung der Haupt- und Sonderkulturen

Während des 20ten Jahrhunderts haben sich sowohl die Ertragsstabilität als auch die Hektarerträge der wichtigsten Feldfrüchte in Deutschland deutlich gesteigert: am geringsten war der Anstieg der Flächenproduktivität bei der Zuckerrübe mit nur gut 200% der Produktivität von 1900, am steilsten bei Winterweizen mit fast 400% (Franzaring *et al.*, 2007). Dabei erfolgen die Ertragszuwächse über einen gewissen Zeitraum, wohingegen Witterungseinflüsse zu interannuellen Schwankungen führen. Letztere fallen umso größer aus, je kleiner die betrachtete Region ist, wie später im Vergleich der Ertragsda-

²⁹ Die Ernte erfolgt hier bereits zu Anfang der Teigreife bei ca. 30 bis maximal 35% Trockensubstanz.

ten der einzelnen Bundesländer noch zu sehen sein wird.

Der Ertragszuwachs ist das Ergebnis der Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion einschließlich Pflanzenzüchtung, des Einsatzes hoher Mengen an Düngern – insbesondere an Stickstoffdüngern – und von Pflanzenschutzmitteln sowie verbesserten Anbaumethoden. Dabei wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung in etwa zu gleichen Teilen zu den Ertragssteigerungen beigetragen haben (Wehling, 2004). Auch die indirekte Düngung u.a. durch Stickstoffemissionen aus Kraftwerken und Verkehr führte zu einer Ertragssteigerung der landwirtschaftlichen Produktion. Insbesondere für Schwefel sind die diffusen Einträge durch Luftreinigungsmaßnahmen in den letzten Jahren allerdings rückläufig, so dass Schwefel wieder verstärkt über die Düngung zugeführt werden muss. Auch der mit einer gewissen Temperaturzunahme verbundene bisherige Anstieg der CO₂-Konzentration im vergangenen Jahrhundert dürfte bereits für ca. 5 bis maximal 10% der Ertragssteigerungen verantwortlich sein (Amthor, 2001; Fangmeier und Franzaring, 2006).

In der modernen Landwirtschaft hat ferner die Bedeutung der Standortbedingungen abgenommen, da Defizite v.a. des Bodens durch mineralische Düngung oder Drainagen behoben werden können. Wichtiger bleiben die Faktoren Niederschlag, da sich eine Zusatzbewässerung nur bei lukrativen Kulturen wie Zuckerrüben oder Kartoffeln lohnt, sowie Strahlung und Temperatur: hier sind v.a. Schwellenwerte, die den Beginn der Vegetationsperiode markieren,

und Temperatursummen³⁰ entscheidend. Während sich an Temperatur-limitierten Standorten die Temperatur als wichtigerer Parameter erweist, wirkt an niederschlagsreichen Standorten eher der Niederschlag ertragslimitierend, wie für Hohenheim in Süddeutschland von Franzaring *et al.* (2007) und für England von Parry (1978) gezeigt werden konnte. Dabei gilt die Landbewirtschaftung im Allgemeinen als umso anfälliger gegenüber extremen Wetterbedingungen, je intensiver und spezialisierter sie erfolgt (Enquête Kommission, 1994). Dies gilt insbesondere für moderne Hochleistungssorten, die unter günstigen Bedingungen Spitzenerträge erbringen, aber unter extremen Bedingungen eine geringere Ertragssicherheit bieten.

Darüber hinaus gibt es kulturartspezifische Witterungsansprüche: so verhalten sich nach Seyfert und Runge (1964) Halmfrüchte etwa entgegengesetzt zu Hackfrüchten: bei den Halmfrüchten soll der erste, größere Teil der Vegetationsperiode vorwiegend kühl und feucht, der zweite, kleinere, vor allem am Ende warm und trocken sein. Bei Hackfrüchten soll der Sommer dagegen – nach einer anfangs vielfach warmen und mäßig feuchten, zeitweise trockenen Witterung – kühl und feucht sein; ein ebenso beschaffener Herbst bringt einen guten Massenertrag und ein warmer, zeitweilig trockener, sonnenscheinreicher Herbst erhöht Stärke bzw. Zuckergehalt. Wegen dieser größtenteils gegenteiligen Witterungsansprüche kommt es selten vor, dass Halm- und

³⁰ So wird bei „determinierten Kulturpflanzen“, wie z.B. den meisten Getreidesorten Mitteleuropas das Erreichen definierter Entwicklungsstadien über Temperatursummen gesteuert.

Hackfrüchte im selben Jahr Spitzenenerträge – aber auch große Verluste liefern (s. auch Kapitel 3.3.5).

Die progressive Ertragsentwicklung ging sowohl mit einem Rückgang der Anbauflächen einzelner Kulturen einher, als auch mit einer Verschiebung der relativen Anbauflächen einzelner Kulturen zueinander (Entrup und Oehmichen, 2000). Darüber hinaus erfolgte eine Verengung der Fruchtfolgen hin zu einem höheren Getreideanteil, sowie in jüngerer Zeit zu einem hohen Anteil an Mais und Raps – auch durch den Anbau von Energiepflanzen – bis hin zum mehrjährigen Anbau von Monokulturen mit den entsprechenden Auswirkungen auf Pestizideinsatz und Umwelt. Weitere wichtige Faktoren waren Änderungen im Verbraucherverhalten, entscheidend z.B. bei der Speisekartoffel, die Einführung von neuen Kulturen, wie z.B. dem Mais in der Tierfütterung, die zunehmende Mechanisierung in der Landwirtschaft und die Förderungen bzw. Kontingentierung des Anbaus einzelner Kulturen durch die EU-Agrarpolitik, wie z.B. im Falle der Zuckerrüben oder des Weinanbaus. Einen Überblick über die relativen Anbauflächen der wichtigsten Feldfrüchte im Jahr 2005 und die relativen Erntemengen von Getreide gibt Abbildung 12. Nachfolgend werden die Wachstums- und Ertragscharakteristika der für Deutschland wichtigsten Kulturarten dargestellt.

3.3.1 Getreide

Weizen (*Triticum spec.*)

Weizen stellt im Vergleich zu den anderen Getreidearten die höchsten Ansprüche an den Standort: klimatisch geeignet sind entsprechend seiner Herkunft³¹ wintermilde, sommerwarme und strahlungsintensive Klimate mit einer günstigen Niederschlagsverteilung während der Vegetationsperiode (Haumann und Dietzsch, 2000). So wird Wasser bei hohen Kornerträgen (90-110 dt ha⁻¹) und hohen Gesamttrockenmasseerträgen (>180 dt ha⁻¹) auf vielen Standorten zum ertragsbegrenzenden Faktor. Am kritischsten ist die Wasserversorgung in der Zeit des Schossens bis zur Blüte. Doch auch noch während der Reifephase führt Wassermangel zu geringeren Tausendkornmassen. Der mit einem Transpirationskoeffizienten³² von 500 hohe Wasserverbrauch des Weizens liegt in seiner vergleichsweise späten Massenentwicklung im Vegetationsverlauf begründet; hinzu kommt häufig ein Anbau in Gebieten mit höheren Sommertemperaturen. Neben dem Niederschlag ist die Temperatur der zweite entscheidende Klimafaktor für die Weizenentwicklung: nach der Ruhepause im Winter sind kühle Frühjahrstemperaturen für eine ausreichende Bestockung vorteilhaft. Hitze während der Kornreife beeinträchtigt die Kornzahl und Kornausbildung. Bereits Temperaturen

³¹ Genzentrum der Weizengruppe ist – ebenso wie für Gerste, Roggen und Hafer – der Nahe Osten, mit weiterer Unterteilung für die Einkornreihe (*Monococca* – diploid), die Zweikorn- oder Emmerreihe (*Dicoccoidea* – tetraploid) und die Dinkelreihe.

³² Wasserverbrauch in Liter pro Kilogramm Trockengewicht [l kg⁻¹].

oberhalb von 28°C können zu Hitzestress und physiologischer Austrocknung führen. Entscheidend für hohe Kornerträge sind darüber hinaus fruchtbare Böden mit ausgeglichenem Wasser- und Lufthaushalt und einer hohen nutzbaren Feldkapazität. Als beste Standorte gelten humose Braunerden, insbesondere Parabraunerden mit hoher Basensättigung. So zeigt Winterweizen bei steigender Ackerzahl die höchsten Ertragssteigerungen. Allerdings können auch weniger günstige Standorte beachtliche Weizenenerträge bringen bei entsprechender Bodenbearbeitung und ausreichender Versorgung an mineralischen und organischen Düngemitteln.

Darüber hinaus hat eine intensive Züchtung Sorten hervorgebracht, die eine hohe ökologische Streubreite aufweisen und auch bei abnehmender Bodengüte Weizenanbau ermöglichen. Auf leichten Standorten, wie v.a. Sanden, bleiben jedoch erhebliche witterungsbedingte Ertragsschwankungen kennzeichnend (s. Kap. 3.3.5). Auch die Stellung innerhalb der Fruchtfolge ist bei Weizen insbesondere auf ärmeren Standorten für Pflanzengesundheit und Erträge entscheidend, da er auf Grund seiner geringen Selbstverträglichkeit und geringen Wurzeleistung in engen, getreidereichen Fruchtfolgen besonders durch Fußkrankheiten gefährdet ist (Haumann und Dietzsch, 2000).

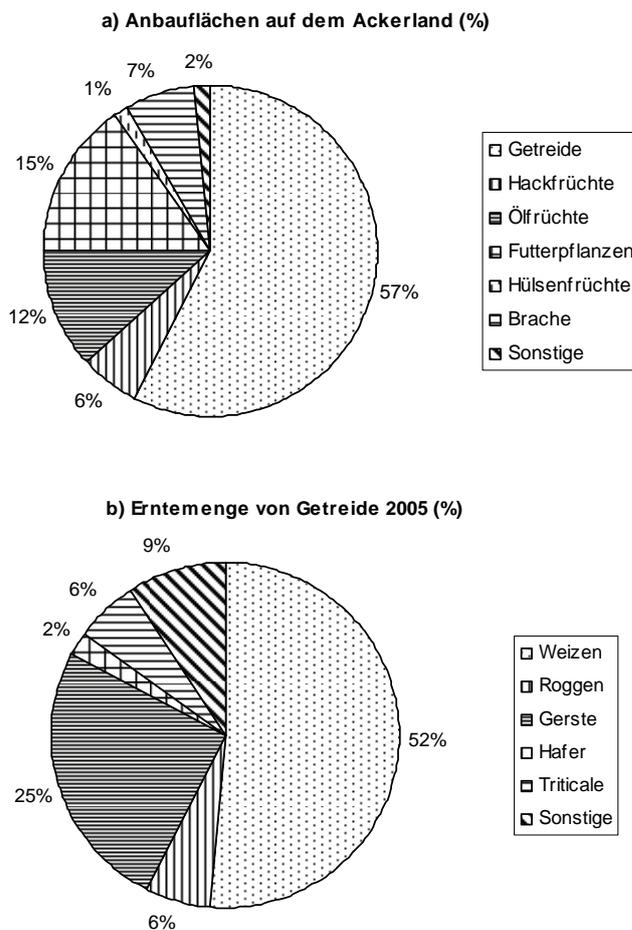


Abbildung 12: Relative Anbauflächen (a) und Erntemengen von Getreide (b) im Jahr 2005 (Daten: Statistisches Bundesamt, 2006a).

Winterweizen wurde im Jahr 2005 im gesamten Bundesgebiet auf 3,1 Millionen Hektar, d.h. 26% der Ackerfläche angebaut (Statistisches Bundesamt, 2006a). Damit hat Winterweizen seine führende Stellung unter den Anbaukulturen seit 2000 (2,9 Mio ha) weiter leicht ausgebaut (s. auch Abbildung 12). Dabei geht die Wettbewerbsstärke von Winterweizen sowohl auf seine beeindruckende Flächen- als auch die hohe Arbeitsproduktivität zurück (Schüttert und Hensche, 2000). Auch der Trend zu milderem Wintern scheint die Entwicklung von Winterweizen zu fördern, insbesondere seit Fungizide Pilzprobleme in Schach halten (Hübner und Metz, 1996). Außerdem sanken weltweit die Lagerbestände, was neben der Agrarpolitik EU-weit zu einem Anstieg des Winterweizenanbaus führte. Knapp 98% der 2005 mit Weizen bestellten Flächen entfielen auf Winterweizen; nur 1,7% auf Sommerweizen und der Rest auf Hartweizen (*Durum*). *Durum*weizen zur Teigherstellung ist bisher weitgehend auf die wärmeren und trockeneren Lagen Süddeutschlands und der Pfalz beschränkt. Sommerweizen hat in den letzten Jahren nicht die Ertragssteigerungen von Winterweizen erreicht, und wird in der Regel nur in Jahren mit nassem Herbst und verpasseter Saat oder aber in Jahren mit starker Auswinterung verstärkt angebaut (Haumann und Dietzsch, 2000). Ein weiterer Nachteil von Sommerweizen besteht in seiner generell schwächeren Mahlfähigkeit (Münzing und Lindhauer, 2006).

Spitzenreiter im Winterweizenanbau war Bayern (470 000 ha), gefolgt von Niedersachsen (426 000 ha), Sachsen-Anhalt (344 000 ha) und Nordrhein-Westfalen

(278 000 ha). Der durchschnittliche Hektarertrag lag im Bundesgebiet mit 75,1 dt nur geringfügig über dem sechsjährigen Mittel (2000-2005) von 74,0 dt (Datenquelle: Statistisches Bundesamt 2002, 2005a und 2006a³³). Wie aus Tabelle 4 ersichtlich, weist das Ertragsniveau innerhalb von Deutschland erhebliche Unterschiede auf, was neben Standortgüte auch strukturbedingt ist (LEL, 2005): die höchsten Erträge wurden in Schleswig-Holstein mit durchschnittlich 90,9 dt ha⁻¹ zwischen 2000 und 2005 erwirtschaftet, die niedrigsten in Brandenburg mit 58,6 dt ha⁻¹. Auf die Ertragsdepression von Winterweizen sowie weiteren landwirtschaftlichen Kulturen im Hitzesommer 2003 (2006) wird gesondert im Kapitel 3.3.5 eingegangen.

³³ Diese Quellen sind Datengrundlage für das gesamte Kapitel 3.2, wobei allerdings nicht für alle Kulturen in jährlichem bzw. zweijährigem Abstand berichtet wird.

Tabelle 4: Durchschnittliche Anbaufläche und Hektarerträge (2000-2005) für Winterweizen, Wintergerste, Roggen, Mais (Silomais und Körnermais einschließlich Korn-Kolben-Mix), Kartoffel, Zuckerrübe, Raps und Grünland bzw. (2001-2005) für Wein (Most) im gesamten Bundesgebiet und den einzelnen Bundesländern sowie der prozentuale Anteil der Hektarerträge 2003 im Verhältnis zum Jahresmittel (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2002, 2005a und 2006a).

	Winterweizen			Wintergerste			Roggen			Mais (Silo)			Mais (Körner)		
	Anbau- fläche [1000 ha]	Hektar- erträge [dt]	2003/ 2000-05 [%]												
Bundesland	2954	74.1	88	1386	64.1	82	686	52.7	81	1182	436	87	421	89	84
Deutschland	214	69.0	86	101	59.5	89	9	53.5	84	71	450	90	69	450	92
Baden-Württemberg	457	69.2	84	292	58.0	79	41	50.6	75	296	495	89	113	90	86
Bayern	139	58.6	68	70	54.1	58	214	42.7	69	96	324	68	15	73	72
Brandenburg	148	75.7	93	75	64.2	82	17	58.9	91	24	486	95	6	89	85
Hessen	324	72.9	87	123	68.0	80	80	55.3	88	68	369	85	4	71	85
Mecklenburg-Vorpommern	400	80.8	92	197	67.0	85	130	62.1	90	235	447	88	84	85	84
Niedersachsen	261	85.0	95	172	69.4	92	21	67.0	95	129	482	94	86	97	90
Nordrhein-Westfalen	91	68.0	89	34	58.6	85	11	57.9	84	16	467	89	7	81	87
Rheinland-Pfalz	8	63.8	85	3	58.2	80	4	55.3	80	3	430	78	n.s. ¹⁾	-	-
Saarland	170	67.2	73	97	61.4	67	41	52.9	71	59	402	79	14	81	72
Sachsen	324	72.1	90	102	66.9	80	81	49.3	82	57	354	68	17	79	66
Sachsen-Anhalt	204	90.9	95	55	82.3	97	24	67.7	99	88	366	94	1	86	-
Schleswig-Holstein	213	69.7	89	63	64.9	80	13	66.2	86	38	436	83	5	84	76
Thüringen															
	Kartoffel			Zuckerrübe			Raps			Grünland			Wein (Most)		
	Anbau- fläche [1000 ha]	Hektar- erträge [dt]	2003/ 2000-05 [%]	Anbau- fläche [1000 ha]	Hektar- erträge [hl]	2003/ 2000-05 [%]									
Bundesland	272	413	84	444	584	91	1208	34.8	84	4077	81	80	99300	95.4	88
Deutschland	6	354	77	21	619	77	65	34.0	78	508	70	77	26500	91.8	81
Baden-Württemberg	50	386	80	72	660	83	153	32.5	73	1043	90	81	5800	77.3	95
Bayern	12	318	84	11	490	85	102	30.7	68	259	55	69	5	63.2	83
Brandenburg	4	385	89	18	592	90	54	33.4	86	240	76	77	3500	77.3	97
Hessen	16	376	89	27	501	102	218	38.5	88	213	66	87	4 ³⁾	22.5	-
Mecklenburg-Vorpommern	121	439	83	112	574	102	91	34.1	93	610	108	80	-	-	-
Niedersachsen	28	470	91	69	599	98	51	34.8	88	347	84	84	20	85.9	99
Nordrhein-Westfalen	6	342	85	22	601	77	30	32.5	84	205	67	85	61800	99.3	92
Rheinland-Pfalz	n.s. ¹⁾	-	-	n.s. ¹⁾	-	-	3	28.4	76	35	71	71	100	96.9	75
Saarland	8	368	75	17	546	82	114	33.6	78	157	72	72	400	42.7	96
Sachsen	14	404	82	50	510	87	124	34.2	88	137	60	69	700 ⁴⁾	50.9 ⁴⁾	82 ⁴⁾
Sachsen-Anhalt	5	368	95	13	557	98	100	39.4	96	193	86	84	-	-	-
Schleswig-Holstein	3	378	78	11	538	93	104	35.0	85	120	65	70	s.o.	s.o.	s.o.
Thüringen															

¹⁾ nicht signifikant; ²⁾ nur Wein anbauende Bundesländer; ³⁾ Erst seit 2005; ⁴⁾ Wert gilt hier für Sachsen-Anhalt und Thüringen (Weinanbaugebiet Saale-Unstrut)

Ein direkter Vergleich der Entwicklung der Hektarerträge zwischen alten und neuen Bundesländern ist allerdings nicht möglich, da für die neuen Bundesländer erst seit 1990 agrarstatistische Daten vergleichbarer Art vorliegen. Generell war das Ertragsniveau in den neuen Bundesländern bis zur Wiedervereinigung aus produktionstechnischen Gründen deutlich geringer. Auch heute noch ist in den meisten neuen Ländern das Ertragsniveau niedriger als im Bundesdurchschnitt, da sich ärmere Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität und die stärker ausgeprägter Sommertrockenheit des kontinentaleren Klimas nachteilig auswirken. Hinzu kommt, dass seit dem Wegfallen der Roggen-Intervention im Jahr 2004 zunehmend Weizen auf Weizen-Grenzertragsstandorten³⁴ angebaut wird (MLUV, 2005). Eine Ausnahme bildet Sachsen-Anhalt mit einem Anteil fruchtbarer (und wasserspeichernder) Lößböden.

Im Durchschnitt nahm der Hektarertrag von Winterweizen seit Anfang der 70er Jahre um ca. 40 dt (BMELV, 2006b) zu, was – bei anfänglich höherem Ertragszuwachs (Friedt, 2007) – einem durchschnittlichen Ertragszuwachs von ca. 1 dt pro Hektar und Jahr entspricht (d.h. durchschnittlich ca. 1-2%). Gleichzeitig reduzierten sich die Ertragsschwankungen im Verhältnis zum Ertrag (Sterzel, 2007). Für moderne Hochleistungssorten werden auch heute noch Ertragszuwächse von 1,5 bis 2% pro Jahr erreicht (Niehoff, 2006), was Winterweizen zu einer attraktiven

Anbaukultur macht. Da das Ertragspotential auf guten Standorten auf ca. 120-140 dt ha⁻¹ geschätzt wird (Austin 1982, zitiert in Krug, 2002b), ist auch noch in Zukunft mit weiteren Ertragssteigerungen zu rechnen. Das ökologische Limit ergibt sich letztendlich aus der Energiezufuhr für die Photosynthese; hier dürften mit heute 60-70% der theoretisch möglichen Energienutzung in Kurzzeit – Messungen ebenfalls noch Reserven liegen.

Dagegen stieg in Schleswig-Holstein der Hektarertrag seit 1972 von 45 dt auf fast 100 dt (Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein zitiert in MLUR, 2006b). Diese überdurchschnittliche Ertragsentwicklung in Schleswig-Holstein lässt sich zum Einen auf agrarstrukturelle Faktoren zurückführen, wie z.B. den Anbau rückgang auf ertragsschwächeren Standorten und auf die höhere durchschnittliche Betriebsgröße in den Marktfuchtbetrieben, die eine stärkere Spezialisierung im Getreideanbau mit optimierter Produktionstechnik ermöglicht (MLUR, 2006a). Auch die traditionelle Produktion von Massenweizen, v.a. B-Weizen, spielt dabei eine Rolle (Seling und Lindhauer, 2006). Ein weiterer – unter dem Gesichtspunkt des Klimawandels wichtiger Aspekt – ist, dass die Kornfüllungsphase, die bei determinierten Anbaukulturen wie Getreide allein über Temperatursummen gesteuert wird, im kühl gemäßigten Klima Schleswig-Holsteins länger andauert und somit zu höheren Kornträgen als bei wärmeren Temperaturen führt (s. Kapitel 4.1.1). Darüber hinaus existieren enge Wechselbeziehungen zwischen der Bestockung, der Temperatur und der Tageslänge: so nimmt z.B. die Anzahl produktiver

³⁴ Allerdings hat die Züchtung auf Trockenheitstoleranz die Produktionsmöglichkeiten für Weizen auf Sandstandorten und in Trockengebieten auch erheblich erweitert (Spanakakis, 2007).

Halme mit zunehmender Temperatur ab (Vollmer, 1986).

Im Gegensatz zu der Entwicklung in Schleswig-Holstein und in begrenztem Umfang auch in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen hält die Ertragsentwicklung für Weizen in den südlichen Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern mit der bundesweiten Ertragssteigerung nicht mit: während 1980 die Erträge mit 47,5 bzw. 47,9 dt ha⁻¹ den 49,8 dt ha⁻¹ des westdeutschen Durchschnittes noch nahe kamen, konnten seitdem nicht mehr Ertragssteigerungen von jährlich 1 dt ha⁻¹ erzielt werden (Daten des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg und BMELV zitiert in LEL, 2005, bzw. aus LfStaD zitiert in Stmlf, 2006). In den letzten Jahren betrug die jährliche Produktionssteigerung im kontinentaleren Klima Bayerns sogar nahezu Null (Klimazwei, 2007). Experten vermuten hier bereits Auswirkungen der Klimaveränderungen (mündliche Mitteilung Prof. Maidl, TU-München, 2006). Wie im Fall von Schleswig-Holstein sind allerdings auch produktionstechnische Daten zu berücksichtigen, wie die im Durchschnitt geringere Hofgröße in Süddeutschland (Statistisches Bundesamt, 2006a), die Bewirtschaftung von Grenzertragsstandorten und der relativ hohe Anteil bzw. Anzahl an Nebenerwerbshöfen (DLG, 2000). Holz (2007), der auch in Nordrhein-Westfalen in den letzten Jahren stagnierende Winterweizen-erträge beobachtete, führt als weitere Faktoren ackerbauliche Veränderungen an, wie z.B. die Umstellung auf Mulchsaat und den u.a. auf Grund niedriger Agrarpreise stark gesunkenen Einsatz von Pesticiden sowie die hohe Wertschätzung resis-

tenter Weizensorten mit geringeren Ertragszuwächsen bei den Sortenprüfungen.

Einschränkend muss festgehalten werden, dass neben der Quantität selbstverständlich auch die Qualität ein wichtiges Kriterium ist: so führte z.B. die feuchte Witterung zur Ernte 2005 in Schleswig-Holstein zu Mehrkosten wegen der Notwendigkeit der Trocknung und zum Teil geminderter Qualität (MLUR, 2006a). Darüber hinaus unterscheiden sich E-, A-, B-, und C-Weizen sowohl in ihren Hektarerträgen als auch in ihren Deckungsbeiträgen. Allerdings erbringen moderne A-Weizensorten zunehmend B-Weizenerträge (Böse, 2006a) und beide mittlerweile fast so viel wie Hohertrags-Futterweizen (Münzing und Lindhauer, 2006). Während der noch deutlich ertragsärmere E-Weizen seine Hauptanbauggebiete im sommerkontinentalen Anbauggebiet in Bayern und in den östlichen Bundesländern findet, haben Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen den höchsten Anteil an B- und C-Weizen (Seling und Lindhauer, 2006; Münzing und Lindhauer, 2006).

Gerste (*Hordeum vulgare*)

Wintergerste, die bisher überwiegend als Futtermittel aber zunehmend auch als Braugerste eingesetzt wird, ist nach Winterweizen die zweitwichtigste Anbaukultur in Deutschland (s. Abbildung 12b). Ihre Ansprüche an den Boden liegen zwischen Weizen und dem genügsamen Roggen (Becker und Wetzel, 1986). Außerdem ist Wintergerste auf Grund der Begrannung³⁵

³⁵ Grannen bewirken durch Verdunstung eine starke Abkühlung der Ähre, so dass über mehrere Tage Maximaltemperaturen von über 33°C im Schatten (d.h.

weniger hitzeempfindlich als Winterweizen und auch der spezifische Wasserverbrauch ist geringer, da ein größerer Teil der vegetativen Entwicklung bereits im Herbst und Winter vollzogen wird (Schönberger und Kropf, 2000). Wintergerste kann somit erfolgreich auf leichten, tiefgründigen Böden mit ausreichender Wasser- und Nährstoffversorgung angebaut werden. Limitierend für ihre geographische Ausbreitung ist ihre nur mäßige Frostresistenz. Für gute Erträge sind ein feucht-kühler Witterungsverlauf im Frühjahr entscheidend sowie mäßige Temperaturen während der Kornfüllung bei guter Wasser- und Nährstoffversorgung und ausreichenden Lichtintensitäten.

Im Jahr 2005 betrug die gesamte Anbaufläche 1,3 Millionen Hektar, wobei die Hauptanbauggebiete der Wintergerste in Bayern liegen, gefolgt von Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen. Der mehrjährige (2000-2005) durchschnittliche Hektarertrag im Bundesgebiet liegt mit 64 dt ha^{-1} auf Grund deutlich niedrigerer Ertragssteigerungen von jährlich nur 07 dt ha^{-1} während der letzten 50 Jahre zwar deutlich unter dem von Winterweizen; andererseits ist Wintergerste die einzige Kultur, die in den letzten 10 Jahren einen positiven Ertragstrend aufweist (Datenerhebung BMELV 2006 überarbeitet von Friedt, 2007). Die niedrigsten Hektarerträge werden wieder in Brandenburg und in den südlichen Bundesländern erzielt, die höchsten in Schleswig-Holstein (s. Tabelle 4). Günstig wirken dort neben den bereits angesprochenen agrarstrukturellen Faktoren auch die längeren Tage und die

gleichmäßige, langsame Abreife der Wintergerste, wodurch in Hohertragsregionen, wie z.B. der Ostholstein, Erträge von $90-110 \text{ dt ha}^{-1}$ erzielt werden können (Schönberger und Kropf, 2000a).

Sommergerste hat relativ geringe klimatische Ansprüche, was sich u.a. in ihrer breiten geographischen Verbreitung widerspiegelt (Knopf, 1986). Selbst in ungünstigen Lagen kann sie auf Grund ihrer kurzen Vegetationszeit und des geringen Wasserbedarfes noch befriedigende Erträge bringen. Dabei ist das erreichbare Ertragsniveau eng mit der Vegetationszeit der Sommergerste korreliert: je länger diese auf Grund frühen Aussäens und niedriger Temperaturen dauert, desto höhere Erträge können erreicht werden. Nach Chmielewski und Köhn (1999) wird ca. 60% der Ertragsvariabilität der Sommergerste durch meteorologische Variablen erklärt: während die Kornanzahl pro Ähre während der Ährenbildung und -entwicklung im Mai bestimmt wird, wird im Juni während der Reduktion der Schosser die Ährendichte festgelegt, und im Juni und Juli das Korngewicht während der Kornfüllung. Dabei reagiert Sommergerste im Gegensatz zu anderen Getreidearten erst auf Temperaturen über 35°C mit Notreife. Allerdings ist für Braugerste hoher Qualität im Gegensatz zu Futtergerste ein ausgeglicheneres Klima notwendig.

An den Boden stellt Sommergerste dagegen wegen ihrer kurzen Vegetationszeit relativ hohe Ansprüche. Früher galten deswegen die fruchtbaren Lössböden als typische Standorte für Sommergerste, aus denen sie wegen ihres im Vergleich zu Weizen geringeren Deckungsbetrages je-

45-50°C in Ährenhöhe) toleriert werden, so lange Wasser aus dem Boden verdunstet werden kann.

doch verdrängt wurde. Auf leichteren Böden wird bei ausreichender Düngung mangelnde Wasserhaltefähigkeit z.T. durch Beregnung ausgeglichen. Auf Grund der geringsten Ertragszuwächse unter den Getreidearten ist der Sommergerstenanbau in Deutschland seit Jahrzehnten rückläufig.

Sommergerste wird bundesweit auf etwas über 600 000 Hektar angebaut. Die Hauptanbaugebiete liegen in Bayern, Niedersachsen, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz und der durchschnittliche Ertrag liegt bei 48 dt ha⁻¹ (2000-2005).

Roggen (*Secale cereale*)

Roggen besitzt im Vergleich zu anderen Getreidearten die höchste Kälteresistenz und die geringsten Wärmeansprüche: während er Kahlfröste bis -25°C übersteht, reagiert er sogar empfindlich auf hohe Temperaturen. Demzufolge befinden sich die Anbauswerpunkte in den kühleren Klimaten Mittel- und Nordeuropas. Die hohe ökologische Anpassungsfähigkeit von Roggen an verschiedenste Böden geht u.a. auf die hohe Leistungsfähigkeit seines Wurzelsystems, die frühe phänologische Pflanzenentwicklung sowie die lange Kornfüllungsphase zurück. Auch hinsichtlich der Anforderungen an die Vorfrucht stellt Roggen die anspruchloseste Getreideart dar (Honermeier, 2000).

Die Anbauflächen von Roggen in Deutschland sind seit Jahren rückläufig: wurden in der alten BRD in den 50er Jahren noch über 1,5 Millionen Hektar Roggen angebaut (Wetzel, 1986), waren es im Jahre 2000 im gesamten Bundesgebiet ca. 840 000 ha und 2005 – nach Wegfallen

der Roggenintervention 2004 – nur noch ca. 550 000 ha. Roggen wird v.a. auf den leichten Böden Brandenburgs, Niedersachsens und Mecklenburg-Vorpommerns angebaut (Tabelle 4). Auf Grund seiner guten Eignung als Energiepflanze (s. Kap. 3.5.2.2) könnte sich sein Anbau in Zukunft wieder über die ungünstigeren Produktionsstandorte hinaus ausdehnen; der Hektarertrag fällt bei den traditionellen Sorten mit durchschnittlich 53 dt (2000-2005) allerdings relativ gering aus.

Mais (*Zea mays*)

Als wärmeliebende und frostempfindliche C₄-Pflanze (s. auch Kap. 4.1.2.1) hat Mais relativ hohe klimatische Ansprüche: Körnermais, der etwas anspruchsvoller als Silomais ist, keimt erst ab 8°C Bodentemperatur und wächst zügig bei mehr als 10°C (Meßner, 2000; Hugger, 2005b). Demzufolge ist eine rasche Bodenerwärmung im Frühjahr notwendig, um ein zeitiges Aussäen zu ermöglichen. Körnermais braucht in Abhängigkeit von der Sorte und des Trockensubstanzgehaltes Wärmesummen zwischen täglich 1580 und 1630°C, Silomais dagegen nur 1450 bis 1550°C für jeweils frühes bis mittelfrühes Sortiment (KWS Saat AG, 2006). Da unter 6°C und über 30°C kein Wachstum stattfindet, werden nur die Tageswerte innerhalb dieser Grenzen berücksichtigt.

Dagegen stellt Mais relativ geringe Ansprüche an den Boden, solange Staunässe und schwere (Ton-) Böden nicht die Erwärmung behindern (Meßner, 2000; Hilbert, 1986). Der Wasserbedarf ist bei Mais als C₄-Pflanze mit einem Transpirationskoeffizienten von 200 l kg⁻¹ Trockenmasse

deutlich geringer als bei den Getreidesorten des C₃-Typs. Dennoch führt Wassermangel im Juli und August vor allem auf leichten Böden immer wieder zu Ertragseinbußen.

Mais wird in der Bundesrepublik Deutschland verstärkt seit Mitte der 50er Jahre bzw. seit den 60er Jahren angebaut (Hilbert, 1986; Meßner, 2000). Ermöglicht wurde dies durch die intensive Züchtung von Maishybriden für europäische Klimagebiete, Fortschritte bei der chemischen Unkrautbekämpfung, wie insbesondere die Entwicklung der Triazine, sowie einen größeren Mechanisierungsgrad in der Landwirtschaft. So stiegen die Durchschnittserträge seit den 60er Jahren bei Silomais von ca. 75 dt ha⁻¹ auf über 150 dt ha⁻¹ Gesamttrockenmasse, bei Körnermais von ca. 30 auf rund 90 dt ha⁻¹ Kornertrag (Alber, 1996, zitiert in Messner, 2000). Auch heutzutage ist der Züchtungsfortschritt für Mais deutlich größer als bei anderen Kulturarten (Hugger, 2005a). Neben der relativ neuen Nutzung in Biogasanlagen, wird Mais traditionell in der überwiegend hofeigenen Veredelungswirtschaft eingesetzt, wo er durch seine hohen Biomasseerträge und die vielseitige Verwendung für Rinder-, Schweine- und Geflügelhaltung einen hohen Stellenwert besitzt. Demzufolge konzentrierte sich der (Silo-) Maisanbau bisher überwiegend auf die Bundesländer Bayern und Niedersachsen mit einer großen Anzahl an Veredelungsbetrieben und günstigen Anbaubedingungen für Mais (Tabelle 4). Mit 1,3 Millionen Hektar Fläche im Jahr 2005 dominiert in Deutschland der Anbau von Silomais einschließlich Grünmais; Körnermais kam im selben Jahr nur auf 0,4

Millionen Hektar. Neben dem höheren Wärmebedarf kommen als weitere Limitierung für den Körnermais- bzw. Kolbenkorn-Mix -Anbau (Corn-Cob-Mix, CCM) Trocknungskosten³⁶ hinzu, die in Zeiten hoher Energiepreise den Anbau im Vergleich zu Winterweizen oder Raps unwirtschaftlich werden lassen können (Hugger, 2005b). Auch auf Grund des hohen Ernterisikos stagniert der Körnermaisbau seit Anfang der 90er Jahre bundesweit (Schüttert und Hensche, 2000); dagegen nimmt er in den nördlichen Bundesländern auf insgesamt allerdings noch niedrigem Niveau in den letzten Jahren zu. Der Anbau von Körnermais ist vor allem für die Schweinemast interessant; u.a. auch wegen der guten Verwertbarkeit der Gülle.

Sonstige Getreidearten

Triticale (*Triticosecale spec.*) ist das Kreuzungsprodukt von Weizen und Roggen und liegt in seinen Ansprüchen zwischen denen der beiden Eltern (Honermeier, 2000). Dabei sind die Eigenschaften stark vom Sortentypus abhängig. Insgesamt haben sich die hohen Erwartungen, die positiven Eigenschaften beider Linien vereinen zu können, d.h. die Ertrags- und Samenqualität des Weizens sowie die Anpruchslosigkeit und Winterhärte des Roggens, nicht vollständig erfüllt. Auf Grund seiner guten Verwertungsmöglichkeiten in der Schweinefütterung und Robustheit konnte sein Flächenanteil im Ackerbau dennoch ausgedehnt werden (Buchner, 2000). Gute Ertragsleistungen erzielt Triticale vor allem auf Weizen-

³⁶ Die Kornfeuchte muss für die Lagerung auf 15% reduziert werden.

Grenzertragsstandorten der Vor- und Mittelgebirge. 2005 betrug die Anbaufläche in Deutschland 481 000 Hektar und der mittlere Hektarertrag 55,7 dt.

Hafer (Avena sativa) hat von allen Sommer-Getreidesorten den höchsten Wasserbedarf und ein niedriges Temperaturoptimum zwischen 14 und 18°C. Bereits ab 27°C wird das Ertragsniveau durch abnehmende Nettoassimilation begrenzt (Schönberger und Kropf, 2000a). Hafer wurde im Jahr 2005 auf 210 000 Hektar im Bundesgebiet angebaut. Der mittlere Hektarertrag betrug im gleichen Jahr 45,9 dt. Auch bei Hafer liegen die Erträge im kühl-feuchten Norden höher als im Süden; in den Hohertragsgebieten Ostholsteins erreichen sie sogar 90 dt ha⁻¹. Damit wird deutlich, dass das Ertragspotential von Hafer selten im vollen Umfang genutzt wird. Dies liegt neben der Verdrängung von Hafer durch ertragreichere Getreidearten auch an der relativen Ertragsunsicherheit von Hafer, die auf Aussaatverschiebungen, unzureichende Wasserversorgung und hohe Temperaturen zurückgeht.

3.3.2 Blattfrüchte

Bei den Blattfrüchten handelt es sich im Allgemeinen um nicht-determinierte Kulturarten. Folglich werden in Anbaugebieten mit einer längeren Vegetationsperiode und höheren Temperatursummen bei ausreichender Wasser- und Nährstoffversorgung potentiell höhere Erträge erzielt.

Kartoffel (*Solanum tuberosum*)

Für hohe Kartoffelerträge ist eine gleichmäßige Wasserversorgung wichtig. Entscheidend ist dabei eine ausreichende Wasserzufuhr in der Zeit vom Auflaufen bis zur Blüte, während der die Kartoffel den höchsten Wasserbedarf hat. Demzufolge gehen Ertragsschwankungen i.a. auf eine unterschiedliche Wasserversorgung während der Vegetationsperiode zurück. Bei einem relativ hohen Nährstoffbedarf hat die Knolle recht geringe Ansprüche an den Boden: sie gedeiht auf fast allen Böden, wobei ihr jedoch schwere Böden Schwierigkeiten bereiten. Auch steinige Böden setzen dem maschinellen Kartoffelanbau Grenzen. Insgesamt betrachtet sind humose lockere Böden, die sich rasch erwärmen, am besten für den Kartoffelanbau geeignet (Putz, 2000).

Auf Grund von Änderungen in den Ernährungsgewohnheiten, Umstellung der Schweinemast auf Mais und andere Futtergetreide sowie bedeutenden Ertragssteigerungen ist die Entwicklung der Anbaufläche der Kartoffel seit Jahren rückläufig (Putz, 1986 und 2000). Über beträchtliche Jahr-zu-Jahr-Ertragsschwankungen hinaus unterliegt der Kartoffelanbau auch wegen der hohen finanziellen Vorleistungen bei den variablen Kosten sowie dem hohen Preisrisiko auf Grund einer fehlenden Marktordnung einem hohen Risiko. Einer weiteren Abnahme des Kartoffelanbaus wurde mit dem Vertragsanbau entgegengewirkt (Schüttert und Hensche, 2000).

Im Jahr 2005 wurden im gesamten Bundesgebiet auf 277 000 Hektar Kartoffeln angebaut mit einem durchschnittlichen Ertrag von 420 dt ha⁻¹ – im Vergleich dazu

waren es in den 50er Jahren in der alten Bundesrepublik noch 2,2 Millionen Hektar (Putz, 1986). Frühe Speisekartoffeln stellen nur ca. 5% der Produktion dar, und werden deshalb hier nicht weiter berücksichtigt. Hauptanbaugebiete der Kartoffel liegen mit knapp 50% der bundesweiten Anbaufläche und Produktion in Niedersachsen, gefolgt von Bayern mit knapp einem fünftel der Anbaufläche (s. Tabelle 4) aber nur ca. 15% der Erntemenge. Die höchsten Hektarerträge (2000-2005) erwirtschafteten die landwirtschaftlichen Betriebe in Nordrhein-Westfalen, gefolgt von Niedersachsen.

Zuckerrübe (*Beta vulgaris* ssp. *maritima*)

Die Zuckerrübe, deren Wildformen aus dem Mittelmeergebiet stammen, stellt hohe Ansprüche an Klima, Boden und Pflege (Bornscheuer, 1986; Windt und Holtschulte, 2000). Dies hat ihr – auch auf Grund ihrer großen wirtschaftlichen Bedeutung – die Bezeichnung der „Königin unter den Ackerkulturen“ eingebracht. Der ideale Standort ist ein tiefgründiger, steinarm und humusreicher Lehmboden, der gut durchlüftet und locker ist. Daher findet man die Zuckerrübe vorwiegend auf den fruchtbaren Börden Niedersachsens, Sachsen-Anhalts und Sachsens aber auch in warmen Regionen Süddeutschlands und im Rheinland.

Noch anspruchsvoller als der Mais, werden für eine gute Rübenernte Wärmesummen zwischen 2500 und 2900°C benötigt. Während der Hauptwachstumsperiode sind 25°C optimal, für die Bildung des Zuckergehaltes allerdings nur 20-23°C. Dabei beeinflusst die Temperatur den Zu-

ckergehalt besonders in den letzten Vegetationswochen: bei niedrigen Nachttemperaturen steigt der Zuckergehalt an, da die Veratmung gebremst ist (Bornscheuer, 1986; Windt und Holtschulte, 2000). Die Zuckerrübe hat – trotz eines mit 200 l kg⁻¹ TM recht geringen Transpirationskoeffizienten – auf Grund der hohen Biomasseerzeugung einen relativ hohen Wasserbedarf. Damit wird fehlender Niederschlag in Ostdeutschland in den meisten Fällen zum ertragsbegrenzenden Faktor, was sich in niedrigen Zuckererträgen widerspiegelt. Da im Zuckerrübenanbau häufig bewässert wird, entscheidet neben standörtlichen Faktoren allerdings auch die Infrastruktur für Bewässerung über die Ertragsleistung.

Von insgesamt 444 000 Hektar Anbaufläche im Jahre 2005 befand sich ca. ein viertel in Niedersachsen, gefolgt von Bayern und Nordrhein-Westfalen (s. Tabelle 4). Bei hoher Flächen- und Arbeitsproduktivität steht einer weiteren Zunahme des Anbaus vor allem die Kontingentierung innerhalb der EU entgegen. Der mittlere Hektarertrag betrug im selben Jahr 584 dt ha⁻¹, wobei die Erträge jedoch regional großen Schwankungen unterliegen: einem langjährigen Trend folgend (Bornscheuer, 1986), werden die größten mittleren Erträge (2000-2005) in Bayern registriert, an zweiter bzw. dritter Stelle rangiert Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. Dies ist ein Ergebnis der höheren Wärmesummen in Süddeutschland und spiegelt sich auch im Europäischen Vergleich wider: hier nimmt Deutschland eine Mittelstellung ein; Spitzenerträge werden unter den besonders günstigen klimatischen Bedingungen u.a. Frankreichs und der Niederlande erzeugt; der geringste Zuckerertrag

wird u.a. in Irland erzeugt (European Commission, 2005; Jones *et al.*, 2003).

Raps (*Brassica napus*)

Im Gegensatz zur Zuckerrübe findet Winterraps in den nördlichen Bundesländern mit maritimem Klimaeinfluss optimale Anbaubedingungen (Lütke-Entrup, 1986a; Makowski, 2000a). Neben den kühlen Sommertemperaturen wirkt sich auch die hohe relative Luftfeuchtigkeit, die den Wasserhaushalt schont, günstig für die Ertragsbildung aus. Des Weiteren stellt Raps hohe Ansprüche an die Tiefgründigkeit und den Garezustand des Bodens, was sich u.a. in der Korrelation zwischen Bodengüte und Ertrag ausdrückt. Der pH-Wert sollte möglichst im neutralen Bereich liegen. Als Vorfrucht für Raps eignen sich alle früh-räumenden Anbaukulturen – idealer Weise Frühkartoffeln – um eine ausreichende Jugendentwicklung im Herbst und damit eine ausreichende Abhärtung für die Wintermonate zu garantieren. Wenig geeignet als Vorfrüchte sind spät räumende Getreidesorten, wie z.B. Winterweizen oder Hafer. Raps besitzt eine geringe Winterfestigkeit, wodurch insbesondere in weiten Teilen der östlichen Bundesländer durch Kahlfröste die Gefahr des Auswinterns besteht. Ein weiterer Nachteil von Getreide vor Raps liegt in dem hohen C/N-Verhältnis des Strohes, das jedoch durch Stickstoffgaben verbessert werden kann.

Winterraps wurde in Deutschland im Jahr 2005 auf einer Fläche von rund 1,3 Millionen Hektar angebaut und befand sich damit in der gleichen Größenordnung wie der Anbau von Wintergerste und Silomais.

Der Anbau von Sommerraps und Rübsen macht weniger als 2% des gesamten Raps- und Rübsenanbaus dar und wird hier nicht näher behandelt. Mecklenburg-Vorpommern besitzt die größte Anbaufläche und zusammen mit Schleswig-Holstein auf Grund der günstigen klimatischen Bedingungen die höchsten Hektarerträge (s. Tabelle 4). Wegen des hohen Vorfruchtwertes von Raps innerhalb getreidereicher Fruchtfolgen und seiner zunehmenden Vermarktung als Energiepflanze (s. Kapitel 3.5.2.2), steigen die Anbauflächen jedoch bundesweit.

Sonstige Blattfrüchte

Die *Sojabohne (Glycine soja)* hat als Lieferantin hochwertigen Eiweißes und Öles viele Verwendungsmöglichkeiten und entwickelte sich deshalb im Weltmaßstab zur Leguminose mit der umfangreichsten Anbaufläche (Makowski, 2000b). Diese frostempfindliche Kurztagspflanze³⁷ hat hohe klimatische Ansprüche: so sollte die Temperatur nach Vegetationsbeginn möglichst schnell Werte von 8-10°C erreichen, um eine frühe Aussaat zu ermöglichen. Während der Entwicklung bis zur Ernte sind Temperaturen von 16-18°C ideal. Sinken die Temperaturen zum Blühbeginn unter 8°C, findet keine Befruchtung statt und die Blüten werden abgeworfen. Während der Zeit zwischen Blüte und Beginn der Kornausbildung sind auch höhere Niederschläge erforderlich. Ansonsten sind die Ansprüche der relativ trockenstresstoleranten Sojabohne an die Wasserversorgung eher gering.

³⁷ Unter Langtagbedingungen wird die vegetative Entwicklung gefördert und die generative verzögert.

In Deutschland ist ihr Anbau bisher marginal; mit der Verfügbarkeit bzw. Züchtung frühreifer und tagneutraler Sorten könnte sich der Sojabohnenausbau in Deutschland jedoch etablieren.

3.3.3 Grünland

Dauergrünland findet sich vor allem in folgenden Lagen: in Küstennähe sowie in den höheren Lagen der Mittelgebirge und Süddeutschlands mit höheren Niederschlägen, niedrigeren Temperaturen und einer kürzeren Vegetationsperiode; unter ungünstigen Wachstumsverhältnissen bei mangelnder Entwässerung, Staunässe und Überschwemmung; und auf schweren, flachgründigen oder steinigen Böden sowie in Hanglage (Pierre und Rieder, 2000). Die Zusammensetzung der Grünlandgesellschaften ist in Abhängigkeit der Nutzung bzw. Nutzungshäufigkeit als Weide oder Maat und des Klimas stark variabel (Lütke-Entrup, 1986b). Während in Norddeutschland grasreiche Mischungen dominieren, werden in Süddeutschland Leguminosen und Kräuter stärker durch die hohe Lichteinstrahlung in höheren Lagen gefördert. Allerdings werden Klee-Gras-Mischungen zunehmend durch die höhere Produktivität reiner Grasmischungen und von Silomais verdrängt – es sei denn, höhere Protein- und Nährstoffgehalte (insbesondere von P, K und Ca) von Leguminosen-Beimischungen werden angestrebt. Darüber hinaus überwiegt im maritimen norddeutschen und nordwestdeutschen Klimabereich die Weidenutzung; in Süddeutschlands kontinentalerem Klima mit ausgeprägter Sommerdepressi-

on im Wachstum die Wiesen-Schnittnutzung.

Allgemein gilt, dass der Boden einen geringen Einfluss auf die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes hat; entscheidend sind dagegen die Wasser- und Nährstoffversorgung sowie die Bewirtschaftung. In Bezug auf die Wasser- und Wärmeversorgung gilt die Faustregel, dass Höchstträge bei warmem Frühjahr und feuchtem Sommer erwirtschaftet werden, niedrige Erträge im gegenteiligen Fall. Wegen des hohen Einflusses der Jahreswitterung auf die Produktivität von Grünlandstandorten ist auch die Verbesserung der Ertragsleistung durch Züchtungsfortschritte im Grünland im Vergleich zu Ackerkulturen schwerer zu dokumentieren. Ein weiterer Faktor ist die stärkere Heterogenität der Grünland-Pflanzenbestände. Neben der Futtermenge sind der Rohfaser- sowie der Rohproteingehalt für den Futterwert bzw. die physiologische Verdaulichkeit entscheidend; ersterer nimmt mit zunehmendem Pflanzenwachstum zu, letzterer ab.

Von den 4,9 Millionen Hektar Dauergrünland in Deutschland im Jahr 2005 waren 4,1 Millionen Hektar intensiv bewirtschaftete Wiesen und Mähweiden. Der Rest sind extensiv bewirtschaftete Weiden, Hutungen und Streuwiesen. Etwa ein viertel der Grünlandflächen finden sich im Flächenstaat Bayern, an zweiter Stelle befindet sich Niedersachsen (s. Tabelle 4). Dabei wurde in Bayern laut BN seit 1980 der Grünlandanteil um 220 000 Hektar reduziert und in Wald oder Ackerland für den boomenden Anbau von Energiepflanzen, wie Mais, umgewandelt (s. Kap. 3.5.2.2). Mit dem Wegfallen der Milchquoten 2015

könnte sich diese Entwicklung noch beschleunigen, was gravierende Auswirkungen auf das Landschaftsbild und den Tourismussektor haben wird, der in Bayern von der Freilandtierhaltung profitiert (Etscheid, 2007). Wie aus derselben Tabelle ersichtlich, unterscheidet sich nicht nur die Größe der Anbauflächen erheblich zwischen den einzelnen Bundesländern sondern auch die Höhe der Hektarerträge. Hier führen Landwirte Niedersachsens mit einem durchschnittlichen Hektarertrag von 108 dt (2000-2005), das Schlusslicht bilden Landwirte Brandenburgs mit durchschnittlich nur 55 dt ha⁻¹.

3.3.4 Sonderkulturen

Obstanbau

Im Allgemeinen hängt der Obstbau weniger von der Beschaffenheit des Bodens ab, sondern vor allem vom Klima und standortunabhängigen sozioökonomischen Faktoren. Während kleinflächiger Streuobstbau in fast allen Klimaregionen vorkommt, wird großflächiger Streuobstbau hauptsächlich in niederschlagsarmen, thermischen Gunsträumen betrieben. Lokalklimatisch gesehen sind warme, sonnige Hanglagen mit geringem Spätfrostisiko am günstigsten. Das Spektrum der optimalen Niederschlagsmenge reicht von jährlich 500 mm (Süßkirsche) bis 750 mm (Pflaume), die Durchschnittstemperatur der Monate Mai bis September sollte nicht unter 16-17°C liegen. Der Einfluss des Lichtes, d.h. die Sonnenstundenzahl ist in Mitteleuropa in freiem Gelände kein begrenzender Faktor.

Günstig sind vor allem Böden mit ausreichendem Nährstoffgehalt und großer Bodenaktivität; ungünstig dagegen schwere, dichte Böden, Moor- sowie mineralische Nassböden, sehr trockene Sand- und Kiesböden und extrem frostgefährdete Bereiche in Mulden und Senken. Hitzestress kann zu Verbräunungen, Nekrosen, Sonnenbrand und Vertrocknen der Früchte führen. Kältestress hat nicht nur direkte Auswirkungen auf den Ertrag durch Erkältungen und Erfrierungen, auch im Folgejahr schränkt erhöhtes Triebwachstum die Ertragsmenge ein.

Die Erntemenge für Marktobst³⁸ belief sich 2005 auf 1,1 Millionen Tonnen. Wichtigstes Marktobst ist der *Apfel*, der auf ca. 31 000 Hektar angebaut wurde und über 0,85 Millionen Tonnen Ertrag lieferte. Die größten Anbauflächen finden sich in Baden-Württemberg, v.a. in der klimatisch begünstigten Bodenseeregion, mit insgesamt ca. 10.000 Hektar, gefolgt von Niedersachsen („Altes Land“) mit ca. 6.600 Hektar im Jahr 2005 und Sachsen. Die restlichen Anbauflächen verteilen sich relativ gleichmäßig auf das Bundesgebiet. Der mittlere Hektarertrag (2000-2005) betrug für das Bundesgebiet 27,6 Tonnen. Dabei fanden sich die höchsten mittleren Erträge in Sachsen (32,3 t), die niedrigsten im Saarland, bzw. in Mecklenburg-Vorpommern (18,2 bzw. 18,8 t).

Neben dem Anbau von Äpfeln gewinnt die Produktion von *Erdbeeren* zunehmend an Bedeutung: so wurde ihre Anbaufläche in den letzten sechs Jahren um fast 40% auf knapp 13 500 Hektar im Jahr 2005 ausgedehnt. Am bedeutendsten ist der Anbau in

³⁸ ohne Strauchbeerobst, einschließlich Erdbeeren

Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Baden-Württemberg mit ca. zwei Drittel der Anbaufläche. Die Spannweite der Erträge ist recht hoch: bei einem durchschnittlichen Hektarertrag von 104,8 dt (2000-2005) weist Nordrhein-Westfalen die höchsten mittleren Erträge mit 122,6 dt auf und Brandenburg mit 51,3 dt die niedrigsten.

Weinanbau

Auf Grund relativ enger klimatischer Ansprüche ist die Produktion von gutem Wein auf der Nordhalbkugel in etwa auf die Region zwischen dem 40sten und dem 50sten Breitengrad begrenzt (Kartschall *et al.*, 2005). Die deutschen Weinanbaugebiete liegen damit am nördlichen Rand des europäischen Verbreitungsgebietes und konzentrieren sich demzufolge überwiegend auf den Süden und Südwesten des Landes. Darüber hinaus wird durch den bevorzugten Anbau in Flusstälern an nach Süden ausgerichteten Hängen die Sonneneinstrahlung erhöht und ein günstiges Mikroklima erzeugt. International bekannt ist Deutschland vor allem durch die Produktion von leichteren Weißweinen, insbesondere dem Riesling (Mrasek, 2004).

Im Jahr 2005 wurden in Deutschland etwas über 9 100 000 Hektoliter Weinmost von insgesamt 98 875 Hektar Rebfläche produziert, was einem Mittel von 92,1 Hektolitern pro Hektar entspricht. Davon entfielen fast 90% auf die Anbaugebiete in Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg; weitere wichtige Weinbaugebiete sind Franken in Bayern und der Rheingau in Hessen. Die restlichen Anbaugebiete sind in Bezug auf die produzierte Menge zu

vernachlässigen (Tabelle 4). Dabei schwanken die mittleren Hektarerträge (2001-2005) erheblich zwischen den einzelnen Anbaugebieten: die höchsten Erträge werden in Rheinland-Pfalz mit 99,3 hl ha⁻¹, die niedrigsten in Sachsen mit 42,7 hl ha⁻¹ erwirtschaftet. Allerdings ist bei einem Qualitätsprodukt wie Wein neben der Menge v.a. auch die Qualität des Produktes entscheidend. Der höchste Anteil an Qualitätsweinen mit Prädikat am Gesammost wird in den Hessischen Weinbaugebieten mit knapp über 80% erreicht, die baden-württembergischen und fränkischen Weinbaugebiete folgen mit 68 bzw. 66%. In Rheinland-Pfalz, mengenmäßig das bedeutendste Bundesland bei der Weinerzeugung, liegt der Anteil um 8% unter dem Bundesdurchschnitt von 51%. Schlusslicht ist das Saarland mit nur 16% Prädikatswein im Mittel der letzten 5 Jahre.

Interessanter Weise gibt es seit 2005 die ersten tragenden Weinbaugebiete in Mecklenburg-Vorpommern, was durch die Klimaerwärmung begünstigt sein dürfte. Auch ein steigender Anteil an Rotmost spiegelt – neben geänderten Präferenzen im Konsumentenverhalten (mündliche Mitteilung Hr. Rupp, Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau (LVWO) Baden-Württemberg) – bereits die Klimaerwärmung wieder, da Wein wie kaum eine zweite Kulturart ein Wärmezeiger ist und Rotweine mehr Wärme benötigen (Tabelle 5): waren es im Jahr 2000 erst 25% Rotwein, so steigerte sich dieser Anteil auf 37% im Jahr 2005.

Entsprechend dem Anstieg im Huglin-Index von ca. 200 H innerhalb der letzten

Jahrzehnte (z.B. Kartschall *et al.*, 2005) werden in Süddeutschland bereits wärmeverwöhnte Sorten wie z.B. Cabernet Sauvignon oder Merlot angebaut (KLARA-Net, 2006; Daten des Statistisches Landesamtes Rheinland-Pfalz zitiert in Landwirtschaftskammer Rheinland-Pfalz, 2006). Allerdings spielt neben der klimatischen Eignung auch die Tradition im Weinanbau eine große Rolle: während die Dominanz von Rotwein (z.B. Trollinger, Schwarzriesling) im Württembergischen eine gewachsene Tradition hat, ziehen sich entlang des klimatisch begünstigten Rheintals die traditionellen Weißweinanbaugebiete Deutschlands (Müller-Thurgau, Grauburgunder und Riesling; Kartschall *et al.*, 2005).

Gemüseanbau

Auf Grund steigender Nachfrage (DGE, 2004) unterlag die Produktion von Gemüse innerhalb der letzten Jahre einer Steigerung. Dabei wurde insbesondere der Spargelanbau stark ausgedehnt; Anbauflächen traditioneller Gemüsesorten, wie die verschiedenen Kohlgemüse sanken dagegen (Hahlen, 2006). In Deutschland erfolgt der größte Anteil des Gemüseanbaus im Freiland. Davon befinden sich ca. 20% unter Folien, die einen früheren Anbau ermöglichen und eine wichtige Rolle bei der Abwehr von Schädlingen, der Unkrautbekämpfung und der Minderung des Produktionsrisikos spielen (KTBL, 2005). Im Jahr 2005 wurden auf insgesamt 104 800 ha knapp 3 Millionen Tonnen Gemüse geerntet. Am weitesten verbreitet ist der Freiland-Gemüseanbau in Nordrhein-Westfalen, gefolgt von Niedersachsen und

Bayern. Auf Grund der regional unterschiedlich vorherrschenden Gemüsesorten schwanken die Hektarerträge erheblich: bei einem bundesweiten Durchschnitt (2000-2005) von 29,5 Tonnen, liegt er in Schleswig-Holstein durch einen hohen Anteil an Weißkohl bei 62,6 t in Sachsen bei nur 15,8 t.

Tabelle 5: Anbaueignung ausgewählter Rebsorten nach dem Wärmesummenindex H nach Huglin (aus Kartschall *et al.*, 2005 nach Huglin, 1978 und 1986). Der Huglin-Index ist eine Wärmesumme über Tagesmittel und Tagesmaximumwerte der Lufttemperatur im Zeitraum von April bis September.

Huglin-Index H	Ausgewählte anbauwürdige Rebsorten
H<1500	Kein Anbau empfohlen
1500<H<1600	Müller-Thurgau
1600<H<1700	Pinot blanc, Gamay noir
1700<H<1800	Riesling, Chardonnay, Sylvaner, Sauvignon blanc, Pinot noir
1800<H<1900	Cabernet franc, Spätburgunder
1900<H<2000	Chenin blanc, Cabernet Sauvignon, Merlot
2000<H	Ugni blanc, Grenache, Syrah, Carrignan, Aramon

Der Ertrag im Unterglasanbau lag mit durchschnittlich 96,4 t ha⁻¹ deutlich höher. Hier wurden 2005 auf insgesamt 1292 Hektar empfindliche und wärmebedürftige Gemüsesorten, wie v.a. Gurken, Tomaten, Kopf- und Feldsalat angebaut. Die Hauptanbaugebiete liegen mit 34% der Unterglasanlagen in Baden-Württemberg, gefolgt von Bayern und Nordrhein-Westfalen. Die Hektarerträge wiesen innerhalb der letzten Jahre einen positiven Trend auf.

Sonstige Kulturen

Die Produktion von *Zierpflanzen* nahm zwischen 2000 und 2004 mit einer Erweiterung der Anbauflächen um über 30% beachtlich zu. Dabei ging gleichzeitig der Unterglasanbau zugunsten des Freilandanbaus zurück, der 2004 etwas über 7600 Hektar von bundesweit insgesamt fast 10200 Hektar ausmachte. Begleitet wurde dieser Wandel von einem Rückgang der Produktion empfindlicher Topfpflanzen unter Glas und einer Zunahme des Freilandanbaus robusterer Zierpflanzen, wie v.a. Erika und Rosengewächsen. Am stärksten verbreitet ist die Zierpflanzenproduktion in Nordrhein-Westfalen mit fast 40% der bundesweiten Anbauflächen, gefolgt von Niedersachsen, Bayern und Baden-Württemberg.

Baumschulen wurden im Jahr 2004 von ca. 1% der landwirtschaftlichen Betriebe auf insgesamt 25520 Hektar bewirtschaftet. Im Vergleich zum Jahr 2000 verzeichneten die Anbauflächen damit ein leichtes Plus von 3%. Die Baumschulen dienen in erster Linie der Produktion von Ziergehölzen und Bäumen für städtische Grünanlagen. Erst danach rangiert die Aufzucht von Forst- und Weihnachtsbäumen, Obstbäumen und gärtnerischen Ziergehölzen, wie z.B. Rosen. Die Baumschulen konzentrieren sich auf die Länder Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein mit über 60% der bundesweiten Flächen.

Auf Grund ihrer relativ hohen Wertschöpfung ist noch der Anbau von *Heil- und Gewürzpflanzen*, *Hopfen*, und *Tabak* erwähnenswert. *Heil- und Gewürzpflanzen* wurden 2005 auf 6300 Hektar in Deutsch-

land angebaut, wobei mehr als die Hälfte des Anbaus in Bayern, Thüringen und Hessen erfolgt. Wichtigstes Anbaukriterium ist die Kontaminationsfreiheit des Standortes; weitere wichtige Produktionsbedingungen sind günstige Trocknungskosten (KTBL, 2005). *Hopfen* wurde 2005 auf insgesamt 17300 Hektar angebaut. Dabei erfolgt über 80% der Produktion auf den tiefgründigen lehmigen Sandböden der Hallertau in Bayern; weitere Anbaugebiete finden sich in Tettngang am Bodensee in Baden-Württemberg und in der Elbe-Saale-Region Sachsens, Sachsen-Anhalts und Thüringens (KTBL, 2005). Der Wärme liebende *Tabak* wurde 2005 auf 4600 Hektar angebaut, wovon über 80% auf Anbauregionen in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern entfallen.

3.3.5 Der Hitzesommer 2003 (2006) als Beispiel von Extremwirkungen auf die pflanzliche Produktion

Auf Grund der in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten spezifischen Witterungsansprüche der betrachteten Kulturen fiel die Ertragsdepression im Hitzesommer 2003 (bzw. 2006) entsprechend unterschiedlich aus. Zusätzlich traten in diesem Jahr häufig Kahlfröste im Februar bzw. Trockenheit seit Februar auf, was die Entwicklung der Kulturen bereits vor der sommerlichen Dürreperiode beeinträchtigte (ProClim, 2005). Da der Hitzesommer 2003 häufig als Vorausschau auf künftige Klimabedingungen gewertet wird, geben die in diesem Jahr beobachtete Ertragsreaktionen Hinweise auf zukünftige Auswir-

kungen von Klimaveränderungen, auf die näher im Kapitel 4.6 eingegangen wird.

Getreide

Für *Winterweizen* betrug die Ertragseinbußen bundesweit 12% (Tabelle 4). Besonders hoch waren sie auf Grund der häufig ungünstigeren Standortbedingungen in Brandenburg und Sachsen. Auch in den südlichen Bundesländern lagen die Erträge unter dem bundesweiten Durchschnitt. Am höchsten waren diese im feuchteren und kühleren Norden und Nordwesten Deutschlands. In Schleswig-Holstein z.B. wurden 2003 mit 86 dt ha⁻¹ noch 95% des mehrjährigen Ertragsdurchschnittes (2000-2005) erzielt. Dieses Nord-Südgefälle bei Ernteverlusten in Deutschland spiegelt den europaweiten Trend im Jahr 2003 wider (EEA, 2004). Dabei waren die Ertragseinbrüche bei Winterweizen, wie generell für Winterungen, die ihr Wachstum zu Beginn der Hitzewelle 2003 bereits fast abgeschlossen hatten, deutlich geringer als bei Sommerungen, wie z.B. Mais.

Auch im Sommer 2006 wurden auf Grund des extrem heißen und trockenen Julis erhebliche Ertragseinbußen erwartet (LfL, 2006). Mit ähnlichen Ernteschätzungen für Winterweizen wie im Mittel der letzten Jahre und nur wenigen Prozent unter dem Vorjahresergebnis erfüllten sich die Prognosen jedoch nicht (BMELV, 2006 zitiert in LfL, 2006). Zum Teil führte der heiße Sommer auch zu einer besonderen Getreide- bzw. Backqualität (Seling und Lindhauer, 2006). Allerdings fielen die Ernteergebnisse regional je nach Wasserversorgung sehr unterschiedlich aus: die größten Verluste trafen wiederum die Landwirt-

schaft in Sachsen und Brandenburg mit im Vergleich zum Vorjahr ca. 16 bzw. 9% geringeren Getreidehektarerträgen (Stat. Bundesamt, September 2006, zitiert in LfL, 2006). Deutschlandweit betrug der Hektarertrag ca. 2,4% weniger als im Vorjahr und ähnelt damit dem mittleren europäischen Minderertrag von ca. 3,6% (MARS, 2006).

Der *Wintergersten*-Anbau erlitt im Extremsommer 2003 in fast allen Bundesländern drastische Ertragseinbußen (Tabelle 4). Der bundesweit gemittelte Minderertrag lag mit 11 dt ha⁻¹ unter dem mehrjährigen Mittel sogar über dem von Winterweizen mit nur 8 dt ha⁻¹, wofür wahrscheinlich zusätzlich zur sommerlichen Dürreperiode Auswinterungsschäden und das trockene Frühjahr verantwortlich waren. Wie auch schon für Winterweizen beobachtet, verzeichnete Brandenburg gefolgt von Sachsen 2003 die geringsten Hektarerträge; in Schleswig-Holstein waren diese mit 79,6 dt im selben Jahr wiederum recht hoch. Im jüngsten Trockenjahr 2006 wurden dagegen bundesweit überdurchschnittlich gute Erträge erwirtschaftet (BMELV 2006 zitiert in LfL, 2006), da Wintergerste auf Grund ihrer raschen Entwicklung im Jahresverlauf dem Dürrestress weitgehend entging.

Sommergerste erlitt 2003 nur in dem durch die anhaltende trockene Hitze und leichte Böden besonders vulnerablen Brandenburg Ertragsverluste, auf das allerdings nur ca. 2% der Anbaufläche entfallen. Auch in ihrem langjährigen Feldversuch in Berlin konnten Chmielewski und Köhn (1999) die Ertragsvariabilität von Sommergerste (sowie Hafer) zu beinahe 60%

mit Witterungseinflüssen erklären. In allen übrigen Bundesländern – und insbesondere in den Hauptanbaugebieten – blieben die Erträge stabil und entsprachen mit 48 dt ha⁻¹ dem mehrjährigen Mittel. Im Jahr 2006, in dem sich die Kombination aus einem späten Aussaattermin auf Grund des lang anhaltenden Winters und der extremen Hitze im Sommer als ungünstig erwies, zeichneten sich dagegen Ertragsverluste bei der Sommergerste von knapp 15% im Vergleich zum mehrjährigen Mittel ab, die jedoch im Vergleich zu den anderen Sommerungen noch relativ gering ausfielen (BMELV 2006 zitiert in LfL, 2006). Für *Körnermais* und *CCM* lagen die Erträge in diesem Jahr z.B. bei ca. 18% unter dem mehrjährigen Durchschnitt (BMELV 2006, zitiert in LfL, 2006). Auch im Extremsommer 2003 waren die Einbußen mit bundesweit ca. 13% bzw. 16% für Silo- bzw. Körnermais relativ hoch (Tab. 4) mit überdurchschnittlichen Ertragsausfällen in Sachsen-Anhalt, Brandenburg und z.T. auch Sachsen.

Trotz seiner geringen Ansprüche kam es auch bei *Roggen* 2003 zu deutlichen Ertragseinbußen von durchschnittlich fast 20 Prozent (Tab. 4), was auf den extremen Hitzestress und Wassermangel bereits während der Jugendentwicklung zurückzuführen war. Den größten Rückgang verzeichneten wiederum Brandenburg und Sachsen sowie Bayern.

Blattfrüchte

Bei *Kartoffeln* führten die in diesem Jahr für Hackfrüchte besonders ungünstigen Witterungsbedingungen zu empfindlichen Ertragseinbußen von durchschnittlich 16%

(s. Tabelle 4). Auch die Hitze machte der Kartoffel zu schaffen, die für eine gute Ertragsentwicklung kalte Nächte braucht (mündliche Mitteilung Donat-Peter Häder von der Universität Erlangen-Nürnberg, 2006). Die stärksten Ertragseinbrüche erlebte Sachsen mit fast 25%, die geringsten wiederum Schleswig-Holstein, allerdings auf einem insgesamt niedrigen Ertragsniveau. Auch für 2007 werden z.T. auf Grund der Hitze und Trockenheit im April erhebliche Ertragsverluste erwartet.

Der *Zuckerrübenanbau* verzeichnete im Extremjahr 2003 Ernteverluste von „nur“ 9% im Bundesdurchschnitt, wobei jedoch Mindererträge zum Teil durch relativ höhere Zuckerwerte kompensiert wurden (Kraus, 2004; Buhrmann *et al.*, 2004). Die größten Verluste erlitten mit fast 25% Zuckerrübenproduzenten in Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg; in Mecklenburg- und Niedersachsen lagen die Ergebnisse dagegen sogar leicht über dem mehrjährigen Durchschnitt (2000-2005; s. Tabelle 4).

Dagegen erlitt Winterraps im Jahr 2003 wiederum deutliche Ertragseinbußen – im bundesweiten Mittel 16 Prozent im Vergleich zum mehrjährigen Durchschnitt. Am geringsten fielen diese in Niedersachsen und Schleswig-Holstein aus, am stärksten in Brandenburg (s. Tabelle 4).

Grünland

In Brandenburg gefolgt von Sachsen-Anhalt wies auch die Grünlandwirtschaft die niedrigste Produktivität im Extremjahr 2003 auf; selbst im am wenigsten betroffenen Bundesland, Mecklenburg-

Vorpommern, lag diese noch 13% unter dem mehrjährigen Mittel (Tabelle 4). Im bundesweiten Durchschnitt lagen die Ertragsverluste mit 20% deutlich über denjenigen der Ackerkulturen, was nochmals die Bedeutung des Witterungseinflusses auf die Ertragsentwicklung von Grünland unterstreicht. Auch 2006 führte die Trockenheit zu einer verringerten Biomasseproduktion und zu der Notwendigkeit der teureren Zufütterung (MARS, 2006).

Damit bestätigen diese auf sehr speziellen Wachstumsbedingungen während der Vegetationsperiode 2002/3 beruhenden Ertragsdepressionen nur teilweise die langjährigen Beobachtungen von Hertstein *et al.* (1994), nach denen der allgemeine Ertragstrend bei den Getreidearten, beim Grasanbau und im Dauergrünland am wenigsten durch jährliche Witterungsschwankungen beeinflusst wird, wohingegen deren Bedeutung für Raps und Rüben, Zuckerrüben, Kartoffeln, Silomais, Klee und Klee-Gras bis hin zur Luzerne in dieser Reihenfolge zunimmt.

Sonderkulturen

Bei *Äpfeln* betrug die Erntemenge 2003 bundesweit 95% des mehrjährigen Durchschnitts, wobei nur Rheinland-Pfalz bedeutende Ernteverluste erlitt. Die Apfel-ernte in Sachsen-Anhalt und Brandenburg war dagegen überdurchschnittlich gut. Neben unterschiedlich robusten Sorten spielen hier Aspekte wie Beregnungsmöglichkeiten, Lage im Gelände³⁹, Baumzahl pro Hektar und Habitus (klein, (spalier)-

bis normalwüchsig) eine Rolle, da größere Apfelbäume in der Regel über ein entsprechend größeres Wurzelsystem verfügen und damit Wasser aus tieferen Bodenschichten erschließen können.

Die Erträge der *Erdbeeren* lagen bundesweit 13% unter dem sechsjährigen Durchschnitt, mit fast 30% Verlusten in Sachsen und Thüringen und 5% mehr Erträgen in Sachsen-Anhalt. Dabei wurden geringere Mengen allerdings durch eine gute Qualität kompensiert. Die gleiche Situation stellte sich 2007 nach dem extrem trockenen und sonnigen April dar.

Auch im *Weinanbau* hatte das Trockenjahr 2003 geringere Weinmengen zur Folge: im bundesweiten Schnitt lagen die Mosterträge 11% unter dem mehrjährigen Mittel (Tabelle 4). Unter den bedeutenden Weinbaugebieten war die Mostmenge am deutlichsten in Baden-Württemberg (19%) reduziert, am wenigsten in den hessischen Weinbaugebieten (3%). Allerdings führte der heiße Sommer mit einem extrem hohen *Huglin-Index* (Schultz *et al.*, 2005) auch zu Spitzenjahrgängen beim Wein: in allen Bundesländern nahm der Anteil von Prädikatsweinen am Gesamtmost zu, insbesondere bei Rotweinen (Schultz *et al.*, 2005) sowie Weißweinen klimatisch weniger begünstigter Anbauregionen. So profitierten Baden-Württemberg und Bayern besonders deutlich mit einem fast 30%igen Anstieg. Mit am geringsten war der Anstieg in den rheinland-pfälzischen (Weiß-)Weinanbaugebieten mit nur 6%; im bundesweiten Mittel betrug die Zunahme 13%. Im Allgemeinen zeichnete sich dieser Jahrgang auch durch besonders hohe Öchsle-Zahlen aus. Allerdings gab es

³⁹ So spielten neben dem Hitzesommer auch späte Fröste für die Ertragsverluste 2003 eine Rolle (COPA-COGECA, 2003)

auch einige Verlierer: der Riesling z.B. braucht für eine gute Ertragsentwicklung kalte Nächte (Häder, Universität Erlangen-Nürnberg, 2006); bei hohen Außentemperaturen wird die Äpfelsäure in den Trauben abgebaut, was bei Weißweinen zu Bouquet-Armut führen kann (Schultz in Mrasek, 2004). Zusätzlich treten durch die größere Hitze und raschere Vegetationsentwicklung beim Weißwein vermehrt Aromafehler⁴⁰ auf, die diesen im schlimmsten Fall ungenießbar machen.

Im *Gemüseanbau* zeigte sich in der Unter-
glasproduktion kein Ertragsrückgang, da diese abgesehen von einer stärkeren Aufheizung bei höheren Temperaturen (Bindi und Howden, 2004) relativ unempfindlich gegenüber äußeren Klimabedingungen ist. Dagegen kam es im Freilandanbau 2003 trotz weit verbreiteter Bewässerung zu Ertragseinbußen von bundesweit durchschnittlich 7%. Dabei war die Spannweite in Abhängigkeit von Pflanzzeit sowie sortenspezifischer Ansprüche an Temperatur und Wasserversorgung beträchtlich und reichte von Verlusten von 18% für Speisewiebeln, einer determinierten Gemüseart, bis hin zu Ertragszuwächsen von wenigen Prozent bei einigen Kohlsorten. Diese Temperatursensitivität von Zwiebeln wurde bereits von Wheeler *et al.* (1995) beschrieben, die eine negative Korrelation zwischen Zwiebeltrockenmasse und Durchschnittstemperatur fanden. Für Karotten betrug der mittlere Ertragsverlust

6%, der sich auf 1% für frühe, und 8% für späte Karotten aufteilte. Eine detaillierte Aufschlüsselung nach Gemüsearten ist auf Grund der Vielfalt der angebauten Sorten hier nicht möglich.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ertragsverluste im Extremjahr 2003 mit bis zu 20% für einzelne Produktionszweige erheblich waren. Dabei wurde allerdings ein Teil der geringeren Produktivität durch eine verbesserte Qualität der Produkte ausgeglichen, wie im Falle der Backeigenschaften des Weizens, süßerer Früchte und qualitätreicherer Weine. Allerdings kann der Hitzestress auch zu einer Verschlechterung der Produktqualität führen (s. 4.1.7). Laut COPA-COGECA (2003) belief sich der finanzielle Schaden in der deutschen Landwirtschaft auf 1,5 Mrd € wovon 655 € Mio auf Viehfutter, 388 € auf den Ackerbausektor, 275 € auf Kartoffeln und 100 € auf Zuckerrüben entfielen.

3.4 Verbreitung und Produktionsniveau der Veredelungswirtschaft

Auf Grund sinkender Rentabilität in Folge des Subventionsabbaus ist seit einigen Jahren ein deutlicher Rückgang der Rinderbestände bei gleichzeitigem Ansteigen der Schweinebestände zu beobachten (Statistisches Bundesamt, 2007). Die Schafhaltung spielt in Deutschland – von regionalen Besonderheiten abgesehen – nur eine untergeordnete Rolle und wird hier nicht weiter behandelt. Beim Geflügel liegt der Schwerpunkt auf Mastgeflügel bzw. Legehennenhaltung.

⁴⁰ Winzer sprechen von der UTA, der so genannten untypischen Alterungsnote, die durch chemische Prozesse bei der Mostverarbeitung entsteht. Besonders anfällig sind leichte Weine, wie Riesling, Kerner oder Müller-Thurgau. Je trockener die Wachstumsbedingungen und je früher die Trauben gekeltert werden, desto höher ist offenbar das Risiko.

Die Haltung von Pferden ist der Veredelungswirtschaft nicht im eigentlichen Sinne zuzurechnen. Sie bietet der Landwirtschaft jedoch über die Versorgung von Pensionspferden zusätzliche Einkommensmöglichkeiten. Im Vergleich zu Mitte der 90er Jahre ist die Zahl der Pferde um über 20% auf bundesweit 500 000 im Jahr 2005 zurückgegangen. Schwerpunkte der Pferdehaltung finden sich in Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Bayern und Baden-Württemberg.

Rinderhaltung

Von über 15,6 Millionen Rindern im Jahr 1997 nahm der Bestand auf 12,7 Millionen im Jahr 2006 ab⁴¹. Die höchsten Kopfzahlen finden sich in Bayern mit durchschnittlich 3,74 Millionen Rindern (2001-2006), gefolgt von Niedersachsen (2,64 Millionen), Nordrhein-Westfalen (1,40), Schleswig-Holstein (1,23) und Baden-Württemberg (1,12). Bei dem Rückgang blieb der Anteil an Milchkühen von bundesweit knapp einem Drittel weitgehend konstant. Dank stark ansteigender Milchleistung pro Kuh und Monat von durchschnittlich 465 kg im Jahr 1997 auf 563 kg im Jahr 2005 blieb so die gesamte jährliche Milcherzeugung im gleichen Zeitraum –auf Grund der EU-weiten Milchquotenregelung – weitgehend unverändert bei ca. 28,5 Millionen Tonnen. Die höchste Milchleistung findet sich in den neuen Bundesländern: Spitzenreiter war 2005 Sachsen mit 668 kg Milch pro Kuh und Monat. Die niedrigsten Werte wiesen mit

489 bzw. 496 kg Baden-Württemberg und Bayern auf. Neben bereits angesprochenen Faktoren wie Hofgröße und Spezialisierung der Betriebe spielt hier auch die vorherrschende Milchviehrasse eine entscheidende Rolle: so wird in Ländern mit einem großen Anteil an „Deutscher Holsteiner“ das höchste Niveau bezüglich der Milchmenge erreicht (TMLNU, 2005). Darüber hinaus wird auf Ackerstandorten eine höhere Milchleistung als auf Grünland erzielt, so dass sich hier auch unterschiedlich hohe Anteile an extensiver Weidehaltung an der überwiegend vorherrschenden intensiven Stallhaltung auswirken.

Schweinehaltung

Im Gegensatz zum Rindviehbestand stieg die Zahl der Schweine seit 1997 von 24,4 auf 26,8 Millionen Tiere im Jahr 2006 an. Dabei entfällt mehr als die Hälfte der Schweinemastbetriebe auf die Bundesländer Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen mit 7,8 bzw. 6,2 Millionen Tieren im mehrjährigen Mittel (2001-2006). Auch Bayern (3,7), Baden-Württemberg (2,3) und Schleswig-Holstein (1,4) verfügen über beachtliche Kopfzahlen. Die restlichen Bestände verteilen sich in etwa gleichmäßig über die verbleibenden Bundesländer.

Geflügelhaltung

Die Mastgeflügelhaltung weist seit über 10 Jahren einen deutlich positiven Trend auf (Hahlen, 2006): seit 1994 stieg das Schlachtgewicht von 425 000 Tonnen auf über 1 Million Tonnen im Jahr 2005. Neben einem erhöhten Gesundheitsbewusst-

⁴¹ Die Datengrundlage dieses Kapitel stammt aus den Fachserien des Statistischen Bundesamtes 2003, 2005b, 2006b bzw. 2007.

sein drückt sich in dieser Verbraucherpräferenz auch die Sorge vor Tierseuchen wie vor allem BSE oder auch der Schweinepest aus. So weisen Masthähnchen und Trut- und Perlhühner eine fast 10%ige jährliche Wachstumsrate auf; erstere stellten 2005 55% des Schlachtgewichtes, letztere zusammen 37%. Beide Geflügelgruppen werden überwiegend in Niedersachsen aufgezogen, mit jeweils ca. 50% der bundesweiten Bestände von knapp 57 Millionen Masthähnchen bzw. etwas über 10,5 Millionen Truthühnern. Bei der Hähnchenmast verfügen noch Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Bayern und Sachsen über nennenswerte Bestände; bei der Truthahnmast v.a. Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Sachsen-Anhalt. Dabei ist vor allem unter dem Seuchenaspekt, aktuell der Vogelgrippe, die zunehmende Konzentration der Geflügelhaltung als kritisch zu sehen.

Auch in der *Legehennenhaltung* ist ein Strukturwandel hin zu immer größeren Betrieben zu beobachten: 2005 befanden sich fast 80% der Legehennen in 500 Betrieben mit mindestens 10000 Tieren (Hahlen, 2006). Wie auch im Ackerbau existieren die größten Betriebe in den neuen Bundesländern, allen voran Sachsen mit durchschnittlich rund 116000 Hennenplätzen je Betrieb (Betzholz, 2006). Die meisten Eier werden allerdings in Niedersachsen erzeugt, mit fast einem Drittel der landesweiten Produktion⁴², gefolgt von Nordrhein-Westfalen und Sachsen. Dabei ist die Zahl der Legehennen in Deutschland seit einigen Jahren rückläufig. Ursachen sind gestiegene Produktionskosten

u.a. durch verstärkte Tierschutzaufgaben und fehlende Planungssicherheit bei einem gleichzeitigen Preisverfall durch die EU-weite Aufstockung der Hühnerbestände (TMLNU, 2005). Dies führt dazu, dass Eier zunehmend – insbesondere aus den Niederlanden – importiert werden. Wie auch beim Milchvieh hat die durchschnittliche Legeleistung konstant zugenommen: betrug sie im Jahr 1995 noch 255 Eier pro Henne und Jahr, so waren es 2004 bereits 291 Eier. Neben züchterischen Fortschritten sind v.a. höherwertige Futtermittel und ein verbessertes Bestandesmanagement in den Großbetrieben für diese Entwicklung verantwortlich (Betzholz, 2006).

Der Hitzesommer 2003 (2006) als Beispiel von Extremwirkungen auf die Veredelungswirtschaft

Nach Fischer *et al.* (2005) wurde im Sommer 2003 in Milchproduktionsbetrieben Brandenburgs festgestellt, dass trotz moderner Fütterungstechnik und Stallhaltung Milchkühe in Folge von Hitze und Trockenheit ihre Futteraufnahme um bis zu 15% reduzierten, was mit einer um ca. 10% reduzierten Milchleistung gekoppelt war. Allerdings schlägt sich diese Beobachtung nicht in der Jahresproduktion wider – weder für Brandenburg noch für andere Bundesländer: hier liegen die Milchleistungswerte für 2003 im Trend der kontinuierlich ansteigenden Produktionswerte (2001-2005) und bilden exakt den mehrjährigen Durchschnitt ab. Dagegen wurde in Frankreich (COST-COGEA, 2003) der Rückgang in der Milchproduktion bei starken regionalen Unterschieden auf durchschnittlich 2,7%

⁴² Die Jahresproduktion betrug 2005 9,26 Mrd. Eier.

bezieht. Hinzu kamen höhere Produktionskosten durch die geringere Futterpflanzenproduktion. Auch die Milchqualität wurde durch die Dürre in Mitleidenschaft gezogen: neben geringeren Eiweißgehalten waren auch die Fettgehalte erhöht. Darüber hinaus wurde im Hitzesommer vereinzelt ein Rindersterben auf den Weiden durch das Trinken wahrscheinlich durch Cyano-Bakterien verseuchten Wassers beobachtet (mündliche Mitteilung Mellentin, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2006).

Die Anzahl an *Schweinen* im Hitzejahr 2003 lag genau im Mittel des bundesweiten Jahresdurchschnitts (2001-2006); dagegen fielen die Werte für das nachfolgende Jahr trotz insgesamt ansteigender Tendenz um 3% unter den Wert von 2003. Neben natürlichen Schwankungen könnte sich hier auch eine erhöhte Sterblichkeit bzw. reduzierte Fruchtbarkeit im Hitzejahr 2003 (s. Kapitel 4.4.2) widerspiegeln. Auf die Geflügelhaltung und Eierproduktion in Deutschland hatte der Hitzesommer 2003 keine Auswirkungen. Dagegen kam es v.a. in Frankreich und Spanien zu Verlusten von 15 und mehr Prozent (COST-COGEA, 2003).

3.5 Interaktionen zwischen Landwirtschaft und Klimawandel

Auf der globalen bis hin zur regionalen Ebene ist Landwirtschaft in mehrfacher Hinsicht mit dem Phänomen Klimawandel verknüpft (Abbildung 13): zum Einen trägt die Landwirtschaft zum Klimawandel bei (*Ursache*), zum anderen kann sie aber

auch einen Beitrag zur Minderung klimawirksamer Spurengase, z.B. durch den Anbau alternativer Energiequellen, leisten (*Mitigation*). Darüber hinaus wirkt sich der Klimawandel durch den Anstieg von Temperatur und Treibhausgaskonzentrationen – in erster Linie von CO₂, dem Ausgangssubstrat für die pflanzliche Biomasseproduktion, sowie durch ein verändertes Niederschlags- und Extremwetterverhalten direkt auf die Landwirtschaft aus (*Auswirkungen*). Durch diese unmittelbare Betroffenheit wird sich die Landwirtschaft an den Klimawandel anpassen müssen (*Adaptation*).

Darüber hinaus kann sie einen Beitrag zu weiteren, sektorübergreifenden Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel leisten, wie z.B. im Bereich des dezentralen Hochwasserschutzes oder dem Naturschutz. Während die ersten beiden Aspekte in diesem Kapitel dargestellt werden, werden Auswirkungen der Klimaveränderung und Anpassungsmaßnahmen ausführlich im 4. und 5. Kapitel dieser Studie behandelt. Allerdings können die einzelnen Aspekte nicht isoliert betrachtet werden, da zahlreiche Interaktionen bestehen: während sich Maßnahmen zur Minderung von THG-Emissionen positiv auf Auswirkungen von Klimaänderungen auswirken, können sich Zielkonflikte zwischen Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen ergeben, wie z.B. im Falle des dramatisch zunehmenden Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen (s. 3.5.2.2) und der Notwendigkeit, Lebensmittel in Zukunft verstärkt in klimatischen Gunstregionen anzubauen. Hierzu besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf (Olesen, 2007).

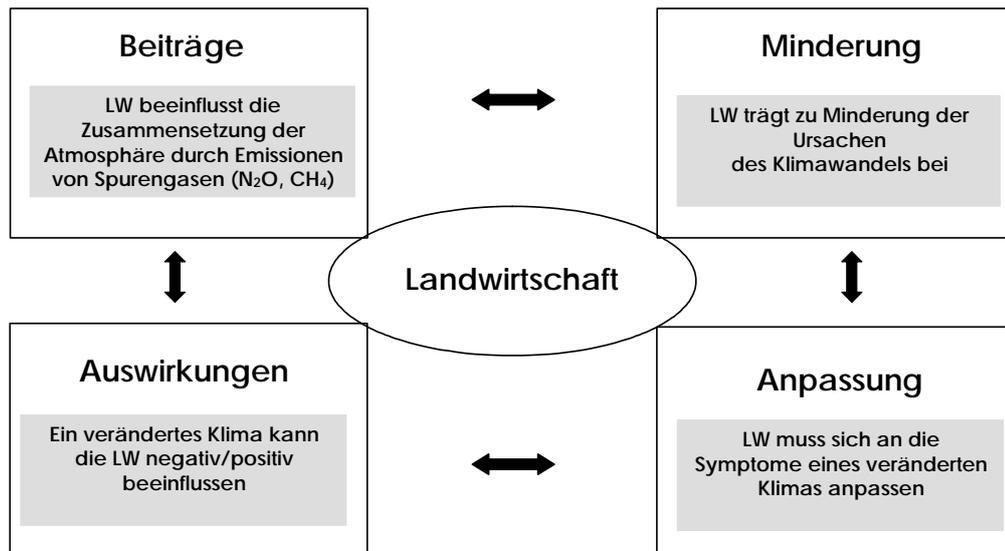


Abbildung 13: Schematische Darstellung der vier Aspekte zu Klimawandel und Landwirtschaft (LW): Beitrag (Ursache), Minderung (Mitigation), Auswirkungen (Impact) und Anpassung (Adaption).

3.5.1 Landwirtschaft als Quelle von Treibhausgasen

Die Landwirtschaft trägt weltweit zu ca. 15-30% zu den anthropogenen Treibhausgasemissionen bei (s. Kapitel 2.1). Abgesehen von der CO₂-Freisetzung in Folge von Landnutzungsänderungen, vor allem durch Verbrennung von Biomasse und Änderungen im Kohlenstoffspeicher der Böden, handelt es sich dabei überwiegend um CH₄- und N₂O-Emissionen. CH₄ entsteht bei anaeroben Umsetzungsprozessen: Hauptquellen sind die Rinderhaltung auf Grund der mikrobiellen Prozesse im Pansen von Wiederkäuern, sowie Nassreisfelder. Die erhöhten N₂O-Ausgasungen sind eine direkte Folge der angestiegenen Stickstoffdüngung seit der „Grünen Revolution“ (z.B. OECD: COM/ENV/EPOC/AGR/CA (2006)24).

Nach Berechnungen des Klimabündnisses Österreich (s. dazu auch www.klimabuendnis.at) verursacht die durch hohen Chemikalien- und Maschi-

neneinsatz sowie Zukauf von Futtermitteln gekennzeichnete industrielle Landwirtschaft pro Hektar Emissionen von 2,3 Tonnen CO₂-Äquivalenten. So belastet z.B. ein Kilogramm Düngemittel die Atmosphäre mit ca. 10 kg CO₂: 6 kg werden bei der Herstellung freigesetzt (und damit im Allgemeinen nicht dem Landwirtschaftssektor angerechnet), weitere 3,5 CO₂-Äquivalente entstehen im Mittel durch die N₂O-Ausgasung von Stickstoffdüngern. Pestizide schlagen gar mit 19 kg CO₂ pro kg Pflanzenschutzmittel zu Buche. Der CO₂-Beitrag durch den Maschineneinsatz in der Landwirtschaft ist im Verhältnis zum Verkehrssektor mengenmäßig dagegen vernachlässigbar. Weltweit werden nach Berechnungen der OECD (COM/ENV/EPOC/AGR/CA (2006)24) durch die Intensivierung der Landwirtschaft die N₂O-Emissionen um mehr als 30% bis 2030 zunehmen. Auch die globale CH₄-Produktion wird auf Grund der wachsenden Weltbevölkerung sowie des zunehmenden Fleischkonsums als Folge des

steigenden Lebensstandards in Entwicklungs- und Schwellenländern weiterhin ansteigen (Lotze-Campen *et al.*, 2006). Die FAO rechnet mit einem Zuwachs der Tierproduktion von 30-50%, wobei Geflügel die stärksten Zuwachsraten aufweisen dürfte (Bruinsma, 2003). Dabei wird der größte Anstieg in den Entwicklungsländern erfolgen, so dass in Anlehnung an die „Grüne Revolution“ von der „Livestock Revolution“ gesprochen wird (Delgado *et al.*, 1999). Dagegen ist in einigen reicheren Ländern ein Rückgang möglich bzw. wird bereits beobachtet, wie z.B. in Deutschland (Hahlen, 2006). Ursächlich sind neben der Globalisierung der Märkte gesundheitliche, ethische und ökologische Bedenken gegenüber einer intensiven Tierhaltung (Aiking *et al.*, 2006). Allerdings kann sich dieser Trend nur dann für den globalen Klimaschutz positiv auswirken, wenn mit der Reduktion auf der Angebotsseite auch eine entsprechende Reduktion auf der Nachfrageseite einhergeht. Ansonsten wird die Produktion insbesondere von Fleisch in andere Regionen verlagert, mit unter Umständen katastrophalen Auswirkungen für den Klimaschutz, wie z.B. bei Abbrennen von tropischem Regenwald für die Rinderzucht.

In Deutschland haben die THG-Emissionen aus der Landwirtschaft im Vergleich zum Jahr 1990 um mehr als 17% abgenommen (BMELV, 2006a). Im Einzelnen führte die Reduktion der (Rind-) Tierbestände zu einer Verringerung der Methanemissionen aus der Wiederkäuerverdauung und dem Wirtschaftsdünger um 24 bzw. 15%. Geringere N-Einträge aus Mineral- und Wirtschaftsdüngern reduzierten die N₂O-Emissionen

um 14 Prozent, und die kontinuierlich gestiegenen Energiepreise führten zu einer energiebedingten CO₂-Einsparung von 51%, die in der Regel mit einer geringeren Bodenbearbeitung einherging. So wird z.B. im ganzen Bundesgebiet auf geeigneten Böden der Trend zur Umstellung auf nicht-wendende Bodenbearbeitung mit größerer Schlagkraft beobachtet, der z.T., wie z.B. in Sachsen, mit (EU-) Fördermitteln unterstützt wurde. Neben Kostengründen (z.B. LAP, 2003), sind hier auch Aspekte des Bodenschutzes, in erster Linie des Erosionsschutzes und des Wasserkonservierens zu nennen⁴³. Als kritisch ist die Bewirtschaftung von entwässerten organischen (Niedermoor-) Böden zu betrachten, da sowohl die Entwässerung als auch die ackerbauliche Nutzung mit 8 bis 60 t CO₂ pro Hektar und Jahr zu einem raschen und über Jahrzehnte anhaltenden Abbau der Kohlenstoffvorräte dieser Böden führt. Mit insgesamt 42 Mt stellt sie ca. 32% der landwirtschaftlichen CO₂-Emissionen in Deutschland dar (BMELV, 2006a).

In Folge von Landnutzungsänderungen, insbesondere der Aufgabe von landwirtschaftlichen Flächen auf Grund von Subventionsabbau im Zuge der Marktliberalisierung und EU-Osterweiterung, ist voraussichtlich mit einem weiteren Rückgang der landwirtschaftlichen Emissionen in Deutschland zu rechnen; steigende Preise für Agrarprodukte könnten diesem Trend allerdings entgegenwirken. In Abhängigkeit vom verwandten Szenarium, könnten 12 bis 25% der Ackerflächen für andere

⁴³ Siehe auch Internetauftritt der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft: <http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/6389.htm> sowie Interviews im Anhang.

Flächennutzungen frei werden (Zebisch *et al.*, 2005; Schröter *et al.*, 2004). Dabei ist die geringste Flächenänderung für das A1f-Szenarium auf Grund seiner Exportorientierung zu erwarten. In Zeiten hoher Energiepreise ist der Anbau nachwachsender Rohstoffe eine interessante Alternative; weitere Möglichkeiten sind die Ausdehnung von ökologischer Landwirtschaft, Bracheflächen für den Naturschutz oder Wiederaufforstung. Selbstverständlich werden solche Entwicklungen auch Auswirkungen auf die sozioökonomische Struktur des ländlichen Raumes haben.

3.5.2 Beitrag der Landwirtschaft zur Minderung von Treibhausgasemissionen

Die Landwirtschaft kann zum einen durch die Verringerung des Ausstoßes von klimaschädlichen Emissionen im landwirtschaftlichen Betrieb bzw. eine verstärkte Kohlenstoffsequestrierung zur Minderung von THG-Emissionen beitragen. Hierzu dienen z.B. Extensivierungsmaßnahmen oder auch die Förderung des Ökologischen Anbaus, auf den hier näher eingegangen wird. Eine veränderte Bewirtschaftung wirkt sich dabei auf das gesamte Agrarökosystem aus und beeinflusst damit die Reaktion desselben auf den Klimawandel und mögliche Anpassungsmaßnahmen. Zum anderen kann die Landwirtschaft durch den Anbau nachwachsender Rohstoffe einen Beitrag zur Verringerung von THG-Emissionen durch den Ersatz fossiler Energien leisten (s. Kap. 3.5.2.2).

3.5.2.1 Ökologische Landwirtschaft und weitere Extensivierungsmaßnahmen

In Deutschland hat sich die Zahl ökologisch wirtschaftender Betriebe sowie die von ihnen landwirtschaftlich genutzte Fläche seit 1994 mehr als verdreifacht (BMELV, 2006a). Im Jahr 2004 betrug ihr Anteil an den Gesamtbetrieben 4,1% und an der landwirtschaftlichen Fläche 4,5%. Brandenburg ist mit einem Anteil von 9,7% an der landwirtschaftlich genutzten Fläche Spitzenreiter und am geringsten verbreitet ist der ökologische Anbau in Sachsen mit 2,5% (KTBL, 2005). Auf Grund des weltweiten Booms beim Umsatz von Bioprodukten (Lotter, 2003), in Deutschland u.a. ausgelöst durch Skandale in der Lebensmittelproduktion und -industrie, wie BSE, Fleischskandale etc., sowie durch die Aufnahme von Bioprodukten in das Sortiment von Discountern, führt dies dazu, dass die nationale Produktion an Bioprodukten den Bedarf nicht decken kann (Ernährungsdienst, 2007). So werden Bioprodukte z.T. aus großer Ferne importiert, was der Ideologie der Regionalität von Bioprodukten widerspricht.

Gegenüber der herkömmlichen Landwirtschaft spart die biologische Landwirtschaft v.a. durch den Verzicht auf mineralische Düngemittel ca. 40 bis 60% der CO₂-Emissionen ein (Haas *et al.*, 1995; s. dazu auch <http://www.klimabuendnis.at>). Durch die im Ökoanbau bevorzugten regionalen Vermarktungswege werden weiter Energieverbrauch und damit THG-Emissionen reduziert. Zudem führt der Ökolandbau aufgrund der höheren Wurzelmassen der Hauptfrüchte, der höheren Flächenanteile

der Zwischenfrüchte und Untersaaten sowie einer höheren Unkrautmasse im allgemeinen zu einer Humusakkumulation, d.h. zu einer Zunahme der Kohlenstoffbindung (*C-Sequestrierung*) im Boden (Köpke, 2000).

In einer amerikanischen Langzeitstudie⁴⁴ nahm ein *acre*, d.h. ca. 0.4 ha Boden, im ökologischen Anbau rund 3500 Tonnen CO₂ aus der Luft auf (Hepperly *et al.*, 2006). Unter organischer Soja- und Maisproduktion stieg dabei der Gehalt an Kohlenstoff im Boden um 15 bis 28% an, der von Stickstoff zwischen 8 und 15%. Allerdings sind der Kohlenstoffakkumulation Grenzen gesetzt: so berechneten Foereid und Hogh-Jensen (2004) für nordeuropäische Bedingungen eine Zunahme des organischen Kohlenstoffgehaltes im Boden zwischen jährlich 10 und 40 g C m⁻² während der ersten 50 Jahre nach Umstellung von konventionellem auf biologischen Anbau mit einer Klee-Grass- und Zwischenfrucht-reichen Fruchtfolge, und eine Stabilisierung der Kohlenstoffgehalte nach ca. 100 Jahren.

Eine entscheidende Rolle für den Humusaufbau spielen Mykorrhiza-Pilze, die den Lebendverbau der organischen Substanz fördern und letztendlich unter den Versuchsbedingungen zu Ernteerträgen wie im konventionellen System führten (Pimentel *et al.*, 2005). Im gleichen Versuch zeigte sich der organische Anbau auf Grund der Fähigkeit humusreicher Böden mehr Wasser zu speichern dem konventionellen in Trockenjahren mit Mehrerträgen von 25-75% deutlich überlegen (Lot-

ter *et al.*, 2003). Eine wichtige Rolle könnte dabei auch die durch relativen Nährstoffmangel bedingte bessere (Unter-) Bodendurchwurzelung und die damit einhergehende bessere Bodenstruktur im organischen Anbau spielen (Köpke, 2000). Die höhere Wasserspeicherkapazität dieser Böden ist dabei nicht nur für die landwirtschaftliche Produktion unter Trockenstressbedingungen sondern auch für den dezentralen Hochwasserschutz ein interessanter Aspekt (Schnug und Haneklaus, 2002).

Dagegen hat eine geringere oder auch pfluglose Bodenbearbeitung nicht in allen Fällen eine positive Auswirkung auf die Kohlenstoffspeicherung im Boden: entgegen der Erwartung führt sie in 25% der Fälle sogar zu einer Abreicherung von organisch gebundenem Kohlenstoff (Hülsbergen, 2006). Generell ist die Kohlenstoffsequestrierung durch konservierende Bodenbearbeitung sehr von Klima und Bodeneigenschaften abhängig (Jarecki und Lal, 2005) und bedarf noch genauerer Untersuchungen zur Abschätzung ihres Potentials (Follett, 2001; Rosenzweig und Hillel, 2000). Allerdings scheint es einen für den Klimaschutz kontraproduktiven Mechanismus zu geben, nach dem erhöhte Bodenkohlenstoffgehalte zu erhöhten N₂O-Ausgasungen führen (Li *et al.*, 2005).

Ferner ist bei Ökobetrieben im Vergleich zu konventionellen Betrieben durch die flächengebundene (Weide-) Tierhaltung der Anteil an Grünland höher. Dieses zeichnet sich im Vergleich zum Acker wiederum durch höhere Humus- und damit auch Kohlenstoffgehalte im Boden aus. Nach Auswertungen der Bayerischen

⁴⁴ The Rodale Institute's Farming Systems Trial (s. dazu auch <http://www.strauscom.com/rodale-whitepaper/>).

Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) produziert ein Hektar Klee gras z.B. rund 230 dt Trockensubstanz inklusive 80 dt Wurzelmasse. Ein Hektar Mais bringt es auf 220 dt Trockensubstanz, allerdings nur auf 20 dt Wurzelmasse.

Hingegen führt die Extensivierung in der Fleisch- und Milchproduktion nicht automatisch auch zu geringeren CH_4 -Emissionen. So ist z.B. der CH_4 -Ausstoß bei einer Hochleistungskuh pro Liter Milch geringer als bei Tieren mit geringerer Milchleistung: beträgt der CH_4 -Ausstoß pro Liter bzw. Kilogramm Milch bei Kühen mit einer jährlichen Milchleistung von 4000 kg ca. 28 Gramm, sind es bei Milchkühen mit einer Milchleistung von 10 000 kg dagegen nur knapp die Hälfte (Flachowsky und Lebzien, 2005). Einen ähnlichen Effekt hat auch eine längere produktive Lebenszeit von Milchkühen (DEFRA, 2006), wie z.B. im ökologischen Landbau, angestrebt.

Differenzen bestehen bei der Bewertung der Auswirkung des Tierfutters: während in der oben angeführten Arbeit (Flachowsky und Lebzien, 2005) faserreiche Ernährung zu einer CH_4 -Produktion von 15% der aufgenommenen Bruttoenergie führte, kraftfutterreiche Futtermittel dagegen nur zu 2%, fand Köpke (2000) einen höheren CH_4 -Ausstoß in Exkrementen bei energiereichem Kraftfutter. Es laufen zahlreiche Forschungsprojekte, die zum Ziel haben, die CH_4 -Produktion durch die Fütterung der Rinder sowie über Züchtung zu beeinflussen. Erfolg versprechend sind Nahrungsmittelzusätze, wie z.B. Fumarsäure, die bei Lämmern die CH_4 -Produktion um bis zu 70% unterdrücken,

was gleichzeitig mit einer um 10% verbesserten Futtereffizienz einhergeht.

Auch im konventionellen Anbau lassen sich THG-Emissionen durch die gute fachliche Praxis reduzieren (BMELV, 2005; Lütke Entrup, 2000). Durch Effizienzsteigerung im Düngereinsatz – einschließlich der Reduktion von anorganischem Dünger und der Maximierung der Wirkung von organischem Dünger – können N_2O -Emissionen reduziert werden. Wichtige Maßnahmen dafür sind die Überprüfung der gleichmäßigen Düngerapplikation, die Anwendung moderner, Arbeitsschritte sparender Technologie, die sorgfältige Planung des Düngerbedarfes der angebauten Kultur unter Berücksichtigung der Fruchtfolge und die Überprüfung des Nährstoffgehaltes des Bodens; des weiteren die Einbeziehung von organischem Dünger in das Düngeregime und die verbesserte Handhabung von Gülle bzw. ihrer Verwertung in Biogasanlagen.

Im Allgemeinen verringern diese Maßnahmen zur N_2O -Reduktion auch sonstige negative Umweltauswirkungen von Nährstoffen. Als Teil einer ressourceneffizienten Landnutzungsstrategie verringern diese Aktivitäten gleichzeitig die Produktionskosten in der Landwirtschaft und tragen dazu bei, mögliche negative Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Umwelt zu begrenzen. Darüber hinaus wird z.B. in Großbritannien der Treibhausgasausstoß energieintensiver landwirtschaftlicher Betriebe, wie z.B. von Schweine- und Geflügelfarmen aber auch die Gemüseproduktion im Glashaus durch Energiesparauflagen reduziert (DEFRA, 2006).

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Emission von THG besteht in dem Einsatz Grüner Gentechnik, wie z.B. gegen spezifische Schaderreger resistente Kulturen, die gegebenenfalls den Einsatz von Insektiziden verringern. In Europa zugelassen, in Deutschland allerdings nur in geringem Umfang angebaut wird der Bt-Mais (benannt nach dem Bakterium *Bacillus thuringiensis*) gegen den Maiszünsler, einen aus Nordamerika eingeschleppten Fraßfeind, der sich – auch in Folge der Klimaerwärmung – in Europa ausbreitet.

3.5.2.2 Der Anbau nachwachsender Rohstoffe

Als nachwachsende Rohstoffe (*NaWaRos*) werden land- und forstwirtschaftlich erzeugte Produkte bezeichnet, die einer Verwendung im Nicht-Nahrungsbereich zugeführt werden. Hier soll vor allem der landwirtschaftliche Sektor betrachtet werden.

Dieser Produktionszweig hat innerhalb der letzten Jahre sowohl in Deutschland als auch international einen beachtlichen Aufschwung erfahren (AGR/CA/ APM (2005) 24 /FINAL; BMELV, 2006a). Innerhalb der Primärenergiebereitstellung nehmen nachwachsende Rohstoffe unter den erneuerbaren Energien in Deutschland eine herausragende Stellung ein, wobei der größte Anteil mit 44% im Jahr 2004 auf biogene Festbrennstoffe entfiel (BMU, 2005). Dabei spielen neben ökologischen und ökonomischen Interessen auch geopolitische Erwägungen eine Rolle. So führte bereits die Erdölkrise Ende der 70er Jah-

re zu einem verstärkten Ausbau von alternativen Kraftstoffen, in erster Linie Ethanol. Marktführend ist Brasilien, das auf Grund der hohen Produktivität von Zuckerrohr, niedriger Lohn- und Arbeitskosten und ausgedehnter Agrarflächen Ethanol kostengünstig produziert.

In Europa gilt es, vor allem die kontinuierlich steigenden Emissionen aus dem Verkehrssektor mit Hilfe von Biokraftstoffen zu begrenzen, um die im Kyoto-Protokoll festgelegten Reduktionsziele für THG-Emissionen zu erreichen (OECD: COM, 2006). Dementsprechend sieht die EG-Biokraftstoff-Richtlinie bis 2005 einen Anteil von 2%, bis 2010 bereits von 5,75% Biokraftstoff am gesamten Treibstoffverbrauch vor. In Deutschland wird der Bereich Nachwachsende Rohstoffe durch zahlreiche Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben sowie Förderprogramme unterstützt (BMELV, 2006a). Dabei spielen auch agrarstrukturelle Erwägungen eine Rolle, der durch die Reform der europäischen Agrarpolitik betroffenen Landwirtschaft neue Märkte zu erschließen und Arbeitsplätze zu erhalten bzw. zu schaffen. Gerade für Grenzertragsstandorte bietet die Verwendung von Roggen als nachwachsenden Rohstoff nach dem Wegfall der Roggenintervention innerhalb der EU neue Perspektiven.

Bisher ist der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen noch teurer als der fossiler Energieträger, was sich jedoch mit fortschreitendem technologischen Fortschritt und im Falle weiter anziehender Ölpreise verändern dürfte. Neben der stofflichen Nutzung der nachwachsenden Rohstoffe –

z.B. als Konstruktionswerkstoffe, Feinchemikalien und technische Polymere, ist mengenmäßig vor allem ihr Einsatz im energetischen Bereich bedeutend. Hier werden drei Nutzungswege unterschieden: die energetische Nutzung von *Biogas*, von *Biokraftstoff* und von *fester Biomasse*, mit zum Teil unterschiedlichen Ausgangsstoffen (z.B. KTBL, 2005 S. 906). Problematisch ist bisher jedoch die überwiegend niedrige Effizienz bei der Energiekonversion; hier besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf⁴⁵.

Seit dem Start des Marktanreizprogrammes Erneuerbare Energien (MAP) im Jahr 1999 wurden bis Ende 2005 ca. 850 Anlagen zur Nutzung fester Biobrennstoffe und 1150 Biogasanlagen mit einer Leistung von mehr als 100 bzw. bis zu 70 kW gefördert (BMELV, 2006a). Bundesweit sind mittlerweile über 3000 Anlagen mit einer Leistung von ca. 650 Megawatt im Betrieb (Weiland und Gömann, 2006). Laut einer Studie des Instituts für Energietechnik und Umwelt in Leipzig könnten bundesweit 16 Milliarden Kubikmeter Biogas in hofnahen Anlagen erzeugt werden. Hauptbestandteile des Biogases sind, je nach fermentiertem Ausgangsmaterial, Methan (40-75%) und Kohlendioxid (25-55%), gefolgt von Wasserdampf (bis zu 10%) sowie darüber hinaus geringe Anteile an Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Ammoniak und Schwefelwasserstoff, von denen ein Teil oftmals wiederum in die Atmosphäre entweicht. Derzeit wird Biogas vor allem zur dezentralen, gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung in Blockheizkraftwerken genutzt (Kraft-Wärme-

Kopplung). Eine wesentliche Herausforderung besteht gerade bei der Biogastechnologie in der Verringerung der Konversionsverluste zwischen Primär- und Endenergie, die bei Biomasse bisher über 50% liegen. Dies könnte u.a. durch eine verbesserte Nutzung der (Ab-) Wärme und von Sekundärprodukten erreicht werden, wie z.B. der Trocknung von Feststoffen (z.B. Holzhackschnitzeln) und ihrer Verwendung als Pellets (Scheffer, 2006).

Als unmittelbare Folge haben sich die Anbauflächen für Energiepflanzen für die Biogasgewinnung ausgedehnt und allein zwischen 2004⁴⁶ und 2005 mehr als sechsfacht (BLE, 2005 zitiert in KBTL, 2005). Hauptanbaukultur ist Mais mit ca. 72 000 ha im Jahr 2005, der auf Grund seiner außerordentlich hohen Biomasseproduktion pro Flächeneinheit wirtschaftlich besonders attraktiv ist. Allerdings könnten nach Angaben der Saatenunion auch mit einer Grünroggen-Mais-Fruchtfolge höhere Biomasseerträge für die Biogasproduktion als mit einer reinen Maisfruchtfolge erzielbar sein. Ohnehin gibt es nicht „die Energiepflanze“, was Entwicklungsperspektiven eröffnet. Erfolg versprechen auch Mischkulturen, z.B. von Topinambur und Sonnenblume, die ähnlich hohe Hektarerträge wie Mais bringen (Scheffer, mündliche Mitteilung Bioenergie-Konferenz vom 03.07.2006 in Kassel). Auch die Nutzung von Wildpflanzen kann eine interessante Option darstellen, die gleichzeitig die Ausbringung von Herbiziden reduziert. Eine Samenverbreitung kann durch rechtzeitiges Ernten vermieden werden.

⁴⁵ Siehe dazu auch das Abschlussprotokoll Bioenergiekonferenz Kassel vom 03.07.06.

⁴⁶ Landwirtschaftlich erzeugte Energiepflanzen werden erst seit 2004 statistisch erfasst.

Gleichzeitig vollzieht sich ein Wandel in der Pflanzenzüchtung, die auf die Nachfrage reagiert und immer mehr „Energiesorten“ ins Sortiment aufnimmt (z.B. Böse, 2006b). So ist der CH₄-Ertrag einer Biogasanlage in erster Linie eine Funktion des Trockenmasseertrags; die stoffliche Zusammensetzung ist nachgeordnet. Damit entfallen die für die Tierfütterung wichtigen Aspekte der Futtermittelverwertbarkeit. Für den reibungsfreien Betrieb einer Biogasanlage sind Eigenschaften wie ein hoher Anteil an schnellabbaubarer Stärke und leicht abbaubare Gerüstsubstanzen sowie eine hohe Flexibilität des Erntezeitpunktes vorteilhaft. Letzteres wird erreicht, indem nicht die Kornreife abgewartet werden muss, sondern die Kulturen während der Milchreife bereits geerntet werden können, was gleichzeitig die Vegetationsperiode verkürzt und den Anbau von zwei Kulturen pro Jahr ermöglicht. Mittlerweile liefert z.B. Energiemais im Vergleich zu Silomais mit 800 dt ha⁻¹ das 1,8-fache an Feuchtmasse und mit 448 GJ/ha einen mehr als 1,5-fachen Energieertrag (Igelspacher, 2005, zitiert in KTBL, 2005). Auf Grund der Verwendung der ganzen Pflanze⁴⁷ zeichnet sich das Weiteren bei Getreide eine Abkehr vom Trend zu geringerem Strohanteil ab. Darüber hinaus werden die landwirtschaftlichen Biogasanlagen auch mit Gülle und Festmist sowie sonstigen organischen Rest- und Abfallstoffen beschickt.

Den größten Boom hat jedoch der Rapsanbau für die Herstellung von *Biodiesel*⁴⁸

erfahren mit einer Steigerung der Anbaufläche von 319000 auf 539000 ha allein zwischen 2004 und 2005 (BLE, 2005 zitiert in KTBL, 2005). Insgesamt sind in Deutschland heutzutage sogar mit rund 1,4 Mio. ha ca.15% der zur Verfügung stehenden Mähdruschfläche mit Raps eingesät. Einer weiteren ungebremsten Ausdehnung des Rapsanbaus setzen jedoch Restriktionen in der Fruchtfolgegestaltung gewisse Grenzen, da bei Unterschreiten einer 4-5-jährigen Fruchtfolge bei anfälligen Sorten spezielle ackerbauliche Hygienemaßnahmen notwendig werden. Als maximaler Wert werden von Makowski (2000a) ca. 1,7 Mio. ha angesehen. Hintergrund war die im Januar 2004 in Kraft getretene Steuerbefreiung sämtlicher Biokraftstoffe und Bioheizstoffe, die allerdings bereits wieder eingeschränkt wurde und in Zukunft durch eine obligatorische Biokraftstoffquote ersetzt werden wird (BMELV, 2006a). Auch der Getreideanbau für die Ethanolgewinnung vervierfachte sich in der gleichen Zeitspanne, stellt mit insgesamt 88000 ha aber nur knapp ein Siebtel der Rapsfläche dar. Wichtig für die Ethanolausbeute ist eine Verbesserung des Stärkeanteils über Sortenauswahl und Anbautechnik. In Süddeutschland wird nach Beobachtungen der Saatenunion für die Ethanolgewinnung v.a. Weizen angebaut, im Nordosten auf nicht Weizen fähigen Standorten Roggen.

Biodiesel (vor allem aus Raps) und Bioethanol⁴⁹ aus stärkehaltigen landwirtschaftlichen Kulturen stellen die erste Ge-

⁴⁷ So genannte Ganzpflanzensilage (GPS).

⁴⁸ Gewinnung in Abhängigkeit von Verwendungszweck durch einfache mechanische Pressung und

Reinigung (z.B. für hofeigene Verwendung) oder durch Pressung und Raffination (für Biodiesel)

⁴⁹ Bioethanol ist in herkömmlichen (Otto-) Motoren nur als Beimischung verwendbar

neration an Biokraftstoffen, den „*bio-fuels*“, dar. Da nur die öl- bzw. stärkehaltigen Pflanzenteile verwandt werden, ist die energetische Ausbeute im Verhältnis zur zweiten Generation an Biokraftstoffen deutlich niedriger. Letztere befindet sich noch im Entwicklungsstadium: Kernbestandteil des Verfahrens zur Herstellung so genannter *Biomass-to Liquid- (BtL-) Kraftstoffe* ist die Vergärung von Zellulose zu Alkohol, wobei die Zellulose und Hemi-Zellulose in Zucker zerlegt wird. Da der Hauptbestandteil von Pflanzenmaterial aus Zellulose, Hemi-Zellulose und Lignin⁵⁰ besteht, und da eine größere Bandbreite an Ausgangsmaterial in diesem Verfahren eingesetzt werden kann – einschließlich Zelluloseabfall, Holzabfälle und spezielle Zellulose anreichernden Pflanzen – könnte diese Alternative auf lange Sicht die Produktionskosten deutlich senken und die für eine bestimmte Menge an Biokraftstoff benötigte Anbaufläche an nachwachsenden Rohstoffen reduzieren. Auf Grund ihrer im Vergleich zu den meisten mitteleuropäischen Ackerkulturen höheren Photosyntheseleistung sind auch kurze Rotationen von schnellwüchsigen Baumarten, wie z.B. Pappeln und Weiden, als Ausgangsmaterial für die neue Generation von Biokraftstoffen wirtschaftlich interessant. Mit der Etablierung so genannter „Energieholzplantagen“ dürfte der Holzsektor als Ersatzrohstoff für fossile Energieträger eine weitere Wertsteigerung erfahren (ALE, 2006).

Der Aspekt der Flächenproduktivität ist bedeutsam, wenn man bedenkt, dass in der EU-15 mehr als zwei Drittel der (bisher)

⁵⁰ könnte als Energiequelle im Umwandlungsprozess eingesetzt werden

landwirtschaftlich genutzten Fläche gebraucht würden, um nur 10% des Treibstoffbedarfes zu decken. Allerdings handelt es sich bei diesem Wert um eine Extrapolation der Datengrundlage von 2004, ohne Berücksichtigung technologischer und pflanzenbaulicher Fortschritte und unter Annahme eines weiterhin hohen Anteils an Biodiesel, der eine geringere Flächeneffizienz als Ethanol hat (OECD: AGR/CA/APM(2005)24/Final). Nach einem Szenarium der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe könnten in Deutschland bis 2030 17% des Energiebedarfes durch Nawaros gedeckt werden. Der Flächenbedarf beliefe sich auf ca. 4,4 Mio. ha, was einem viertel der heutigen landwirtschaftlichen Nutzfläche entspräche (Böse, 2004a).

Unabhängig vom betrachteten Szenarium wird die Größenordnung der für die Ausdehnung des Anbaus nachwachsender Rohstoffe benötigten Fläche beachtlich sein und bei weitem mögliche Flächenstilllegungen und Extensivierungspotentiale in der Landwirtschaft als Folge weiteren Subventionsabbaus überschreiten. Im Gegenteil, die Nutzung stillgelegter Flächen⁵¹ würde – dem aktuellen Trend folgend (BMELV, 2006a) – wahrscheinlich weiter zunehmen. Durch den Verlust wertvoller Habitate könnte eine solche Entwicklung beträchtliche Auswirkungen für die natürliche Biodiversität bzw. den Naturschutz haben, der von bisherigen Extensivierungsmaßnahmen profitierte (COM (2006) 34 final). Letztendlich sind durch den

⁵¹ Der Anbau von NaWaRos, oder Industriepflanzen, ermöglicht die Nutzung von Stilllegungsflächen, ohne auf die Ausgleichszahlungen verzichten zu müssen, die dem Landwirt gezahlt wird, um der Überproduktion an Nahrungsmitteln entgegenzuwirken.

Boom an Bioenergiepflanzen durch die Änderung der Landnutzung und damit einhergehende Veränderungen von Transpirationsverhalten und Albedo auch Auswirkungen auf das regionale Klima wahrscheinlich.

Weitere negative Auswirkungen sind zu erwarten, sollte sich der bisher zu beobachtende Trend zu einigen wenigen Monokulturen – in erster Linie Raps und Mais – fortsetzen bzw. intensivieren. Eine Studie zur Folgenabschätzung des Bioenergiepflanzenanbaus für die Verwendung in Biogasanlagen für Nordrheinwestfalen sieht bei fortgesetzter Förderung eine weitere Ausdehnung des Biomasse-Maisanbaus auf 180 000 ha voraus (Gömann und Kreins, 2006). Die Ausdehnung erfolgt dabei auch in erheblichem Maße zu Lasten der Weizenfläche, so dass der Maisanbau in zahlreichen Regionen Weizen als Leitkultur ablösen wird. Über die allgemeinen Risiken von Monokulturen hinaus, wie z.B. erhöhtem Schädlingsbefall, Abnahme der Biodiversität oder Bodenmüdigkeit, gilt der (Silo-) Maisanbau generell als humuszehrend und unter bestimmten Bedingungen auf Grund der größeren Drillreihenabstände sowie des späteren Bestandesschlusses als erosionsfördernd. Bei einer zunehmenden Intensivierung der Landwirtschaft durch den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen sind in sensiblen Gebieten auch negative Auswirkungen auf den Boden- und Wasserhaushalt zu erwarten. Dagegen ist auch ein entgegen gesetzter Trend denkbar: ein geringerer Dünger- und Pestizideinsatz durch den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen durch die Züchtung anspruchs-

loserer Sorten und durch geringere Qualitätsanforderungen.

Außerdem werden – trotz einer gewaltigen Konzentration auf einige wenige Kulturen – die Anwendungsbereiche nachwachsender Rohstoffe kontinuierlich ausgeweitet (BMELV, 2006a), so dass damit auch eine zunehmende Diversität der angebauten Ackerkulturen und eine vielseitigere Fruchtfolge eine Möglichkeit darstellt. Einzelne Beispiele sind die Verwendung natürlicher Faserpflanzen, biogener Schmierstoffe oder von Arznei- und Gewürzpflanzen, deren stark wachsender Markt auf ein zunehmendes Gesundheitsbewusstsein in der Bevölkerung zurückgeht und besonders lukrativ ist.

Da es sich bei der Mehrzahl der bisher eingesetzten Rohstoffe um landwirtschaftliche Nahrungsmittel handelt, ist ferner ein Konflikt zwischen Nahrungsmittel- und Energieproduktion möglich (OECD: COM (2006) 34 final; BMELV, 2007a), bzw. bereits abzusehen. Dieser wird letztendlich über den Marktpreis entschieden werden, so dass eher mit steigenden Lebensmittelpreisen und Einkommen in der Landwirtschaft zu rechnen ist. So hat sich z.B. jüngst in Mexiko der Maispreis wegen der verstärkten Nachfrage aus den USA für die Bioethanolherstellung verdoppelt, was insbesondere die ärmere Bevölkerung trifft. Steigende Preise von Milch und Milchprodukten in Deutschland im August 2007 waren die ersten Anzeichen einer Verteuerung der Agrarprodukte; andere Lebensmittel werden nachziehen – so könnte Fleisch z.B. um 10-30% teurer werden (Spiegel-online, 18.09.2007). Innerhalb Europas wird die Regulierung al-

lerdings der EU-Agrarpolitik, insbesondere Einfuhrbeschränkungen für brasilianisches Ethanol, unterliegen. Im Falle der Verdrängung der Nahrungsmittelerzeugung bzw. ihrer Verlagerung ins Ausland ist mit einem Verlust von traditionellen Arbeitsplätzen zu rechnen (Gömann und Kreins, 2006), bei gleichzeitiger Schaffung neuer Arbeitsplätze. So dürfte der wachsende Biomasseanbau einen positiven Impuls auf die Beschäftigung im ländlichen Raum sowie nachgeordneter Betriebe ausüben.

Neben dem Flächenkriterium ist ein entscheidendes Kriterium zur Bewertung des Anbaus von nachhaltigen Rohstoffen ihre Effizienz bei der Vermeidung von Treibhausgasemissionen. So führt der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen zwar nachweislich zu ihrer Reduktion⁵², doch ist ihre Produktion auch mit THG-Emissionen verbunden, insbesondere durch den Anbau der entsprechenden Kultur und der damit verbundenen Herstellung und Verwendung von mineralischen Düngemitteln. Weitere energieintensive Kosten sind der Transport der *Nawaros*, ihre Umwandlung in Energie sowie ihre Verteilung.

Bei der Beurteilung der Effizienz der THG-Reduktion von Biokraftstoffen kommen verschiedene europäische Studien – in Abhängigkeit vom betrachteten Rohstoff, der Bewertung von Nebenprodukten, der Art der Umwandlung in Biokraftstoffe etc. – zu äußerst unterschiedli-

chen Ergebnissen, die von negativen Werten bis zu einer Einsparung von 80% reichen (OECD: COM (2006) 34 final). Generell ist das THG-Einsparungspotential im Transportsektor geringer als bei der Generierung von Wärme oder Strom aus Biomasse. Allerdings gilt wiederum, dass sich technologische Fortschritte, wie z.B. bei den Biokraftstoffen der zweiten Generation (BtL-Kraftstoffe), positiv auf die THG-Bilanz sowie die Vermeidungskosten auswirken dürften. So liegen die momentanen Vermeidungskosten von Treibhausgasen durch den Einsatz von in der EU produzierten Biokraftstoffen weit über dem gehandelten Preis von 20 €/pro Tonne CO₂⁵³; für die BtL-Kraftstoffe sollten sie zwischen 40 und 100 € pro eingesparter Tonne CO₂ liegen. Unter dem Aspekt des kostengünstigsten Klimaschutzes, stellt sich hier – ganz im Geiste von Kyoto – die Frage, ob der Staat nicht mehr für den Klima- und Ressourcenschutz erreichen könnte, wenn er die Fördermittel alternativ einsetzen würde – z.B. im Bereich der Wärmeerzeugung – oder für den Import kosten- und energieeffizienterer erneuerbarer Energieträger, wie z. B. Bioethanol aus Brasilien (Gömann und Kreins, 2006).

4 Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft

Die geographische Verbreitung landwirtschaftlicher Produktionssysteme und ins-

⁵² In Deutschland sind 2005 ca. 53 Mio. t CO₂ durch den Ersatz fossiler Energieträger (Kohle und Erdgas) durch feste, flüssige und gasförmige Biomasse eingespart worden (BMU, 2005); hinzu kommt die Substitution von ca. 3% des Treibstoffverbrauches v.a. durch Biodiesel (BMELV, 2006a).

⁵³ Nach Mastrandrea und Schneider (2004) müsste die Kohlenstoffsteuer 200 \$ pro Tonne betragen, um einen gefährlichen Klimawandel abzuwenden.

besondere landwirtschaftlicher Kulturen⁵⁴ zeigt den starken Einfluss, den das Klima auf diese ausübt (Viner *et al.*, 2006). Dabei wird das Pflanzenwachstum und in geringerem Ausmaß die Tierzucht vor allem durch die solare Einstrahlung, die Temperatur und die Niederschlagshöhe sowie deren Verteilung beeinflusst. Damit ist die Landwirtschaft unmittelbar von den Auswirkungen des Klimawandels sowohl auf die Quantität und Qualität der pflanzlichen und tierischen Produktion als auch auf die Produktionsfaktoren betroffen. Letzteres bezieht sich insbesondere auf Böden und sonstige Umweltfaktoren, einschließlich des Schädlings- und Pathogenpotentials. Auf diesen Primärwirkungen des Klimawandels auf der Ebene des Einzelorganismus bzw. des Schlages oder Betriebes beruhen Folgewirkungen auf die regionale und nationale Agrarproduktion und Agrarlandschaft bis hin zur globalen Agrarproduktion und Handelsströmen (z.B. Reilly, 1999; Abbildung 14). Dabei nimmt mit zunehmender Aggregationsebene der Komplexitätsgrad und damit auch die Unsicherheit von Prognosen zu, da zunehmend andere Einflussfaktoren auf die Landwirtschaft an Bedeutung gewinnen. Hierzu gehören z.B. das globale Bevölkerungswachstum, die nationale bzw. internationale Agrarpolitik, die Entwicklungen der Informations- und Biotechnologie, der Rückgang der ländlichen Bevölkerung in weiten Teilen der EU, der Energiebedarf (z.B. nach nachwachsenden Rohstoffe) sowie die Verbrauchernachfragen.

Die OECD teilt die Auswirkungen des Klimawandels entsprechend in drei Kategorien ein, die zum großen Teil in den in Abbildung 14 dargestellten Skalen bis hin zu globalen Zusammenhängen betrachtet werden können bzw. müssen (OECD, 2002):

- die *agronomischen Auswirkungen*, insbesondere Änderungen in den Anbaubedingungen, direkte Auswirkungen auf die Tierhaltung, zunehmender Bewässerungsbedarf, Veränderungen im Pflanzenschutz, in der Bodenfruchtbarkeit und der Gefährdung durch Erosion;
- *sozioökonomische Auswirkungen* bedingt durch Veränderungen in der Wirtschaftlichkeit verschiedener landwirtschaftlicher Betriebe, zunehmendes wirtschaftliches Risiko, Einkommensverluste und Verlust des kulturellen Erbes, Verlagerung primärer und verarbeitender Industrie, zunehmende globale Versorgungsunsicherheit; und
- *Auswirkungen auf die Umwelt*, wie v.a. der Verlust von Ökosystemen und Biodiversität, Nährstoffauswaschung und Pestizidbelastung.

⁵⁴ Pflanzen sind durch Immobilität stärker als Tiere den klimatischen Einflüssen ihres Wuchsortes ausgesetzt.

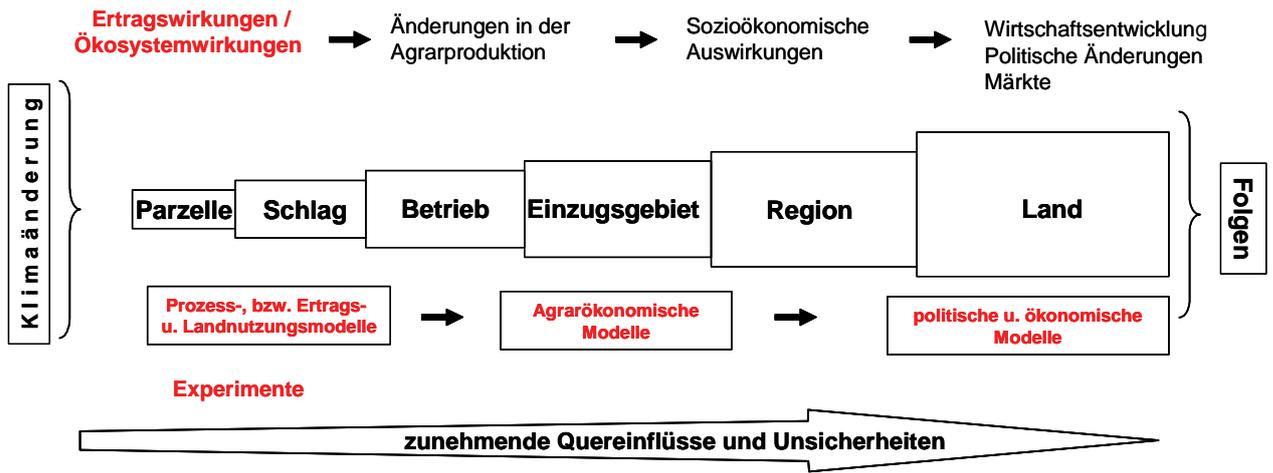


Abbildung 14: Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Landwirtschaft unter Berücksichtigung verschiedener Aggregationsebenen bzw. Skalen.

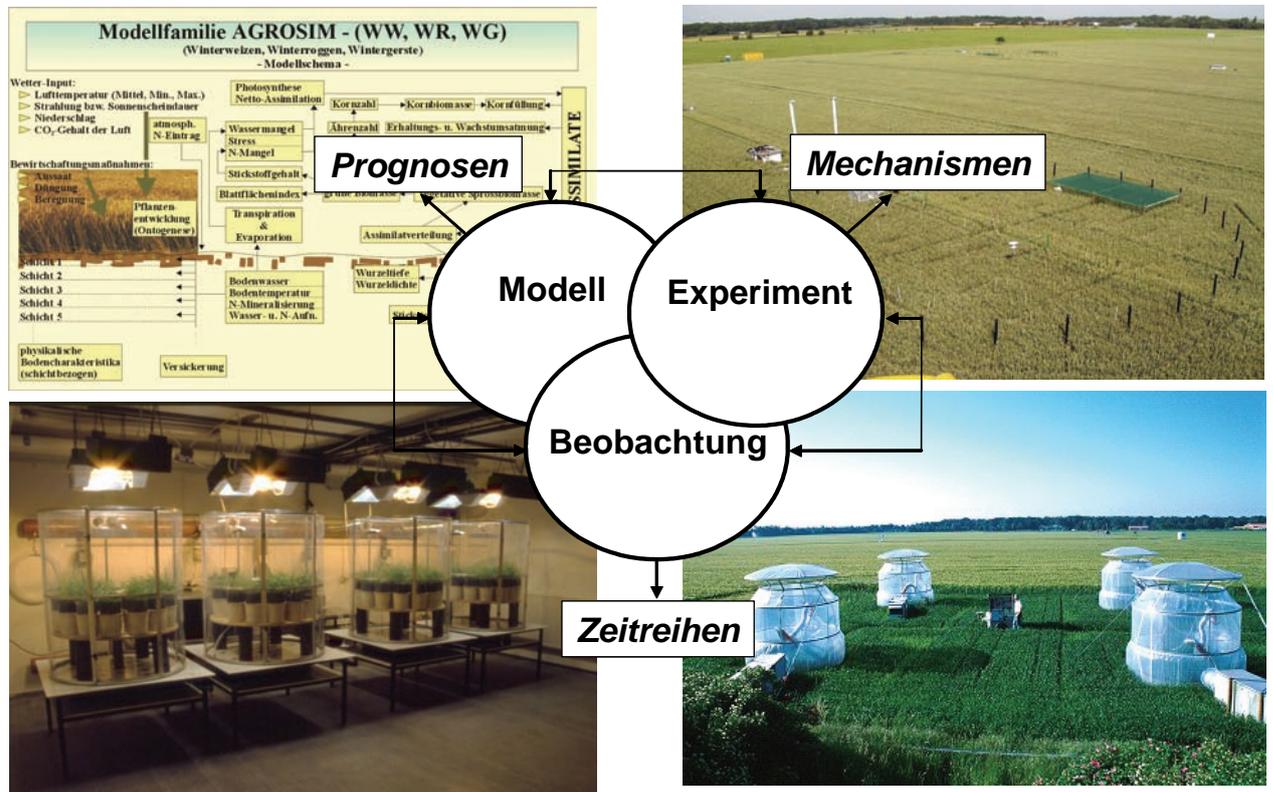


Abbildung 15: Methoden zur Untersuchung der Auswirkungen von Elementen des Klimawandels auf der Ebene von Einzelpflanze bis hin zu Agrarökosystemen.

Im Folgenden stehen vor allem die agronomischen Auswirkungen im Mittelpunkt der Betrachtungen. Dabei sind auf Modellen basierende Vorhersagen bzw. Abschätzungen von Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die landwirtschaftli-

che Produktion (s. Kapitel 4.6) nur möglich bei einer detaillierten Kenntnis der unmittelbaren biophysikalischen Wirkungen sich ändernder Klimaparameter auf pflanzen- und tierphysiologische Stoff-

wechsel und Wachstumsprozesse und die daraus resultierenden Leistungen.

Zur Methodik der Wirkungsuntersuchungen

Kenntnisse über die Primärwirkungen des Klimawandels werden aus Beobachtungen, Modellen und vor allem aus der Durchführung von Experimenten gewonnen (Abbildung 15). Während z.B. in Labor- bzw. in Gewächshaus- und Klimakammerversuchen die Wirkung einzelner Faktoren auf Pflanzen kontrolliert und ohne äußere Einflüsse untersucht werden kann, nimmt die Übertragbarkeit von Untersuchungsergebnissen auf reale Feldbedingungen mit zunehmendem Bezug zum realen System zu (Laborversuch < Kammerversuch < Feldversuch). Zur Untersuchung der Wirkungen von einzelnen Treibhaus- bzw. Spurengasen (CO₂, O₃) werden z.B. spezielle Feldbegasungssysteme eingesetzt, mit deren Hilfe die Gaskonzentration gesteuert werden kann, ohne in das reale Agrarökosystem störend einzugreifen (u.a. die so genannten FACE-Versuche = Free Air CO₂ Enrichment).

Allerdings sind in der experimentellen Analyse der Anzahl der zu untersuchenden Parameter in der Regel versuchstechnische bzw. ökonomische Grenzen gesetzt, während durch die Klimaveränderung im „globalen Experiment“ eine Vielzahl von sich gleichzeitig verändernden Parametern u.a. auf Agrarökosysteme einwirken. Hinzu treten Probleme z.B. durch Skalen- und Rückkopplungseffekte (Niklaus, 2007). Eine weitere Problematik bei experimentellen Untersuchungen besteht darin, dass die Klimaveränderungen überwiegend

graduell fortschreiten, während in den meisten Experimenten der jeweils untersuchte Klimaparameter in definierten Stufen geändert wird. Dies dürfte nicht nur die Reaktion von Agrarökosystemen auf die Klimaveränderungen sondern auch die daraus abzuleitenden Anpassungsoptionen beeinflussen. Die gängigen experimentellen Versuchsansätze liefern daher auch keine Vorhersage der tatsächlich eintretenden Auswirkungen des Klimawandels, sondern stellen Szenarien dar, die es gestatten, mögliche Reaktionswege bzw. Antworten des betrachteten Systems zu erkennen und daraus für die Modellierung Schlüsse zu ziehen. Experimentelle Versuchsansätze zur Bewertung der Folgen des Klimawandels sind und bleiben jedoch die Basis für ein fundiertes Prozessverständnis und bilden daher die Grundlage für höher aggregierte Aussagen.

4.1 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf pflanzenphysiologische Prozesse und die Ertragsleistung der wichtigsten Kulturpflanzen

Im Folgenden werden in knapper Form die Auswirkungen der wichtigsten Parameter, die sich im Zuge des Klimawandels ändern werden (Temperatur, CO₂, O₃, Niederschlag, etc.; s. auch Kapitel 2.1) auf Stoffwechsel, Wachstum und Ertragsleistung landwirtschaftlicher Pflanzen dargestellt, wobei der Schwerpunkt auf Veränderungen der Temperatur und CO₂-Konzentration liegt. Mögliche Auswirkungen auf die Qualität von Pflanzen bzw. landwirtschaftliche Produkte werden unter Kapitel 4.1.7 zusammengefasst.

4.1.1 Auswirkungen der Temperaturerhöhung

4.1.1.1 Auswirkungen zunehmender mittlerer Temperaturen

Eine Veränderung der Temperatur betrifft sämtliche Organisationsebenen der Pflanzenproduktion (Arbol und Ingram, 1996), da alle biologischen und chemischen Reaktionen in Organismen und Ökosystemen von der Temperatur beeinflusst werden. Einen Überblick über die möglichen Auswirkungen einer mittleren Temperaturerhöhung auf verschiedene pflanzenphysiologische Prozesse gibt Tabelle 6.

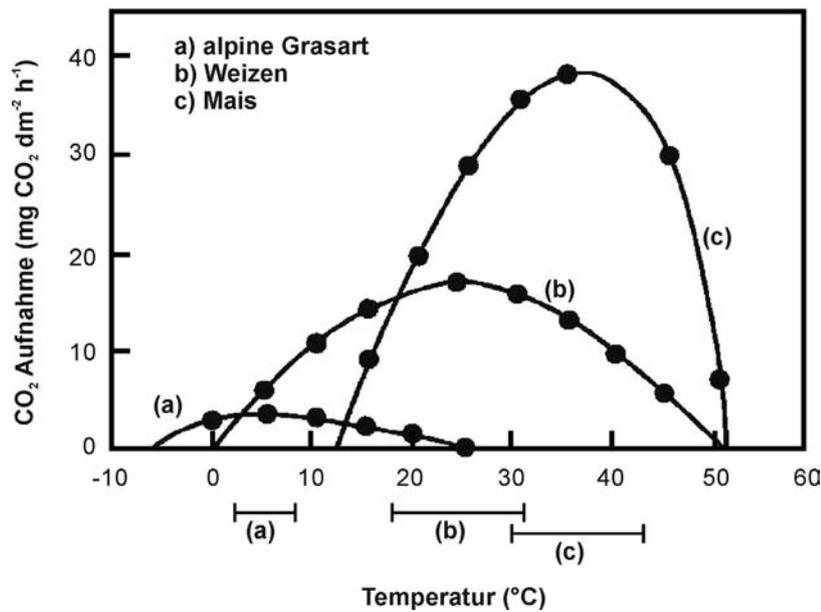
Die *Photosyntheserate* nimmt im unteren Temperaturbereich in der Regel mit steigender Temperatur bis zu einem Maximalwert zu. Dieser Maximalwert variiert in Abhängigkeit von der Pflanzenart in einem weiten Bereich (Abbildung 16). Oberhalb dieses Wertes (bei Mais z.B. > ca. 35°C⁵⁵) nimmt die Photosyntheserate wieder ab. Dies gilt vor allem für die Kinetik von *Rubisco*⁵⁶, die geschwindigkeitsbestimmend für die Photosynthese ist (Crafts-Brandner und Salvucci, 2004). Einige Pflanzenarten können sich allmählich – auch ohne einen signifikanten Anstieg der Atmung – an wärmere Bedingungen gewöhnen (Rosenzweig und Hillel, 1998; Körner, 2006). Das Ausmaß und die genauen Bedingungen dieser Anpassung sind allerdings noch nicht bekannt, wenn auch von höchster Wichtigkeit für die Modellierung der Pflanzenproduktion in einem wärmeren Klima sowie für die

Berechnung von Rückkopplungsmechanismen z.B. zwischen dem Klima- und dem Kohlenstoffkreislauf (King *et al.*, 2006). Darüber hinaus beeinflusst die Temperatur die Verteilung von Photosyntheseprodukten innerhalb der Pflanze und damit ihre Morphologie, v.a. das Wurzel-Spross-Verhältnis (Rosenzweig und Hillel, 1998a). Unterdrücken hohe Nachttemperaturen die Kohlenhydratversorgung reproduktiver Organe wird damit die Blüten-, Frucht- und Samenbildung beeinträchtigt (Hall und Allen, 1993 zitiert in Rosenzweig und Hillel, 1998a).

Ein Anstieg der Temperatur hat ferner einen entscheidenden Einfluss auf die *Atmung* und zwar sowohl auf die Licht- (*Photorespiration*) als auch die Dunkelatmung (Körner, 2006). Letztere wäre dabei auf Grund der (bisher) stärker ansteigenden Nachttemperaturen besonders betroffen. Solange die Temperatur unter ca. 20°C liegt, ist die Respiration bei Pflanzenarten der gemäßigten Breiten für gewöhnlich relativ niedrig; sie steigt mit zunehmender Temperatur und erreicht bei ca. 40°C einen „Kompensationspunkt“ (Rosenzweig und Hillel, 1998a), an dem die Atmung die gleiche Größenordnung wie die Brutto-Photosynthese aufweist, so dass keine Netto-Kohlenstoffassimilation und damit kein Wachstum mehr erfolgt. Bei höheren Temperaturen würde somit durch stärkere Atmungsverluste ein Teil der durch eine erhöhte Photosyntheserate gesteigerten Wuchs- und Ertragsleistung verloren gehen (Körner, 2006).

⁵⁵ D.h. noch deutlich vor der Denaturierung von Enzymen.

⁵⁶ Ribulose-1,5-Biphosphat- Carboxylase, Schlüsselenzym der Photosynthese.



Kultur	T _{opt}	T _{max}	Kältetoleranz (Wachstumsbeginn)
Weizen	17-23	30-35	4-6
Mais	25-30	32-37	12-15
Sojabohne	15-20	35	--
Kartoffel	15-20	25	8-10

Abbildung 16: Die Temperaturabhängigkeit der Photosyntheseleistung (oben) und wichtige Temperaturbereiche verschiedener Kulturpflanzenarten (unten) (nach Wardlaw, 1979 zitiert in Rosenzweig u. Hillel 1998a)

Tabelle 6: Mögliche Auswirkungen einer Temperaturerhöhung auf Pflanzen (aus Hertstein *et al.*, 1994).

Charakteristikum	Pflanzliche Reaktion
Keimung	Gleichmäßiger und schneller
Wachstumsbeginn	Nettosubstanzgewinn tritt eher ein
Wachstumsrate	Höher
Wachstumsdauer	Kürzer
Vegetationsperiode	Länger
Zellteilung	Der Zellzyklus wird verkürzt und die Zellteilungsrate erhöht
CO ₂ -Assimilation	Zunahme bei C ₄ -Pflanzen, bei C ₃ -Pflanzen nur geringe Zunahme; bei gleichzeitiger Erhöhung der CO ₂ -Konzentration höhere Zunahme bei beiden Pflanzenarten
Respiration	Zunahme der Respirationsrate
Transpiration	Zunahme, vor allem in Verbindung mit höherer Lichtintensität
Translokation	Zunahme, bei höherer Atmungsintensität abnehmend
Winterfestigkeit	Bedarf an winterfesten Arten und Sorten geht zurück
Hitzetoleranz	Ungünstig, Hitzeschäden treten vermehrt auf
Vernalisation	Anpassung der Arten / Kulturpflanzen nimmt ab, je weiter das Temperaturoptimum überschritten wird
Ertrag	Zunahme, wenn das Wasserangebot ausreichend ist. Größere Zunahme bei Kulturen mit hohen Temperaturansprüchen. Wenn keine Änderungen der Strahlung und der Niederschläge auftreten, eher Ertragsreduzierung, da mit einer verstärkten Respiration gerechnet werden muss

Die Photosynthese bzw. pflanzenphysiologische Prozesse werden in der Regel durch so genannte *Kardinaltemperaturen* gekennzeichnet (Abbildung 17), wobei neben dem Optimum das Temperaturminimum die Kältengrenze und das Temperaturmaximum die Hitzegrenze darstellt. Das Temperaturoptimum wird im allgemeinen als der Temperaturbereich definiert (Fitter und Hay, 1987), in dem das Pflanzenwachstum oder der Ertrag innerhalb von 10% des maximal erreichbaren Wertes liegt, vorausgesetzt alle anderen Variablen, wie z.B. Bodenfeuchte, Sauerstoffgehalt, Nährstoffversorgung etc., sind nicht limitierend. Bei Überschreiten des optimalen Temperaturbereiches erfolgt häufig ein abrupter Rückgang in Wachstum und Ertrag.

Diese Kardinaltemperaturen sind je nach Pflanzenart und -Sorte bzw. je nach Standort und Herkunft sehr unterschiedlich ausgeprägt (Evans, 1993). So hat Mais – aus den Subtropen stammend – z.B. ein deutlich höheres Temperaturoptimum für die Photosynthese als Weizen, der aus einer gemäßigteren Klimazone stammt. Noch deutlicher unterscheiden sich die meisten Pflanzenarten in ihrer Sensitivität gegenüber niedrigen Temperaturen (Körner, 2006). Darüber hinaus bestehen große Unterschiede zwischen verschiedenen Genotypen, was sich u.a. auch in der weiten Anbauverbreitung von z.B. Weizen widerspiegelt, der selbst in den heißen Klimaten Indiens oder Australiens wirtschaftlich angebaut werden kann. Es lässt sich ferner die Schlussfolgerung ziehen, dass eine Temperaturerhöhung unterhalb des Optimums prinzipiell zu einer Leistungssteige-

rung, oberhalb des Optimums dagegen zu einer Leistungsminderung führen sollte.

Die Bedeutung der geographischen Breite bzw. Höhe

Demnach sollten auf Grund der gesteigerten metabolischen⁵⁷ Aktivität überall dort positive Auswirkungen auf die Photosynthese bzw. das Pflanzenwachstum auftreten, wo die gegenwärtige Temperatur limitierend ist (Weigel, 2004; DEFRA, 2000; Körner, 2006), wie insbesondere in den hohen nördlichen Breiten. Beispielsweise wurde auch bei einer experimentellen Erwärmung um 0,3 - 6°C die Pflanzenproduktivität in arktischen und temperierten Ökosystemen um durchschnittlich fast 20% erhöht (Rustad *et al.*, 2001). Eine wichtige Voraussetzung für die durch höhere Temperaturen und eine längere Vegetationsperiode stimulierte Wachstumsrate ist dabei eine bessere Nährstoffverfügbarkeit auf bisher temperaturlimitierten Standorten (Peñuelas *et al.*, 2004; siehe dazu auch Kapitel 2.2). Allerdings fanden die o.g. Autoren bei stärkerem Wachstum verringerte Phosphorgehalte im Pflanzengewebe, was darauf hindeutet, dass insbesondere natürliche Standorte bei besseren Wuchsbedingungen zunehmend nährstofflimitiert sein könnten.

Eine weitere Voraussetzung für Wachstums- bzw. Ertragssteigerungen ist, dass ausreichende bzw. höhere Niederschläge die durch höhere Temperaturen gesteigerte Evapotranspiration ausgleichen, da sonst Trockenheit limitierend wirken kann

⁵⁷ Dabei verdoppelt sich nach der van't Hoff'schen Gleichung die Reaktionsgeschwindigkeit bei einer Erhöhung der Temperatur um 10°C.

(Hertstein *et al.*, 1994, u.a.). Deshalb wird u.a. für Nord- und Westeuropa – allerdings nur unter Einbeziehen des zu erwartenden CO₂-Düngeeffektes (s. Kapitel 4.1.2) - mit höheren landwirtschaftlichen Erträgen gerechnet (IPCC, 2001b und 2007b; EEA, 2004). Dabei ist das Resultat höherer Temperaturen häufig jahreszeitenabhängig: so wirken sich z.B. in der Freiland-Gemüseproduktion höhere Temperaturen im Frühjahr bzw. Frühsommer im allgemeinen positiv, während der ohnehin warmen Jahreszeit dagegen eher negativ aus. Letzteres gilt vor allem für Gemüsearten, die auch noch unter kühlen Wachstumsbedingungen hohe Leistungen erbringen, wie z.B. Kopfsalat (Peet und Wolfe, 2000; Krug, 2002; Wheeler *et al.*, 1993).

Dagegen führt eine Temperaturerhöhung bei Pflanzen, die bereits im Bereich ihres Temperaturoptimums wachsen, überwiegend zu negativen Auswirkungen. So wird weltweit vor allem für die Tropen und Subtropen und innerhalb Europas v.a. für die mediterrane Landwirtschaft mit Einbußen auf Grund der ansteigenden Temperaturen bei eher abnehmenden Niederschlägen gerechnet (IPCC, 2007b; EEA, 2005; Maracchi *et al.*, 2005) – insbesondere, wenn Extremtemperaturen zu Enzymschäden führen (Rosenzweig und Hillel, 1998a). Dabei kann der Ausfall eines einzigen entscheidenden Enzyms zum Tod des ganzen Organismus führen, was erklären könnte, weshalb die meisten ackerbaulich genutzten Kulturen Temperaturen bis zu einem relativ engen Bereich zwischen 40 und 45°C ertragen (Arbol und Ingram, 1996). Darüber hinaus sind Pflanzen bei Temperaturen jenseits ihres Optimums generell anfälliger gegenüber weiteren

Stressfaktoren, wie z.B. Pathogenen, etc (Morecroft und Paterson, 2006).

Determinierte versus nicht-determinierte Kulturen

Bei Kulturen, deren Entwicklungsverlauf über Wärmesummen⁵⁸ gesteuert wird, den so genannten „determinierten“ Arten, führen wärmere Temperaturen zu einer Verkürzung der Entwicklung und damit bei annuellen Kulturen voraussichtlich zu einem geringeren Ertragspotential (Reddy und Hodges, 2000). So liegt der optimale Temperaturbereich für eine größtmögliche Ernte z.B. für Weizen bei nur ca. 15°C (Rosenzweig und Hillel, 1998a), was sich auch in dem Nord-Südgefälle von Weizenenerträgen in Europa sowie in Deutschland widerspiegelt (DEFRA, 2000; s. auch Kapitel 3.3.1). Bei Weizen führt eine Temperaturerhöhung von 1°C zu einer Verkürzung der Kornfüllungsphase um ca. 5-10% und damit verbunden einem entsprechenden Ertragsrückgang (Lawlor und Mitchell, 2000; Olesen *et al.*, 2000; Arbol und Ingram, 1996). In einer ähnlichen Größenordnung (8% Ertragsverlust pro °C) liegen auch Ergebnisse aus Südwestdeutschland für Weizen, für den Franzaring *et al.* (2007) eine Beziehung zwischen der Sommermitteltemperatur und dem Ertrag herstellten. Für Roggen war in dieser Studie der Ertragsabfall mit steigender Temperatur sogar noch etwas größer. Allerdings wurde in beiden Fällen nur die

⁵⁸ Berechnet nach „growing degree days“: °C x Tage mit Temperaturen über dem kulturspezifischen Minimum (i.a. >5°C); Wärmesummen können auch für die Modellierung der zukünftigen Entwicklung von Feldkulturen unter wärmeren Bedingungen herangezogen werden.

mittlere Temperatur über die Hauptvegetationsperiode und keine weiteren Einflussfaktoren, wie insbesondere der Niederschlag, berücksichtigt. Zudem gibt es auch Hinweise darauf, dass die Verkürzung der Kornfüllungsdauer teilweise über eine Zunahme der Kornfüllungsrate kompensiert wird, so dass ein Temperaturanstieg von 1°C eine Ertragsreduktion von nur ca. 3-4% mit sich bringen könnte (Stone und Savin, 1999).

Nicht-determinierte Kulturen, wie z.B. Zuckerrübe, Kartoffel oder Grünlandarten, reagieren dagegen auf die durch höhere Temperaturen verlängerte Vegetationsperiode mit einem fortgesetzten Wachstum. Sofern nicht wärmebedingt erhöhte Atmungsverluste auftreten (Demmers-Derks *et al.*, 1998) dürfte sich dies positiv auf die Erträge auswirken.

Auswirkungen der Verlängerung der Vegetationsperiode

Eine direkte Folge der allgemeinen Erwärmung ist die Vorverlegung phänologischer Phasen, insbesondere der Frühjahrsindikatoren, sowie die Verlängerung der Vegetationsperiode (Menzel *et al.*, 2001; Henniges *et al.*, 2005; Schröder *et al.*, 2005). So hat sich zwischen 1971 und 2000 der Beginn der Vegetationsperiode durchschnittlich ca. 7,5⁵⁹ Tage verfrüht (Menzel *et al.*, 2006) bzw. die Vegetationsperiode⁶⁰ um insgesamt ca. 10 Tage

durch den überwiegend späteren Herbstbeginn in Europa verlängert. Für landwirtschaftliche Kulturen (Apfel, Kirsche und Roggen) beschreiben Chmielewski *et al.* (2004) denselben Trend mit einer Verfrüherung der Frühjahrsentwicklung um 2 bis 3 Tage pro Dekade. Mit einher geht eine Arealverschiebung bzw. -erweiterung von bisher wärmelimitierten Arten. Parmesan und Yohe (2003) fanden bei der Untersuchung von 1700 Arten (diverse Taxa und Regionen) eine Wanderung in Richtung der Pole um 6 km und bei alpinen Arten um 6 Höhenmeter pro Dekade in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Im Durchschnitt rechnet man pro Grad Erwärmung mit einer Ausdehnung in höhere geographische Breiten um 100 bis 150 km bzw. um 100 bis 150 Höhenmeter, sofern eine Wanderung möglich ist (IPCC, 2002; Leuschner und Schipka, 2004).

Auch in Zukunft wird sich die Vegetationsperiode als unmittelbare Folge der Erwärmung weiter verlängern: dabei führt in Europa eine Erwärmung um 1⁰ C voraussichtlich zu einer Verfrüherung des Vegetationsbeginns um ca. eine Woche. Allerdings werden die Pflanzenentwicklung und insbesondere kritische ontogenetische Phasen, wie z.B. der Blühbeginn, in den gemäßigten und kühlen Klimaten neben der Temperatur in einem entscheidenden Ausmaß auch von der Photoperiodizität gesteuert. Diese verhindert u.a., dass warme Temperaturen zu Jahresbeginn eine riskante Pflanzenentwicklung induzieren. Dabei hängt die Stärke der Kontrolle durch die Photoperiodizität neben Wechselwirkungen mit der Temperatur vor allem von der jeweiligen Art ab (Körner, 2006).

⁵⁹ Parmesan und Yohe (2003) geben durchschnittlich 2,3 d pro Dekade an und Chmielewski und Rötzer (2002) fanden 8 d zw. 1989 und 1998.

⁶⁰ Als unmittelbare Konsequenz der Verlängerung der Vegetationsperiode nimmt z.B. auch die Amplitude des jährlichen CO₂-Zyklus seit den 60er Jahren zu (Keeling *et al.*, 1996 zitiert in Walther *et al.*, 2002).

Neben der Verlängerung der Vegetationsperiode wird sich auch ihr früherer Beginn auf Management und Jugendentwicklung der Anbaukulturen auswirken. Da die Zahl der Spätfröste insgesamt zwar abnehmen wird, die Spätfrostgefahr jedoch weiterhin bestehen bleiben wird, wird durch den früheren Vegetationsbeginn z.B. im Obst-anbau z.T. von einem erhöhten Spätfrost-risiko ausgegangen (SMUL, 2005; Chmielewski, 2004). Ein weiteres Risiko stellen höhere Temperaturen im Herbst dar, die sowohl Winterkulturen durch hohe Saat-beetemperaturen beeinträchtigen können als auch notwendige Abhärtungsprozesse gefährden. Da letzteres die Anfälligkeit gegenüber gelegentlich auftretenden Kälteperioden erhöhen kann, muss in einigen Regionen mit zunehmender Erwärmung sogar mit mehr Ausfällen durch Auswintern gerechnet werden (Mearns *et al.*, 1996, aus Rosenzweig und Hillel, 1998a). Ferner können Arten, deren Entwicklung durch Vernalisationsprozesse bestimmt wird, bei langfristig immer wärmeren Wintertemperaturen durch wärmere Temperaturen negativ beeinflusst werden (Evans, 1993). Bei Obstbäumen, wie z.B. sensitiven Aprikosensorten, kann in Frankreich bereits heute durch fehlende Kälte im Winter ein erhöhtes Auftreten von Nekrosen der Knospen und Abwurf der Blüten beobachtet werden (Seguin *et al.*, 2005).

4.1.1.2 Auswirkungen zunehmender Temperaturvariabilität und von Hitzestress

Die zunehmende Temperaturvariabilität unter zukünftigen Klimabedingungen

könnte gravierende Ertragseinbußen nach sich ziehen. So berechnen z.B. Porter und Semenov (2005) für Weizen an Hand von drei Simulationsmodellen, dass eine Verdopplung der Standardabweichung der Temperatur bei unverändertem Mittelwert den gleichen Ertragsrückgang bewirkt wie eine Temperaturerhöhung um 4°C sowie eine zweifach erhöhte Variabilität der Erträge. Dabei spielt die interannuelle Klimavariabilität (Temperatur- und Niederschlags-) insbesondere an Trockenstandorten für die Erträge annueller Kulturen eine entscheidende Rolle (Porter und Semenov, 1999).

Hitzestress und Hitzeschäden bei Pflanzen treten v.a. dann auf, wenn Trockenstress hinzutritt, der die Transpirationskühlung unterbindet. Bei Wassermangel schließen die Stomata und die Blatttemperatur steigt in der Folge an. Häufig wird die Stresssituation für die Pflanze noch durch starke solare Einstrahlung verstärkt, im ungünstigsten Fall auch durch starke Winde (Rosenzweig und Hillel, 1998a). Dabei schädigen nicht nur hohe Lufttemperaturen⁶¹ die Blätter der Pflanzen, auch die Wurzeln reagieren empfindlich auf hohe Bodentemperaturen. Wurzeln haben im Allgemeinen niedrigere Temperaturoptima und sind weniger an extreme oder plötzlich fluktuierende Temperaturen angepasst (Paulsen, 1994, zitiert in Rosenzweig und Hillel, 1998a). Die Senkenstärke der Wurzeln, d.h. die Fähigkeit, Assimilate zu speichern, nimmt im Vergleich zu anderen physiologischen Senken ab; zur gleichen Zeit steigt die Atmungsrate bis die metabolischen Substrate erschöpft sind. Dar-

⁶¹ Bereits ab 35 bis 40°C.

über hinaus beeinträchtigen hohe Temperaturen die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen und die Verlagerung von Kohlenhydraten in die Wurzeln bis bei längerem Einwirken schließlich das ganze Wurzelwachstum zum Erliegen kommt.

Allerdings sind landwirtschaftliche Kulturen und insbesondere auch Genotypen unterschiedlich sensitiv gegenüber Hitzestress. Dabei spielen metabolische Prozesse, wie erhöhte Enzym- und Membranstabilität sowie die Synthese von Hitzeschockproteinen zur Erhöhung der Thermotoleranz eine bedeutende Rolle (Arbol und Ingram, 1996; Rosenzweig und Hillel, 1998a).

Sensitivität verschiedener Entwicklungsstadien gegenüber hohen Temperaturen

Neben dem absoluten Überschreiten von artspezifischen Temperaturmaxima, spielt auch der *Zeitpunkt* des Auftretens von Hitzestress eine wichtige Rolle, da die Hitzeempfindlichkeit vom jeweiligen Entwicklungsstadium abhängt. Obwohl fast alle vegetativen und reproduktiven Phasen eine gewisse Anfälligkeit gegenüber Extremtemperaturen aufweisen, sind generative Stadien, wie vor allem die Anthese⁶² besonders hitzesensitiv (Rosenzweig und Hillel, 1998a; Arbol und Ingram, 1996). Hier können hohe Temperaturen zu Problemen bei der Befruchtung bis hin zur Sterilität führen, was bei Getreide (z.B. Weizen, Reis) durch die Verringerung der potentiellen Kornzahl deutliche Ertragseinbußen nach sich zieht. Unter mitteleuropäischen Anbaubedingungen ist die Sensi-

tität bei Hafer am höchsten, gefolgt von Gerste, Roggen und zuletzt Weizen (Chmielewski und Köhn, 1999). Das Korngewicht scheint dagegen etwas weniger empfindlich gegenüber Hitzestress zu sein (Arbol und Ingram, 1996). Auch bei anderen sensitiven Kulturen, wie z.B. Tomaten, können Blüten oder junge Früchte auf Grund von Hitzestress absterben. Treten solche Extremereignisse während der Vegetationsperiode vermehrt auf (vgl. Kapitel 2.3.2), muss mit relativ größeren Schäden gegenüber heutigen Verhältnissen gerechnet werden. Hitze als Stressfaktor für Kulturpflanzen würde damit auch in Mitteleuropa bzw. Deutschland an Bedeutung gewinnen (Weigel, 2004).

In Deutschland bereits beobachtete Auswirkungen ansteigender Temperaturen und zunehmenden Hitzestresses

Deutschlandweit koordiniert der Deutsche Wetterdienst die Erhebung der Verfrühung phänologischer Phasen (u.a. landwirtschaftlicher Kulturen) mit Hilfe Phänologischer Gärten (z.B. Menzel *et al.*, 2006) und vor allem dem Einsatz ehrenamtlicher Beobachter (Schröder *et al.*, 2005). Das Ergebnis wird mit Hilfe der phänologischen Uhr dargestellt, deren Verwendung sich mittlerweile in der Klimafolgenforschung etabliert hat. Auch für die einzelnen Bundesländer liegen zahlreiche Studien vor (z.B. für Hessen: Pampus, 2005; Baden-Württemberg: Schröder *et al.*, 2005; Rheinland-Pfalz: Henniges *et al.*, 2005 und Sachsen: Chmielewski *et al.*, 2004).

In nördlicheren Anbaugebieten führen z.B. Herrmann *et al.* (2004) die Ertragssteige-

⁶² Entfalten der Blüte

rungen der letzten Jahrzehnte bei Mais neben züchterischem und technischem Fortschritt u.a. auch auf die Temperaturerhöhung seit 1900 zurück. Auch Chmielewski und Köhn (2000) beobachteten in einem über 30-jährigen Feldexperiment seit Mitte der 80er Jahre zunehmende Roggenerträge in Folge höherer Korndichten und Kornzahlen, was auch auf die Klimaveränderung zurückzuführen sein könnte; dagegen wirken sich hohe Temperaturen während der Kornfüllungsphase negativ auf das Korngewicht von Roggen aus. Weiter fanden Franzaring *et al.* (2007) eine negative Beziehung zwischen positiven Abweichungen der Julitemperaturen und den Kartoffelerträgen für das 20ste Jahrhundert. Die im Jahr 2003 bzw. 2006 auf Grund von Dürrestress beobachteten Ertragsverluste wurden bereits in Kapitel 3.3.5 dargestellt.

4.1.2 Auswirkungen zunehmender CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre

CO₂ ist neben Wasser der wichtigste Grundstoff für die pflanzliche Produktion. Da die heutige CO₂-Konzentration in der Atmosphäre noch immer limitierend für Photosynthese bzw. Wachstum von C₃-Pflanzen⁶³ ist, ist davon auszugehen, dass eine ansteigende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre die stoffliche Produktion dieser Pflanzen prinzipiell fördert. Ein Blick zurück in die Erdgeschichte zeigt, dass erst die ansteigenden CO₂-Konzentra-

tionen nach dem Ende der Würm-Eiszeit von ca. 180 auf 280 ppm die Evolution der C₃-Pflanzen und damit die Entstehung prähistorischer Kulturen ermöglichte (Van der Merwe, 2005). Auch der anthropogen bedingte Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration von 280 ppm auf mittlerweile ca. 380 ppm seit der industriellen Revolution dürfte die Pflanzenproduktion mit gefördert haben; dies ist aber nicht belegt (Amthor 2001; Fangmeier und Franzaring 2006).

Diese Wirkung einer CO₂-Anreicherung der Atmosphäre auf das Pflanzenwachstum, auch *CO₂-Düngeeffekt* genannt, macht man sich z.B. in der Gewächshausproduktion von Nahrungs- bzw. Zierpflanzen seit langem zu nutze, indem man die Gewächshausluft künstlich mit CO₂ anreichert. Ein genereller Haupteffekt der ansteigenden CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre wird in einer Erhöhung der Ressourceneffizienz gesehen, da Pflanzen unter diesen Bedingungen effizienter mit den Ressourcen Licht, Wasser, Nährstoffe etc. umgehen sollen (Drake *et al.*, 1997). Neben der unmittelbaren Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen auf Photosynthese und Transpiration (s.u.) auf der Ebene des einzelnen Blattes leiten sich auf Grund u.a. der erhöhten Biomasseproduktion, veränderter (stofflicher) Zusammensetzung (s.u) und geringeren Wasserverbrauches der Pflanzenbestände zahlreiche Folge-Effekte auf Ökosystem- und Landschaftsebene ab, die letztendlich die gesamte Biosphäre betreffen (Körner, 2000). Im Folgenden werden einige Aspekte der Auswirkungen der CO₂-Anstiegs in der Atmosphäre kurz dargestellt.

⁶³ Der Name stammt von 3-Phosphoglycerat, einer aus 3 Kohlenstoff-Atomen bestehenden Verbindung, die das erste erfassbare Produkt der photosynthetischen CO₂-Fixierung darstellt; dieser Photosynthesetyp herrscht in den gemäßigten Breiten vor.

4.1.2.1 Physiologische und ökologische Auswirkungen

Einfluss auf Photosynthese und Respiration

Chlorophyllhaltige Pflanzen können mit Hilfe des Sonnenlichtes aus Kohlendioxid und Wasser Kohlehydrate herstellen. In der Evolution der Pflanzen haben sich für die Assimilation von CO₂ die Stoffwechselwege der *C₃-Pflanzen* und der *C₄-Pflanzen*⁶⁴ sowie derjenige sukkulenter Pflanzen, der so genannte *Crassulaceae Acid Metabolismus* (CAM) entwickelt. Letzterer soll auf Grund seiner geringen Verbreitung und wirtschaftlichen Bedeutung hier nicht weiter betrachtet werden (Still *et al.*, 2003). Erdgeschichtlich am ältesten sind die *C₃-Pflanzen*, zu denen ca. 90% der Landpflanzen gehören (Sage, 2005). Ihr Schlüsselenzym, die *Ribulose-1,5-Biphosphat-Carboxylase* (*Rubisco*), entwickelte sich zu einem Zeitpunkt, zu dem die Atmosphäre reich an CO₂ und arm an Sauerstoff war. In diesem Milieu traten bei der Kohlenstoffassimilation via *Calvin-Zyklus*⁶⁵ kaum Verluste auf Grund der Lichtatmung (*Photorespiration*) auf. Photorespiration führt zu einer teilweisen CO₂-Freisetzung, wobei insbesondere ein hoher Sauerstoff- (O₂) Partialdruck und hohe Temperaturen die Affinität von *Rubisco* zu O₂ steigen lassen: bereits oberhalb von 25°C beträgt die Verringerung der Photosynthese über 20% (Sage, 2005);

⁶⁴ Der Name stammt von Oxalazetat, einer aus 4 Kohlenstoff-Atomen bestehenden Verbindung.

⁶⁵ Der *Calvin-Zyklus* ist eine zyklische Folge von chemischen Umsetzungen, durch die Kohlendioxid zu Glucose und Wasser reduziert wird. Er dient den meisten photoautotrophen Lebewesen zur Assimilation von Kohlenstoff aus Kohlendioxid.

im Allgemeinen beträgt sie zwischen 20-40% (Long *et al.*, 2004).

Mit abnehmendem CO₂- und zunehmendem O₂-Partialdruck in der Atmosphäre entwickelten sich die *C₄-Pflanzen*, die natürlicher Weise v.a. auf trocken-heißen Standorten vorkommen. Sie verfügen über einen Mechanismus zur „Vorab-Anreicherung“ von CO₂ (Sage, 2005): dabei wird CO₂ zunächst in den *Mesophyllzellen*⁶⁶ an *Phosphoenolpyruvat* (PEP) fixiert und dann im *Calvinzyklus* weiterverarbeitet. Die Biomasseproduktion von *C₄-Pflanzen* ist im Allgemeinen höher als die von *C₃-Pflanzen*. Trotz der relativ geringen Artenzahl der *C₄-Pflanzen* ist ihre wirtschaftliche und ökologische Bedeutung hoch, da sie unter heutigen Klimabedingungen auf ca. 40% der Landoberfläche vorkommen und 20-25% der globalen Primärproduktivität von 3% der gesamten Pflanzenarten erwirtschaftet wird, die jeweils dem *C₄-Photosyntheseweg* angehören (Collatz *et al.*, 1998; Sage *et al.*, 1999). Bekannteste Vertreter der *C₄-Pflanzen* sind zahlreiche Gräser, darunter Zuckerrohr, Hirse, Chinaschilf und v.a. der auch in gemäßigten Breiten angebaute (Körner-)Mais.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die höhere Wasserausnutzungseffizienz⁶⁷ der *C₄-Pflanzen* (Young und Long, 2000; s.u.). Diese ergibt sich unmittelbar aus der höheren Nettophotosynthese sowie v.a. aus dem höheren CO₂-Partialdruck im Blattinneren, der über den CO₂-Regelkreis der Spaltöffnungen (*Stomata*) die Transpirati-

⁶⁶ Assimilationsgewebe

⁶⁷ *WUE-* (*water use efficiency*) Verhältnis des durch Photosynthese gebundenen Kohlenstoffs zu der dafür transpirierten Wassermenge [g kg⁻¹].

on (Verdunstung) reguliert. C₃-Pflanzen müssen dagegen für eine bessere CO₂-Versorgung die Spaltöffnungen weiter öffnen, um die stomatäre Leitfähigkeit zu erhöhen, was passiv zu höheren Wasserverlusten durch Transpiration führt.

Auf Grund der Unterschiede im Photosynthese-Stoffwechsel wird deutlich, weshalb vor allem Pflanzen des C₃-Typs durch steigende CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre begünstigt werden. Hier führt die Erhöhung der Konzentration des Ausgangssubstrates nicht nur zu einer insgesamt höheren Photosyntheserate, sondern auch zu einer höheren Nettophotosynthese durch die Unterdrückung der Photorespiration auf Grund der Verschiebung des CO₂/O₂-Partialdruckverhältnisses im Blattinneren (Abbildung 17). Experimentelle Studien und Modellrechnungen (z.B. in Moore *et al.*, 1999; Stitt, 1991 und Kimball *et al.*, 2002) ergaben, dass die Photosynthese terrestrischer C₃-Pflanzen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen in Abhängigkeit von Pflanzenart und Wuchsbedingungen um wenige bis zu 75% stimuliert werden kann.

Dabei nimmt die Steigerung der Netto-Photosyntheserate durch die Temperaturabhängigkeit der – pflanzenspezifischen – Selektivität von *Rubisco* für CO₂ bzw. O₂ mit ansteigenden Temperaturen zu (Drake *et al.*, 1997): so wächst die minimale Stimulierung durch Lichtatmung limitierter Photosynthese von 4% bei 10°C auf 35% bei 30°C, bzw. von 19% bei Temperaturen unter 25°C auf 30% bei Temperaturen oberhalb von 25°C unter experimenteller CO₂-Anreicherung (Ainsworth und Long, 2005). Aus dieser Interaktion zwischen

Temperatur und CO₂-Düngungseffekt folgt auch, dass das Temperaturoptimum lichtgesättigter Photosynthese mit zunehmenden CO₂-Konzentrationen ansteigt. Des Weiteren nimmt der obere Temperaturwert, bei dem noch eine positive CO₂-Assimilation aufrechterhalten werden kann, zu. Da höhere CO₂-Konzentrationen mit einem Temperaturanstieg einhergehen werden, ist dieser Effekt von größter Wichtigkeit; er könnte höhere Atmungsverluste bei höheren Temperaturen sowie die potentielle Benachteiligung niedriger Breiten bei der Klimaveränderung zum Teil kompensieren.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen auf die Netto-Photosynthese Licht limitierter Blätter, wie sie v.a. in den tieferen Schichten von Pflanzenbeständen vorkommen. Hier kommt es zu einer Verschiebung des *Lichtkompensationspunktes*⁶⁸ hin zu niedrigeren Lichtstärken und damit zu einem Anstieg der Nettophotosyntheseleistung des Pflanzenbestandes. Hierzu trägt neben der verbesserten Ausnutzung der Lichtquanten, auch die Reduktion der Dunkelatmung um ca. 20% für eine Verdopplung der CO₂-Konzentrationen bei (Drake *et al.*, 1997). Auf Grund der pro Flächeneinheit höheren Biomasse muss jedoch auch damit gerechnet werden, dass die Dunkelatmung bei erhöhten CO₂-Konzentrationen – im Gegensatz zur Lichtatmung – eher ansteigen wird (Rosenzweig und Hillel, 1998a).

⁶⁸ Der *Lichtkompensationspunkt* gibt an, ab welcher Beleuchtungsstärke das durch den Calvinzyklus fixierte Kohlendioxid und das bei der Atmung ausgeschiedene Kohlendioxid gerade gleich sind. Ab diesem Punkt findet eine C-Nettofixierung statt, d.h. die Pflanze ist in der Lage, Kohlenhydrate aufzubauen.

Allerdings wird für die Photosynthese häufig eine *Akklimatisierung* an erhöhte CO_2 -Konzentrationen in Folge längerer Exposition beobachtet (Sage, 1994; Ainsworth und Long, 2005). Dieser Prozess – auch „*down-regulation*“ genannt – führt dazu, dass die Photosyntheserate von Blättern, die an hohe CO_2 -Konzentrationen adaptiert sind, unter der nicht-adaptierter Pflanzen liegt. Eine entscheidende Rolle spielt dabei anscheinend die reduzierte Aktivität bzw. Produktion von *Rubisco*, die zum Einen auf den geringeren Bedarf an *Rubisco* bei höheren CO_2 -Gehalten zurückgeht und eine höhere Stickstoff-Effizienz impliziert. Eine weitere Erklärung ist die begrenzte Kapazität der Pflanz-

ze, die zusätzlichen Assimilate zu verwerthen (Drake *et al.*, 1997), was zu höheren Gehalten an (löslichen) Kohlenhydraten in den Blättern auf Grund veränderter biochemischer und molekularer Prozesse führt (Stitt, 1991; Moore *et al.*, 1999). Drake *et al.* (1997) berichten über eine durchschnittliche Reduktion des *Rubisco*-Gehaltes von 15% und einer Reduktion der Aktivität von ca. 24% unter erhöhten CO_2 -Bedingungen. Mit einher geht eine Reduktion der Dunkelatmung. Die gleichen Autoren weisen jedoch darauf hin, dass trotz Akklimatisierung der Nettphotosynthesewachst unter hohen CO_2 -Konzentrationen über dem des Vergleichsszenario liegt.

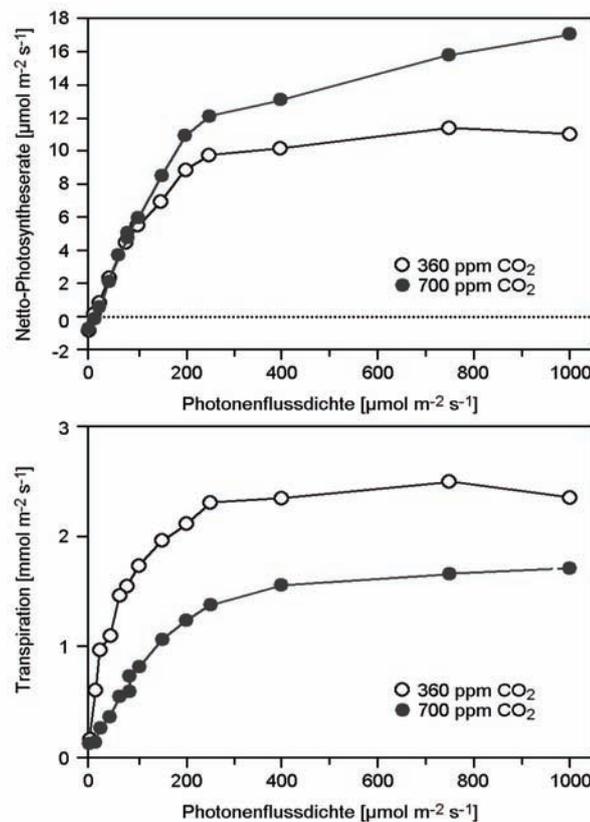


Abbildung 17: Photosynthese (oben) und Transpiration (unten) eines Sommerweizenblattes in Abhängigkeit von der eingestrahelten Lichtintensität bei gegenwärtiger (360 ppm; offene Symbole) und erhöhter (700 ppm; geschlossene Symbole) CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre (Burkart, unveröffentlicht).

Eine wichtige Voraussetzung für die Aufrechterhaltung hoher Photosyntheseraten auch unter erhöhten CO₂-Konzentrationen – und damit auch einer hohen Biomasseproduktion – scheint deshalb die physiologische Fähigkeit der Pflanze zu sein, effektiv Photosyntheseprodukte zu speichern, d.h. ihre Senkenkapazität zu nutzen (Rosenzweig und Hillel, 1998a). Weitere wichtige Faktoren sind die Wachstumsbedingungen, insbesondere eine ausreichende Stickstoffverfügbarkeit (Sage, 1994; Drake *et al.*, 1997; Ainsworth und Long, 2005). Unterschiede ergeben sich aus der Zugehörigkeit zu funktionellen Gruppen⁶⁹ (Ainsworth und Long, 2005) und aus der spezifischen Reaktion der Pflanzenart (Stitt, 1991). Während einige Pflanzen keine Reduktion der Photosyntheserate infolge von Akklimatisierungsprozessen zeigen, sind bei anderen Reaktionen im Verlauf von Tagen, Monaten und – bei Bäumen – sogar von Jahren gemessen worden (Adam *et al.*, 2004). Dies unterstreicht die Bedeutung langjähriger Untersuchungen für das Prozessverständnis. Über noch größere Zeitspannen erfolgen evolutive Anpassungsprozesse: so zeigen Untersuchungen an herbarisiertem Blattmaterial von Waldbäumen, dass sich die Spaltöffnungsflächen in den Blättern in den letzten 200 Jahren um 30% verringert haben; im gleichen Zeitraum stieg der CO₂-Gehalt der Atmosphäre um 25% an (Kriebitzsch *et al.*, 2005). Allerdings ist für den Gaswechsel an der Blattoberfläche weniger die Dichte als die Öffnungsweite

der Stomata von Bedeutung (Geijn und Goudriaan, 1996).

Einfluss auf die stomatäre Leitfähigkeit, die Transpiration und den Wasserhaushalt von Beständen

Bei erhöhten CO₂-Konzentrationen in der Außenluft wird durch die verringerte Öffnung der Stomata auch die Leitfähigkeit für Wasser und damit – bei gleichzeitig erhöhter Photosyntheserate – die Transpiration von der Pflanzenoberfläche reduziert (s. Abbildung 17). Allerdings fällt dieser CO₂-Effekt auf der Bestandesebene deutlich geringer aus als auf der Ebene einzelner Pflanzen oder gar Stomata. Während Morison (1985) für einzelne Pflanzen noch eine Erhöhung der Wasserausnutzungseffizienz von 70 bis 100% durch das Zusammenwirken von erhöhter Photosyntheseleistung und Transpirationsreduktion für möglich hielt und Kimball und Idso (1983) eine 45%ige Reduktion des Wasserverbrauchs für Mais ermittelten, führte die Verdopplung der CO₂-Konzentration in Kammer- oder auch Feldexperimenten bei Allen *et al.* (1996) in der Regel nur zu einer 10%-igen oder noch geringeren Reduktion des Wasserverbrauchs von landwirtschaftlichen Kulturen.

Dabei gingen Allen *et al.* (1996) davon aus, dass ca. 80% der erhöhten Wasserausnutzungseffizienz auf die gesteigerte Photosynthese und nur ca. 20% auf die verminderte Transpirationsrate zurückgehen. Letzterer Effekt trifft auch auf C₄-Pflanzen zu, die ebenso durch partielles Schließen der Stomata ihre Wasserausnutzungseffizienz erhöhen (Rosenzweig und Hillel, 1998a). Dabei ist die relative

⁶⁹ Die Autoren unterscheiden hier Sträucher, Ackerkulturen, Leguminosen, Gräser und Bäume, wobei insbesondere letztere mit deutlichen Biomassesteigerungen auf erhöhte CO₂-Konzentrationen reagieren.

Wachstumsstimulation sowohl für C₃- als auch für C₄-Pflanzen bei limitierter Wasserversorgung auf Grund der positiven Rückwirkung auf die Spaltöffnungen höher. Darüber hinaus konnte verschiedentlich gezeigt werden, dass die relative Empfindlichkeit gegenüber Trockenstress unter erhöhten CO₂-Konzentrationen abnimmt (Weigel, 2004). Auch die Stickstoffversorgung hat über die Steuerung der *Rubisco*-Aktivität und Konzentration einen (reziproken) Einfluss auf die Wasserausnutzungseffizienz (Kimball *et al.*, 2002).

Ein weiterer direkter Folgeeffekt der verringerten Öffnungsweite der Stomata ist die reduzierte Abgabe latenter Wärme und damit die Erhöhung der Blatt- bzw. Bestandestemperatur. Die Bedeutung dieses Effektes ist noch nicht völlig geklärt. Kimball *et al.* (2002) führen Werte zwischen 0,6 bis 1,1 °C an, und bei Idso *et al.* (1987) und Chaudhuri *et al.* (1986, zitiert in Rosenzweig und Hillel, 1998a), reichen die Werte unter kontrollierten Bedingungen von 1 bis 3°C. Auf Grund der höheren Blatttemperaturen steigt der intrazelluläre Dampfdruck und letztendlich die Transpiration um ca. 5-6% pro °C an (McKenney und Rosenberg, 1993). Dadurch wird ein Teil⁷⁰ der Wasserersparnis durch erhöhte CO₂-Konzentrationen kompensiert. Darüber hinaus könnten erhöhte Blatttemperaturen den pflanzlichen Stoffwechsel und Alterungsprozesse zusätzlich zur Klimaerwärmung beschleunigen (Rosenzweig und Hillel, 1998a; Geijn und Goudriaan, 1996; Lawlor und Mitchell, 2000). Da sich

letztendlich durch die verringerte Verdunstungskühlung auch die Umgebungstemperatur erwärmt, handelt es sich hierbei um einen weiteren Beitrag zur Klimaerwärmung von 1-2°C, der in den Klimamodellen berücksichtigt werden muss (Drake *et al.*, 1997).

Ob sich die effizientere Wasserausnutzung auf der Ebene des Blattes bzw. der Pflanze tatsächlich in einem niedrigeren Wasserverbrauch des Bestandes auswirken wird und damit bis hin zum Wasserhaushalt ganzer Landschaften Bedeutung hätte, hängt von vielen Faktoren ab (Kimball *et al.*, 2002; van de Geijn und Goudriaan, 1996). Zum einen beruht die Steigerung der Wasserausnutzungseffizienz v.a. auf einer Erhöhung der Photosyntheserate. Die erhöhte Biomasseproduktion bewirkt wiederum einen höheren Wasserverbrauch. Eine schnellere Pflanzenentwicklung wird häufig zu einer rascheren Bodenbedeckung führen, und damit die Evaporation vom Boden senken. Andererseits verursacht ein erhöhter Blattflächenindex eine höhere Interzeption und damit auch Evaporation vom Kronendach (Rosenzweig und Hillel, 1998a). Letztendlich verbraucht eine schnellere Vegetationsentwicklung bei höheren Temperaturen weniger Wasser – allerdings um den Preis potentieller Ernteverluste.

Eine weitere mögliche Konsequenz einer verringerten Bestandestranspiration sind höhere Bodenfeuchten, wie z.B. von Volk *et al.* (2000) für (C₃-) Grassland unter erhöhten CO₂-Bedingungen gemessen. Dabei überwog dieser *indirekte* CO₂-Effekt den *direkten* Düngeeffekt deutlich. Auch Niklaus (2007) hält die Wasserersparnis

⁷⁰ Genauer: die Differenz zwischen der Reduktion der stomatären Leitfähigkeit und der Reduktion der Transpiration.

für die häufig wichtigere Komponente des CO₂-Düngeeffektes – insbesondere in Trockenstress gefährdeten Gebieten (z.B. Morgan *et al.*, 2004). In einem trockenen Jahr würde dieses Bodenwasser den Pflanzen zusätzlich zur Verfügung stehen. Dieser Effekt könnte dem im Zuge der Klimaerwärmung häufiger auftretenden Trockenstress entgegen wirken.

4.1.2.2 Agronomische Auswirkungen auf Biomasseproduktion bzw. Ertrag

Die unter ansteigender CO₂-Konzentration in der Atmosphäre stimulierte Netto-Photosynthese schlägt sich in der Regel in einer erhöhten Biomasseproduktion nieder (Allen *et al.*, 1996). Dabei wird nicht nur eine Vergrößerung sondern auch eine erhöhte Anzahl einzelner Pflanzenorgane festgestellt. Neben einer erhöhten Blattzahl weisen auch Spross und Wurzel häufig stärkere Verzweigungen auf. Die Zahl der Blüten und Früchte kann ebenfalls erhöht sein. Da Verzweigung und Blattanatomie von großer Bedeutung für den Aufbau der Vegetationsdecke sind, beeinflussen sie ihrerseits die Lichtausbeute und damit die Photosyntheseleistung und Biomassebildung des Bestandes (Brunnert, 1994).

Für die landwirtschaftliche Produktion ist dabei von entscheidender Bedeutung, in wie weit der Ertrag von Kulturpflanzen beeinflusst wird. Besonders günstig scheint die Situation bei landwirtschaftlichen Kulturen, deren unterirdische Speicherorgane geerntet werden, da es in diesen zu einer bevorzugten Anreicherung von Trockenmasse kommt (Kimball,

1983; Miglietta *et al.*, 2000; Bindi *et al.*, 2006). Generell gibt es eine allgemeine Tendenz hin zu einem zunehmenden Wurzel-Sprossverhältnis bei erhöhten CO₂-Konzentrationen, wenn auch die Schwankungsbreite zwischen einzelnen Versuchsergebnissen hoch ist. Eine mögliche Erklärung ist, dass bei der Photosynthese freier werdender Stickstoff zusätzlich für anabole Prozesse in die Wurzeln verlagert wird. Verstärkend wirken sich sowohl Wasser- als auch Nährstoffmangel aus (Kimball *et al.*, 2002; Rosenzweig und Hillel, 1998a).

Während bei Grünland ein Zuwachs der oberirdischen Biomasse überwiegend zunehmenden Erträgen entspricht, ist bei Getreide die Beeinflussung des Ernteindex⁷¹ ein entscheidender Parameter. Nach Allen *et al.* (1996) scheint der Ernteindex mit zunehmenden CO₂-Konzentrationen und Temperaturen abzunehmen. Gründe hierfür könnten in den Veränderungen von Pflanzenorganen liegen, u.a. der Zunahme des Stamm- bzw. Stengelgewichtes, der Blattfläche⁷² sowie der Blattdicke⁷³ (Rosenzweig und Hillel, 1998a). Dagegen konnten Cure und Acock (1986) in ihrer Literaturstudie, bei insgesamt eher positiver Tendenz, keinen signifikanten Effekt erhöhter CO₂-Konzentrationen auf den Ernteindex feststellen. Dabei scheint der Ertragszuwachs generell eher auf eine stärkere Bestockung und eine höhere Anzahl von Körnern als ein höheres Korngewicht zurückzugehen.

⁷¹ Verhältnis von Kornmasse zu gesamter oberirdischer Biomasse.

⁷² *Leaf area index*, LAI – u.a. Basis für die erhöhte Biomasseproduktion.

⁷³ *Specific leaf area*, SLA; Ursache ist die Akkumulation löslicher Kohlehydrate.

In den vergangenen Jahrzehnten ist eine Vielzahl von Studien zu den Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf den Ertrag landwirtschaftlicher Nutzpflanzen durchgeführt worden (z.B. in Kimball, 1983; Cure und Acock, 1986; Kenny *et al.*, 1993; Rosenzweig und Hillel, 1998a; Reddy und Hodges, 2000, Kimball *et al.*, 2002). Besonders hoch ist die Anzahl der Studien zur Ertragsentwicklung von Weizen (z.B. Bender *et al.*, 1999a; Amthor, 2001), der weltweit wichtigsten landwirtschaftlichen Kultur, die zudem in einer Vielzahl von Klimaten angebaut wird (Lawlor und Mitchell, 2000). Auch die Wirkung auf die Grundnahrungsmittel Reis, Mais, Soja und, in etwas geringerem Umfang, Hirse (Sorghum) ist untersucht worden (z.B. Long *et al.*, 2005).

Da unter erhöhten CO₂-Konzentrationen jede Pflanzenart, häufig sogar jede Sorte, in Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen⁷⁴ in ihrem Ertragszuwachs anders reagiert – wie z.B. für verschiedene Weizensorten in Tabelle 7 dargestellt – ist die Variabilität der Versuchsergebnisse allerdings entsprechend hoch. Bereits in der Literaturstudie von Kimball (1983) reichte der Ertragszuwachs verschiedener Kulturpflanzen aus Treibhaus- bzw. Kammerversuchen von negativen Werten bis zu über 100%. Generell scheinen schnell wachsende Arten stärker in ihrer Biomasseproduktion stimuliert zu werden als langsam wachsende. Ferner reagieren Pflanzen bei hoher Nährstoffversorgung – mit Ausnahme der Wasserversorgung – stärker als nährstofflimitierte (Poorter, 1998). Darüber hinaus ist zu erwarten, dass nicht-

determinierte Pflanzen, wie z.B. Kartoffeln, stärker als determinierte, wie z.B. Getreide, in ihrem Wachstum gefördert werden.

Tabelle 7: Ertragsveränderungen (% im Vergleich zur heutigen CO₂-Konzentration) verschiedener Sommerweizensorten ermittelt in unterschiedlichen CO₂-Anreicherungsexperimenten (OTC = open top chambers ; FT = Folientunnel) (aus Weigel, 2004; nach Fangmeier und Jäger, 2001)

Sorte	Anzucht	Mittlere Ertragsveränderung [%]
Turbo	OTC	+ 35
Nandu	OTC	+ 47
MV 16	OTC	- 2
Hartog	FT	+ 11 bis + 36
Late	FT	+ 34
Hereward	FT	+ 7 bis + 44 bzw. bis + 168
Minaret	OTC	+ 35 bis + 43
Star	OTC	+ 26

Ältere Literaturzusammenstellungen geben an, dass die Erträge im Mittel bei C₃-Pflanzen um ca. 33%, bei C₄-Pflanzen um ca. 10% zunehmen, wenn die Umgebungsluft der Pflanzen mit CO₂ angereichert wurde (Kimball, 1983; Cure und Acock, 1986). Werte in dieser Größenordnung gehen häufig auch in Modelle für die Simulation künftiger Erträge unter Klimaveränderungen ein. Allerdings mehren sich in jüngster Zeit Zweifel, in wie weit diese Wachstums- und Ertragsabschätzungen, die häufig unter optimierten Bedingungen in Kammerversuchen gewonnen wurden, auf die realen Bedingungen der Landwirtschaft übertragen werden können (Kimball *et al.*, 2002; Parry *et al.*, 2004; Ainsworth und Long, 2005; Long *et al.*, 2005). So betragen die unter Freilandbe-

⁷⁴ z.B.: künstlich/natürlich; limitiertes/nichtlimitiertes Nährstoff- und Wasserangebot, Jahreszeit etc.

dingungen, überwiegend in so genannten FACE⁷⁵-Experimenten, ermittelten Ertragszuwächse meist nur ca. ein Drittel bis die Hälfte der aus früheren Kammerversuchen stammenden Werte. Long *et al.* (2005) mittelten aus verschiedenen FACE-Experimenten einen Ertragsanstieg von 11% für C₃-Kulturen, und von nur 7% für die fünf wichtigsten Grundnahrungsmittel (s.u.). Bei Ainsworth und Long (2005) liegen die Ertragsanstiege unter Einbeziehen der CO₂-sensitiven Baumwolle im Mittel immerhin bei 17%.

Erschwerend für einen unmittelbaren Vergleich „alter“ und „neuer“ Versuchsergebnisse ist der Umstand, dass die unterschiedlichen Versuchsansätze zusätzlich häufig sowohl unterschiedlich hohe CO₂-Konzentrationen der Kontrolle als auch der Behandlung beinhalten, was nach Tubiello *et al.* (2007) u.a. die Ursache für den unterschiedlich hoch ausfallenden CO₂-Effekt sein könnte. Während die Kammerversuche älteren Datums meist CO₂-Konzentrationen von 660 ppm applizierten, arbeiten die FACE-Versuche jüngeren Datums im Allgemeinen mit CO₂-Konzentrationen zwischen 550-575 ppm (Long *et al.*, 2005). Dabei entspricht ein 33%-iger Ertragsanstieg bei 660 ppm CO₂ einem Ertragszuwachs von 23% bei 560 ppm, sofern ein linearer Anstieg der Reaktion zugrunde gelegt wird, und einem Ertragsanstieg von 25% unter der Annahme eines hyperbolischen Anstieges. Ab ca. 650 ppm soll eine CO₂-Sättigungskonzentration für C₃-Pflanzen erreicht sein (Bunce, 1992).

Getreide

Im Einzelnen betragen die bei Long *et al.* (2005) angeführten Ertragszuwächse für eine CO₂-Konzentration von ca. 550 ppm für Sommerweizen 8% (Kimball *et al.*, 1995) und für Reis 10% (Kim *et al.*, 2003); für die C₄-Pflanzen Mais und Hirse (Sorghum) wurde dagegen kein signifikanter Ertragsanstieg festgestellt (Ottman *et al.*, 2001; Leakey *et al.*, unveröffentlichte Daten des Illinois-SoyFACE-Experiments). Allerdings war die Biomasse in den Sorghum-Parzellen unter Trockenstress erhöht, was in Zukunft einen positiven indirekten Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen auf Grund einer verbesserten Wasserversorgung erwarten lässt (Ottman *et al.*, 2001). Auch bei Mais führt die Verdopplung der CO₂-Konzentration gegenüber dem heutigen Wert zu einer verbesserten Wasserverfügbarkeit; ältere Versuche ergaben im Durchschnitt eine um 45% verringerte Transpiration (Kimball und Idso, 1983). In einer ähnlichen Größenordnung liegen die von Kimball *et al.* (2002) zitierten Werte einer 12%-igen Ertragssteigerung bei Weizen und Reis bei hoher Stickstoff- und Wasserversorgung. Während eine limitierende Stickstoffversorgung zu einem nur 7%-igen Ertragszuwachs führte, stiegen die Weizenerträge unter limitierender Wasserversorgung um 23%.

Hack- und andere Blattfrüchte

Neben Getreide spielen für die menschliche Ernährung weltweit auch *Wurzel- und*

⁷⁵ Free Air Carbondioxide Enrichment

*Knollenkulturen*⁷⁶ eine wichtige Rolle. Mit Ausnahme der Kartoffel sind vergleichsweise wenige Untersuchungen zu den Auswirkungen ansteigender CO₂-Konzentrationen auf diese wichtige Gruppe landwirtschaftlicher Kulturen durchgeführt worden (Miglietta *et al.*, 2000), die auf Grund ihrer ausgeprägten Senkenkapazität und spezifischer Assimilatverlagerung innerhalb der Pflanze⁷⁷ besonders stark reagieren sollten. Dabei nimmt die verstärkte C-Allokation in den Wurzelbereich unter erhöhten CO₂-Konzentrationen bei Nährstoffmangel noch zu (z.B. Hill, 2006). Tatsächlich sind die berichteten Ertragszuwächse für Kartoffeln sowohl in Kammer- als auch in Freilandversuchen von z.T. mehr als 50% im Vergleich zu anderen Kulturen relativ hoch (Kimball, 1983; Bindi *et al.*, 1998 und 2000, jeweils zitiert in Finnan *et al.*, 2005; Bindi *et al.*, 2006). Ursächlich dafür waren vor allem sowohl eine höhere Knollenanzahl, als auch ein höheres Knollengewicht.

Andererseits finden sich selbst zwischen verschiedenen FACE-Experimenten ganz erhebliche Unterschiede. Während FACE-Experimente in Italien bei 550 bzw. 560 ppm CO₂ Ertragssteigerungen zwischen 30% bis 59% ergaben, wurden in deutschen Untersuchungen nur knapp 3% bis 9%, ermittelt (Miglietta *et al.*, 1998; Bindi *et al.*, 1998, 2000, Fangmeier, 1998, 2000; jeweils zitiert in Finnan *et al.*, 2005; Bindi

et al., 2006). Darüber hinaus berichten Miglietta *et al.* (1998) von einem 10%-igen Anstieg der Kartoffelerträge pro 100 ppm CO₂-Anstieg bis zu einem „Grenzwert“ von 680 ppm CO₂. Andererseits verursachen erhöhte CO₂-Konzentrationen auch höhere physiologische „Betriebskosten“: so führen Finnan *et al.* (2005) die Zunahme der Respirationsrate mit zunehmender Vegetationsperiode auf höhere Erhaltungskosten auf Grund schnellerer Alterung zurück. Neben der natürlichen Jahr-zu-Jahr-Variabilität spielen außerdem die verschiedenen Sorten und die Anbau-praktiken eine Rolle für die Variabilität der CO₂-Effekte. Weitere wichtige Einflussfaktoren sind Tageslänge und Strahlungsstärke (Wheeler *et al.*, 1991).

In der bereits oben angeführten Studie zitieren Long *et al.* (2005) Ertragssteigerungen von 15% (Morgan *et al.*, 2005) für Soja, einer Leguminose. Leguminosen reagieren wegen der autonomen Stickstofffixierung aus der Luft vergleichsweise stark auf den CO₂-Düngeeffekt (z.B. Lüscher *et al.*, 2000; Hebeisen *et al.*, 1997).

Grünland

Die Produktivität von Grünland steigt im Allgemeinen mit steigender Temperatur und Feuchte an, solange der Optimumbereich für das Pflanzenwachstum nicht überschritten wird. Insbesondere die rasche Frühjahrserwärmung dürfte sich positiv auf die Grünlandproduktivität auswirken; im Verlauf der Vegetationsperiode führen Temperaturextreme dann eher zu Ertragsverlusten (DEFRA, 2000). Auch auf Grund des „wassersparenden“ Effektes erhöhter CO₂-Konzentrationen vermuten

⁷⁶ Wichtige Vertreter sind neben der (gemeinen) Kartoffel (*Solanum tuberosum* L.), die 46% der globalen Produktion dieser Gruppe ausmacht (FAOSTAT, 2004), z.B. auch Süßkartoffel (*Ipomea batatas*), Maniok (*Manihot esculenta*), Yams (*Dioscorea* subsp.), sowie Gemüsesorten, wie z.B. Rettich (*Raphanus sativus*), Karotte (*Daucus carota* subsp.) und Kohlrabi (*Brassica oleracea*).

⁷⁷ Entlang des apoplastischen Phloem-Transports

Morgan et al. (2004), dass im temperierten Klimabereich insbesondere unter Sitautionen mit schlechter Wasserversorgung mit einer höheren Biomassebildung zu rechnen sein dürfte. Hinzu kommt der „direkte“ CO₂-Düngeeffekt, der dort die Trockenmasseproduktion von Grassland auf fruchtbaren Böden stimuliert (Fuhrer, 2003).

So wurde z.B. im Schweizer FACE Experiment der Ertrag von Deutschem Weidelgras (*Lolium perenne*), einem verbreiteten Weide- und Schnittgras, durch erhöhte CO₂-Konzentrationen durchschnittlich um 7%, der von Weißklee (*Trifolium repens* L.) zwischen 10 und 20% stimuliert (Hebeisen et al., 1997). In einer Modellsimulation zur Auswirkung des Klimawandels und besonders des CO₂-Düngeeffektes für Dauergrünland in der Schweiz wurden Ertragssteigerungen in einer ähnlichen Größenordnung von 6-20% modelliert (Fuhrer, 1997). Dabei schwankte die Ertragsbeeinflussung von *Lolium* in Abhängigkeit von der Stickstoffversorgung von einem Verlust von bis zu -20% bis zu einer Stimulation von +27% bei hoher Stickstoffdüngung. Dabei scheint auch das Entwicklungsstadium über die Veränderung der Senkenstärke von Bedeutung zu sein (Daepf et al., 2001). Bei Stickstoffmangel wurde der oberirdische Biomasserückgang zudem von einer starken Zunahme der Wurzelbiomasse von bis zu über 100% begleitet (Hebeisen et al., 1997). Durch die relative Förderung von Leguminosen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen in Klee-Grasmischungen kann sich unter reduziertem Nährstoffangebot deshalb auch die Zusammensetzung hin zu einem höheren

Leguminosen-Anteil verschieben (Schenk et al. 1997a, b; Lüscher et al., 2006; Hartwig und Sadowsky, 2006); darüber hinaus wird die Gesamtstickstoffversorgung des Grünlandökosystem verbessert (Zanetti et al., 1997).

Sonderkulturen

Bäume sollten auf Grund ihrer Senkenstärke besonders sensitiv auf den CO₂-Düngeeffekt reagieren. Dies gilt insbesondere für *Obstbäume*, die zudem selten Nährstoff- oder Wasser limitiert sind (Janssens et al., 2000). Allerdings haben nur wenige Untersuchungen die Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf Obstbäume geprüft. Ainsworth und Long (2005) kamen bei der Auswertung zwölf großflächiger FACE-Versuche zu dem Ergebnis, dass Bäume unter FACE-Bedingungen mit durchschnittlich 28% mehr Trockensubstanz die höchste Wachstumsstimulation im Vergleich zu anderen funktionellen Pflanzengruppen (wie z.B. Ackerkulturen, Leguminosen, Gräser etc.) aufweisen. Allerdings handelt es sich in den meisten diesbezüglichen Experimenten um junge, schnell wachsende Bäume, die nur eingeschränkt Aussagen über das Verhalten älterer Bäume erlauben. So berichten z.B. Adam et al. (2004) aus einem der wenigen langjährigen CO₂-Anreicherungsexperimente⁷⁸ von einer Akklimatisation der Photosynthese und damit einhergehenden Reduktion des oberirdischen Biomassezuwachses von Zitrusbäumen (Bitterorangen), die im sechsten Versuchs-

⁷⁸ Dabei handelt es sich allerdings nicht um ein FACE-, sondern ein Open-Top-Experiment (OTC, open top chamber), was einem nach oben offenen Kammerversuch im Freiland entspricht.

jahr begann und sich noch im 14. Jahr deutlich zeigte. Neben der Zugehörigkeit zu einer bestimmten funktionellen Gruppe sind allerdings weitere Faktoren, wie v.a. die Umweltbedingungen und die Reaktion der jeweiligen Art wichtige Kriterien für die spezifische CO₂-Sensitivität (Nowak *et al.*, 2004). Schenk *et al.* (1997 a, b) und Manderscheid *et al.* (1997) untersuchten die Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf Ertragsleistungen, Wachstum und Futterqualität in Modellökosystemen mit Klee-/Weidelgras-Gemischen einheimischer Sorten. Dabei ergaben sich u.a. eine deutliche Förderung des Klee- auf Kosten des Graswachstums durch die CO₂-Anreicherung sowie Veränderungen der Mineralstoffgehalte der Klee- und Graspflanzen.

In Bezug auf den Obstertrag fanden Idso und Kimball (1997) in der o.g. Versuchsanstellung mit Bitterorangen, dass sich der CO₂-Düngeeffekt bei Zitrusfrüchten wie bereits für Ackerkulturen beschrieben in erster Linie in einer höheren Anzahl an Früchten auswirkt. Dagegen bewirkte eine CO₂-Anreicherung bei *Wein* in einer Mini-FACE-Anlage sowohl eine Steigerung der frischen Beerenmenge als auch der Beerengröße um 23 bzw. 47% (Bindi *et al.*, 1995). Allerdings deuten einige Langzeitstudien auch darauf hin, dass unter erhöhten CO₂-Konzentrationen eine Verschiebung der generativen zur vegetativen Entwicklung eintreten könnte (Bindi *et al.*, 1996a, zitiert in Schultz, 2005), die auf Grund der proportional höheren Blattflächenentwicklung die ohnehin kritischer werdende Wasserversorgung zusätzlich anspannen könnte. Diese Entwicklung führte in Modellstudien zu Ertragsredukti-

onen, wobei die Sorte Cabernet Sauvignon deutlich sensitiver reagierte als die Sorte Sangiovese (Bindi *et al.*, 1996b, zitiert in Schultz, 2005).

Für *Gemüse* kann auf Grund der Vielfalt der Arten nur eine allgemeine Aussage getroffen werden: Sorten mit einem hohen Ernteindex, ausgeprägter Senkenstärke, nicht-determinierter Entwicklung und langer Vegetationsperiode werden voraussichtlich am stärksten auf hohe CO₂-Konzentrationen reagieren (Peet und Wolfe, 2000). Ähnlich wie für Getreide wurde auch für Gemüse, wie z.B. Gurken festgestellt, dass Ertragszuwächse von 34% vor allem auf eine höhere Anzahl an geernteten Früchten und erst in zweiter Linie auf größere Früchte zurückgehen (Nederhoff, 1994, zitiert in Peet und Wolfe, 2000). Wheeler *et al.* (1993, 1995) berichten für Karotten sogar Ertragszunahmen von ca. 50% und für Speisezwiebeln von bis zu 86% – beides Vertreter der Wurzel- bzw. Zwiebelgemüse mit ausgeprägter Senkenstärke. Bei diesen Arbeiten handelt es sich allerdings – wie insgesamt für Gemüsekulturen vorherrschend – um Kammer- bzw. andere eher naturferne (Folientunnel-)Experimente mit ähnlich hohen CO₂-Effekten wie von Kimball (1983) und Cure und Acock (1986) beschrieben. Zu berücksichtigen ist ferner, dass bei Gemüse auch optisch-ästhetische Aspekte eine Rolle spielen, die unter 4.1.7 näher beschrieben werden.

Für deutsche Verhältnisse relevante Studien

Besonders interessant für die deutsche Landwirtschaft sind Ergebnisse der unter

hiesigen Verhältnissen durchgeführten Freilanduntersuchungen, wie z.B. dem Braunschweiger FACE-Experiment, das die Auswirkungen einer CO₂-Anreicherung auf eine mehrgliedrige, für die Region typische Fruchtfolge, zwischen 1999 und 2005 untersuchte. Die einzelnen Fruchtfolgeglieder waren Wintergerste, Weidelgras, Zuckerrübe und Winterweizen, die unter heutiger und erhöhter CO₂-Konzentration (375 versus 550 ppm), jeweils bei hoher und niedriger Stickstoffversorgung angebaut wurden (Weigel *et al.*, 2006). Hier betragen die Ertragssteigerungen für Winterweizen durchschnittlich 16%; bei Gerste lag die Ertragssteigerung im ersten Jahr (2000) bei 8%, im Ausnahmejahr 2003 – bei insgesamt deutlich niedrigerem Ertragsniveau – bei 16%, was wiederum auf den indirekten CO₂-Effekt der Wasserersparnis hinweist.

Ein deutliche Interaktion zwischen CO₂-Anreicherung und Wasserversorgung konnte von der gleichen Arbeitsgruppe in Feldversuchen mit sog. Open-top-Kammern ermittelt werden. Eine Verdoppelung der CO₂-Konzentration gegenüber dem heutigen Wert unter Wasserstressbedingungen steigerte die Biomasse bzw. den Ertrag von Winterweizen um mindestens 44%, bei normaler Wasserversorgung dagegen nur um ca. 10% (Manderscheid und Weigel, 2007).

Wie bereits postuliert, ging der Ertragszuwachs in den Fruchtfolgeversuchen mit der FACE-Technik primär auf die Zunahme der Kornzahl zurück, während höhere Tausendkorngewichte nur eine untergeordnete Rolle spielten. Der Ernteindex erwies sich hingegen als nicht von der

CO₂-Konzentration abhängig. Wider Erwarten zeigte sich kein signifikanter Einfluss des Stickstoffdüngensniveaus. In Folge der geringeren Bestandestranspiration stieg die Oberflächentemperatur der Winterweizen- bzw. Wintergerstebestände in Abhängigkeit vom diurnalen Strahlungsgang um bis zu 2°C. Die nutzbare Feldkapazität, d.h. der Anteil des pflanzennutzbaren Bodenwassers, lag im Mittel über die Vegetationsperiode unter erhöhten CO₂-Konzentrationen um ca. 5% höher (Manderscheid und Weigel, 2006).

Bei der Zuckerrübe betrug die Ertragssteigerung bei ausreichender Stickstoffdüngung entgegen den Erwartungen bei der Gesamtbiomasse bzw. bei der Frischrübenmasse nur ca. 7-8% und beim Zuckrertrag nur ca. 10%. Der spätsommerliche Abfall des Blattflächenindex unter erhöhten CO₂-Konzentrationen lässt vermuten, dass es sich hierbei um eine Senkenlimitierung handelt, die es dieser Rübensorte nicht erlaubt, den CO₂-Effekt auf die Photosyntheserate und die Ertragsbildung vollständig auszuschöpfen (Manderscheid *et al.*, 2003, 2005). Jones *et al.* (2003), nehmen eine Steigerung der Zuckerrübenbiomasse und -erträge in Europa von 9% für CO₂-Konzentrationen von 470 ppm an. Für die Kartoffel belief sich die Ertragssteigerung in einem deutschen Mini-FACE-Experiment - wie bereits erwähnt - nur auf 3% bis 9% (Fangmeier, 1998, 2000; zitiert in Finnan *et al.*, 2005). Weidelgras als Zwischenfrucht reagierte im Braunschweiger FACE-Experiment nicht mit signifikanten Ertragssteigerungen auf die die relativ kurzzeitige (ca. 6 Wochen) CO₂-Anreicherung im Herbst und Winter. Dagegen ergab das Giessener FACE-

Experiment in einem extensiven Dauergrünland unter Mähnutzung (Kammann *et al.*, 2005) unter einer von Jahr zu Jahr um ca. 50 ppm steigenden CO₂-Konzentration nach ca. 6-8 Jahren eine Steigerung der Grassproduktion um ca. 10%.

4.1.3 Auswirkungen von troposphärischem Ozon

Troposphärisches Ozon (O₃) ist der Luftschadstoff mit dem höchsten phytotoxischen Potential in vielen Regionen der Erde, einschließlich Europas. O₃ ist ein sog. sekundärer Luftschadstoff und entsteht unter dem Einfluss des Sonnenlichtes aus Vorläufersubstanzen⁷⁹, die aus anthropogenen (v.a. aus dem Verkehrssektor) aber auch aus natürlichen Quellen stammen. Neben einem auch als „Sommersmog“ bekannten O₃-Maximum während der Sommermonate tritt auf der nördlichen Hemisphäre häufig auch ein Frühjahrspeak auf. Die Ursachen für dieses Phänomen sind noch nicht endgültig geklärt (Vingarzan, 2004). Insbesondere in Asien steigen die Emissionen der Vorläufersubstanzen mit zunehmender Wirtschaftskraft deutlich an (im Gegensatz zu der gegenwärtigen Entwicklung in Europa und den USA) und damit auch die Probleme mit der O₃-Belastung von Mensch und Natur (Ashmore, 2005).

Bei mittleren O₃-Konzentrationen zwischen 40 und 75 ppb während der Vegetationsperiode von April bis September (s. Kapitel 2.1) wird auch in Europa häufig

der jeweilige Richtwert⁸⁰ zum Schutz der Vegetation überschritten (s.u.). Dies beeinträchtigt u.a. auch die landwirtschaftliche Produktion (Chameides *et al.*, 1994). Für die globale Ernährungssicherheit könnte es sich als kritisch herausstellen, dass insbesondere Regionen mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung, wie Westeuropa, der mittlere Westen und Osten der USA und China mit die höchsten Werte an O₃-Hintergrundbelastung aufweisen (IPCC, 2001a; Chameides *et al.*, 1994).

Allerdings basieren die gegenwärtigen Richtwerte nur auf Expositionswerten, ohne die tatsächliche Aufnahme durch die Pflanze (O₃-Fluss) zu beachten. Dies erfordert die Kenntnis weiterer pflanzenspezifischer sowie ökophysiologischer Parameter (Bender und Weigel, 2002; Fuhrer *et al.*, 1997). Da die Aufnahme von O₃ in die Pflanze fast ausschließlich über die Stomata erfolgt, sind dabei vor allem Faktoren, die die Spaltöffnungsweite regulieren (z.B. Blatttemperatur, Bodenwasser-
verfügbarkeit, atmosphärische CO₂-Konzentration) entscheidend (Jarvis, 1976). Typischerweise ist die stomatare Leitfähigkeit unter warmen, humiden Bedingungen hoch – niedrig dagegen unter heißen, trockenen Klimabedingungen. Demzufolge werden im mediterranen Raum zwar die höchsten O₃-Konzentrationen gemessen, die höchsten Aufnahmeraten bzw. O₃-Flüsse z.B. bei Weizen treten hingegen häufig im südli-

⁷⁹ überwiegend flüchtige Kohlenwasserstoffen, Stickoxiden (NO_x).

⁸⁰ In zahlreichen Experimenten wurde die Sensitivität verschiedener Kulturen auf Ozon untersucht, was letztendlich zu der Festlegung von Richtwerten führte – wie dem AOT-40 in Europa („Accumulated exposure over a threshold of 40 ppb“): dabei wird die Expositionszeit oberhalb dieses Richtwertes als Maß für das Schadpotential aufsummiert (z.B. Bender und Weigel, 2002; Fuhrer *et al.*, 1997; Fiscus *et al.*, 2005).

chen Skandinavien bzw. nördlichen Europa auf (Fiscus *et al.*, 2005). Anders sieht die Situation bei Bewässerung aus: dann werden im mediterranen Raum mit die schwersten O₃-Schäden in Europa registriert (Fumigalli *et al.*, 2001).

Aus einem Richtwert darf nicht geschlossen werden, dass O₃-Konzentrationen unterhalb dieses Schwellenwertes vollkommen unbedenklich seien, da es in Abhängigkeit von der spezifischen O₃-Sensitivität der betroffenen Pflanzenart auch darunter zu unerwünschten Auswirkungen kommen kann (Holopainen, 1996).

Physiologische Wirkungen von Ozon

O₃ beeinflusst das Pflanzenwachstum auf der zellularen Ebene bis hin zu Folgeeffekten auf der Ökosystemebene (Bender und Weigel, 2002). Die verschiedenen Wirkmechanismen können hier nur stichworthaft angesprochen werden. So äußern sich O₃-Wirkungen auf enzymatische Prozesse und auf Membranfunktionen der Zelle auf der nächst höheren biologischen Organisationsstufe der Pflanzenorgane (Blatt, Nadel) in einer reduzierten Photosyntheserate, erhöhten Atmung, beschleunigten Blattalterung und in sichtbaren Blattschäden. Darüber hinaus führt eine veränderte Allokation des assimilierten Kohlenstoffs in der Pflanze u.a. zu einer geringeren Blattfläche und einem reduzierten Wurzel-Sprossverhältnis, das sich wiederum negativ auf die Mykorrhizierung und damit die Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanze auswirken kann (Fiscus *et al.*, 2005; Manning und von Tiedemann, 1995). Neben diesen *direkten* Auswirkungen kann O₃ auch *indirekt* wirken, indem

es die Sensitivität der Pflanze gegenüber anderen Stressoren erhöht. Man unterscheidet ferner *chronische* und *akute* Wirkungen, wobei erstere die Folge der Einwirkung relativ niedriger O₃-Konzentrationen über längere Expositionszeiten sind, während letztere innerhalb kürzerer Perioden durch hohe Konzentrationen zu sichtbaren Symptomen führen können (Bender und Weigel, 2002). Allerdings führen sichtbare Blattschäden, wie Blattchlorosen und -nekrosen nicht immer zu Ertragseinbußen (z.B. Bender *et al.*, 2006); Veränderungen in der Produktqualität werden unter Kapitel 4.1.7 angesprochen.

Auswirkungen auf Biomassebildung bzw. Ertrag von Kulturpflanzen

Heutige O₃-Konzentrationen können in Abhängigkeit von der spezifischen Reaktion der untersuchten Kulturpflanzen zu signifikanten Ertragseinbußen führen. Derartige Effekte wurden u.a. im Rahmen zweier groß angelegter Programme in den USA (NCLAN, National Crop Loss Assessment Network) und in Europa (EOTCP, European Open-Top Chamber Program) zur Bewertung der Auswirkungen von O₃ auf landwirtschaftliche Kulturpflanzen nachgewiesen (Bender und Weigel, 2002). In den europäischen Untersuchungen reichten die Ertragsverluste von Getreide unter freilandähnlichen Bedingungen von 5 bis 15% (CEC, 1993), wobei sich Gerste und Hafer als weniger empfindlich als Sommerweizen erwiesen (Skärby *et al.*, 1993). Bei Expositionswerten oberhalb von 60 ppb lagen die Ertragsverluste mit bis zu über 60% auch

deutlich höher. Dabei ergaben Untersuchungen, die v.a. an Weizen durchgeführt wurden, eine lineare Korrelation zwischen der Reduktion des Ertrags und der akkumulierten Exposition oberhalb eines Schwellenwertes von 40 ppb (Bender und Weigel, 2002; Holopainen, 1996). Gegenwärtig gilt ein AOT-40 Wert von 3000 ppb-Stunden während sensitiver Wachstumsphasen als kritischer Wert für Ackerkulturen (UNECE, 2004).

Leguminosen reagieren im Allgemeinen besonders sensitiv auf O₃-Belastung (Weigel und Bender, 1994), so dass z.B. für Bohnen statt des AOT-40 eventuell Richtwerte zwischen 20-30 ppb angebracht wären (Colls *et al.*, 1993). Dabei unterscheiden sich selbst verschiedene Varietäten in ihrer Reaktion auf O₃, da erhebliche genetische Unterschiede hinsichtlich der Reparaturmechanismen und Detoxifizierung von aufgenommenem O₃ sowie der stomatären Leitfähigkeit existieren (Ashmore, 2005). Einen Überblick über die relative Sensitivität verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen gegenüber O₃ gibt Tabelle 8. Von den Sonderkulturen gelten insbesondere Tabak und z.T. auch Wein (z.B. in Schultz, 2005) als mäßig empfindliche bis empfindliche Kulturen.

Tabelle 8: Reaktive Sensitivität verschiedener landwirtschaftlich bedeutender Kulturen gegenüber Ozon (nach ICP Vegetation, 2002).

Sensitiv	Mäßig sensitiv	Mäßig tolerant	Tolerant
Weizen	Kartoffel	Reis	Hafer
Sojabohne	Tabak	Mais	Gerste
Bohnen	Zuckerrübe	Wein	
Baumwolle	Ölsaaten-Raps	Weiden	
	Luzerne		

Zukünftige O₃-Konzentrationen könnten nach einem IPCC-Szenarium, das eine ähnliche Entwicklung der Emissionen von Vorläufersubstanzen wie bisher annimmt (so genanntes BAU-, Business as Usual-Szenarium) bereits 2050 bei durchschnittlich 70 ppb liegen (Ashmore, 2005). Experimentelle Untersuchungen (O₃-FACE-Experiment) mit Soja in den USA ergaben z.B. dass die Erträge bei einer Steigerung der O₃-Expositionskonzentration von 56 auf 69 ppb um 20% abnahmen (Morgan *et al.*, 2006; Long *et al.*, 2005). Chameides *et al.* (1994) schätzten, dass sich bereits bis 2025 weltweit die Getreidefläche, die signifikanter O₃-Belastung⁸¹ ausgesetzt ist, von 9-35% im Jahr 1985 auf 30-75% ausdehnen könnte. Damit dürften auch die Ertragsverluste zunehmen, was neben Einkommensverlusten in der Landwirtschaft und nachgeordneten Sektoren auch die Ernährungssicherheit insbesondere von Entwicklungsländern beeinträchtigen könnte. Als kritisch ist in diesem Zusammenhang zu sehen, dass die meisten Ertragsmodelle zur Abschätzung der Folgen des Klimawandels auf die Agrarproduktion nicht die Auswirkungen ansteigender O₃-Konzentrationen berücksichtigen (Long *et al.*, 2005). Bereits heute könnten sich die geschätzten Einbußen in Europa auf ca. 4 bis 5 Milliarden Euro und mehr belaufen⁸², was ca. 2% der ackerbaulichen Produktion entspricht (Holland *et al.*, 2002; ICP Vegetation, 2002, 2006). Da in den Berechnungen die Grünland- und Veredelungswirtschaft noch nicht erfasst sind, könnten sich die Verluste auf bis zu

⁸¹ Oberhalb des Schwellenwertes von 50-70 ppb.

⁸² Grundlage der Berechnung waren 23 der wichtigsten ackerbaulichen Kulturen in 47 Ländern Europas.

ca. 10 Milliarden Euro aufsummieren. Allein für Deutschland sollen die berechneten Verluste durch O₃ im Jahr 1990 für die ackerbauliche Produktion ca. eine Milliarde Euro betragen (ICP Vegetation, 2002).

Auf der ökosystemaren Ebene kann sich eine O₃-Belastung auch auf die Zusammensetzung von Pflanzengesellschaften, wie z.B. von Grünlandökosystemen auswirken (z.B. Ashmore, 2005; Bender und Weigel, 2002). Durch die natürliche Selektion O₃-toleranter Arten kann es nicht nur zu einem Verlust an Biodiversität kommen, auch die Qualität von Grünland kann sich durch die relative Förderung von Gräsern im Vergleich zu Kräutern, wie z.B. Leguminosen, verändern (z.B. Ashmore und Ainsworth, 1995). Für diesen Prozess könnte sich u.a. das frühe Auftreten erhöhter O₃-Konzentrationen zu Beginn der Vegetationsperiode als bedeutsam erweisen (Scebba *et al.*, 2006). Erhöhte O₃-Konzentrationen haben außerdem Auswirkungen auf die stoffliche Zusammensetzung, was nicht nur die Qualität der pflanzlichen Produktion für die menschliche und tierische Ernährung sondern auch Ökosystemkreisläufe durch verändertes Abbauverhalten beeinflusst (s.a. Kap. 4.2). Hier sind insbesondere veränderte Blatt- bzw. Korngehalte an Stickstoff, Kohlenhydraten und Phenolen zu nennen (weiteres dazu siehe Kapitel 4.1.7), die sich darüber hinaus auch auf den Krankheits- und Schädlingsbefall auswirken, dessen Folgen im Einzelnen noch nicht abgeschätzt werden können (Ashmore, 2005; Bender und Weigel, 2002; Manning und Tiedemann, 1995). Allerdings muss davon ausgegangen werden, dass durch O₃-Einwirkungen geschwächte Pflanzen anfälliger gegen-

über Pathogenen sind, so dass die indirekten Auswirkungen unter Umständen ebenso oder noch bedeutender als die direkten Auswirkungen dieses Luftschadstoffes sein können (Bender und Weigel, 2002).

Für Deutschland relevante Auswirkungen

Die Repräsentativität der für Europa existierenden kritischen O₃-Belastungsgrenzen für landwirtschaftliche Kulturpflanzen ist für die deutsche Landwirtschaft eingeschränkt, da die derzeitigen Richtwerte aus älteren Untersuchungen (vor 1990) an Sommerweizensorten (auch deutscher Herkunft) abgeleitet wurden, die nicht mehr auf dem Markt sind. Darüber hinaus ist die O₃-Empfindlichkeit vieler landwirtschaftlich bedeutender Arten (z.B. Wintergetreide, Raps, Mais) nach wie vor nicht hinreichend bekannt. Neuere Untersuchungen aus einem O₃-Feldexperiment mit unterschiedlichen einheimischen Winterweizensorten weisen z.B. darauf hin, dass empfindliche Sorten von Winterweizen (z.B. Pegassos) bereits bei geringfügig gegenüber der normalen Außenluft erhöhten O₃-Konzentrationen mit Ertragseinbußen reagieren können (J. Bender, FAL Braunschweig, pers. Mitteilung).

Für Zuckerrübe ermittelten z.B. Franzring *et al.* (2006) auf der Basis von Ertragsdaten der Jahre 1990 bis 2003 eine negative Korrelation zwischen den Erträgen und der Anzahl an Tagen mit hoher O₃-Belastung in Baden-Württemberg. Dies deckt sich in etwa mit Ergebnissen aus einem O₃-Experiment mit vier einheimischen Zuckerrübensorten (Irena, Kawetina, Olivia, Reka), die in feldähnlichen Beständen in mit O₃ angereicherter Umge-

bungsluft über die gesamte Saison hinweg kultiviert wurden (Bender *et al.*, 1999b). Zum Zeitpunkt der Rübenenernte Mitte Oktober war bei zwei (Reka, Irena) von den vier getesteten Sorten eine deutliche Abnahme im Rübenenertrag im Vergleich zu unbelasteten Kontrollvarianten festzustellen. Für den heimischen Weinbau könnte es sich als kritisch erweisen, dass Hauptanbaugebiete in Regionen im Südwesten des Bundesgebietes liegen, in denen bereits heute auf Grund der hohen Sonneneinstrahlung hohe O₃-Werte auftreten und auch für die Zukunft projiziert werden (Forkel und Knoche, 2006).

4.1.4 Auswirkungen von UV-B-Strahlung

Die schädliche Wirkung der UV-B-Strahlung auf Pflanzen, wie generell auf alle lebenden Systeme, basiert auf der Absorption der energiereichen Strahlung durch Nukleinsäuren, Strukturproteine, Enzyme, Pigmente etc. und auf strukturellen Änderungen von Molekülen, die aus diesen Wechselwirkungen resultieren (Esser, 1994). Bei höheren UV-B-Intensitäten treten häufig Chlorosen und Verbrennungen auf, die z.T. jedoch auf der Stimulierung von UV-B-absorbierenden Pigmenten, wie z.B. Flavonoiden, beruhen. Durch diese Veränderungen in der Blattstruktur wird die Photosynthese über die direkte inhibierende Wirkung der energiereichen Strahlung hinaus behindert (Kakani *et al.*, 2003). Die Abnahme des Chlorophyllgehaltes und die reduzierte Photosynthese führt bei den meisten Pflanzen zu Biomasse- und Ertragsverlusten. Bei einer enormen Bandbreite an Reaktionsmustern in

Abhängigkeit von Versuchsbedingungen, Kulturart und Varietät (Krupa und Jäger, 1996) lassen sich dennoch ein paar Tendenzen ableiten: so reagieren Gräser in der Regel weniger sensitiv als Kräuter und C₃-Pflanzen stärker als C₄-Pflanzen (Esser, 1994).

Von Krupa und Kickert (1989) wurden die wichtigsten Kulturpflanzen qualitativ in mäßig empfindlich, empfindlich und tolerant eingestuft. Danach reagieren viele landwirtschaftliche Kulturen empfindlich auf UV-B-Strahlung und von den für die Ernährung der Weltbevölkerung mit am wichtigsten Kulturpflanzen sind nur Weizen und Mais als tolerant einzustufen. Für eine quantitative Abschätzung potentieller Ertragsverluste fehlt allerdings noch weitgehend eine belastbare Datenbasis (Hertstein *et al.*, 1994).

Neben Ertragseinbußen ergeben sich aus den Änderungen in der chemischen Zusammensetzung und der Anatomie der Pflanzen auch Qualitätsänderungen, die – wie bereits für andere Faktoren beobachtet – Auswirkungen auf die Nahrungsqualität und den Schädlings- bzw. Krankheitsbefall haben. Insbesondere die Akkumulation von Phenolen, wie z.B. Flavonoiden, sollte die Widerstandskraft der Pflanze stärken; eine allgemeine Schwächung der Pflanze durch hohe UV-B-Strahlenbelastung steht dem wiederum entgegen (Manning und von Tiedemann, 1995). In Folge der Tendenz zu abnehmenden Niederschlägen während der strahlungsreichen Jahreszeit in Mitteleuropa ist über die Zunahme an UV-B-Strahlung hinaus auch mit einer Zunahme der Gesamtstrahlung zu rechnen, die nicht angepasste Organis-

men in ihrer Leistungsfähigkeit belasten könnte (z.B. Sharma *et al.*, 1988).

Für Deutschland relevante Studien

Im Rahmen der Abschätzung der Auswirkungen der Klimaveränderungen auf Bayern wurde in einem Bayerischen Klimaprogramm (BayFOR-UV) speziell die Auswirkung erhöhter UV-B-Belastung auf Pflanzen, u.a. Gerste, untersucht. Allerdings ist noch nicht definitiv geklärt, ob die Strahlung oder Pathogene die Primärursache für die auftretende Blattverbräunung sind (Doleschel, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft; persönl. Mitteilung).

4.1.5 Auswirkungen von veränderten Niederschlägen, einschließlich Starkregenereignissen

Innerhalb einer relativ weiten Temperaturspanne bestimmt letztendlich der Niederschlag bzw. der Wasserhaushalt, welche Kultur erfolgreich angebaut werden kann, wobei sich selbst geringe Änderungen im Niederschlagsverhalten deutlich auf die Produktivität von natürlichen und landwirtschaftlich genutzten Ökosystemen auswirken (Davies, 2006). Damit ist der Wasserhaushalt eines Gebietes ein entscheidender Produktionsfaktor in der Landwirtschaft (Hertstein *et al.*, 1994; Pereira, *et al.*, 2006). Sofern keine Beeinflussung durch Grundwasser vorliegt, setzt sich dieser v.a. aus der Niederschlagsmenge und -verteilung, dem Abfluss und der Verdunstung zusammen. Letztere hängt v.a. von den herrschenden Temperaturen

ab und steigt um ca. 5% pro °C Temperaturerhöhung (Parry, 1990 zitiert in Hertstein *et al.*, 1994). Da die Auswirkungen von Veränderungen im Niederschlagsverhalten im Rahmen der vorge sagten globalen Klimaänderungen regional sehr verschieden sein werden, wird hier gleich auf die Situation in Deutschland eingegangen.

Situation in Deutschland

Klimamodelle skizzieren zusätzlich zur Erwärmung eine Abnahme der Niederschläge während der Vegetationsperiode für fast ganz Deutschland (s. Kapitel 2.1). Zusätzlich solle die Häufigkeit von Hitze wellen zunehmen, so dass zu befürchten ist, dass die ausgetrockneten Böden die selteneren Niederschläge gar nicht aufnehmen können, insbesondere wenn diese häufiger als Starkregen fallen (s. auch Kap. 4.2). Damit dürfte die Wasserversorgung für landwirtschaftliche Kulturen besonders kritisch in den Regionen werden, deren Böden über eine geringe Wasserspeicherkapazität verfügen. Dazu gehören z.B. grundwasserferne Sandböden, und bzw. oder Regionen, die bereits heute unter Wasserknappheit leiden, wie v.a. im Nordosten – z.B. in Teilen Brandenburgs oder der Magdeburger Börde – aber auch Teilen Südwestdeutschlands, wie z.B. im Oberrheingraben (Abbildung 18). Verschärft wird die Situation regional durch eine reduzierte Rate der Grundwasserneubildung – u.a. durch die verlängerte Vegetationsperiode und hohe Verdunstung v.a. unangepasster Nadelwaldbestockung mit Grasunterbewuchs – und ein verändertes Wasserdargebot der Flüsse durch die Ver-

änderung der Schneeschmelze im Frühjahr. So sind die großen Flüsse Europas durch den Rückgang der Gletscher in den Alpen z.B. vom Austrocknen im Sommer

bedroht, was über das Absenken des Grundwasserspiegels unter anderem die Landwirtschaft beeinträchtigt.

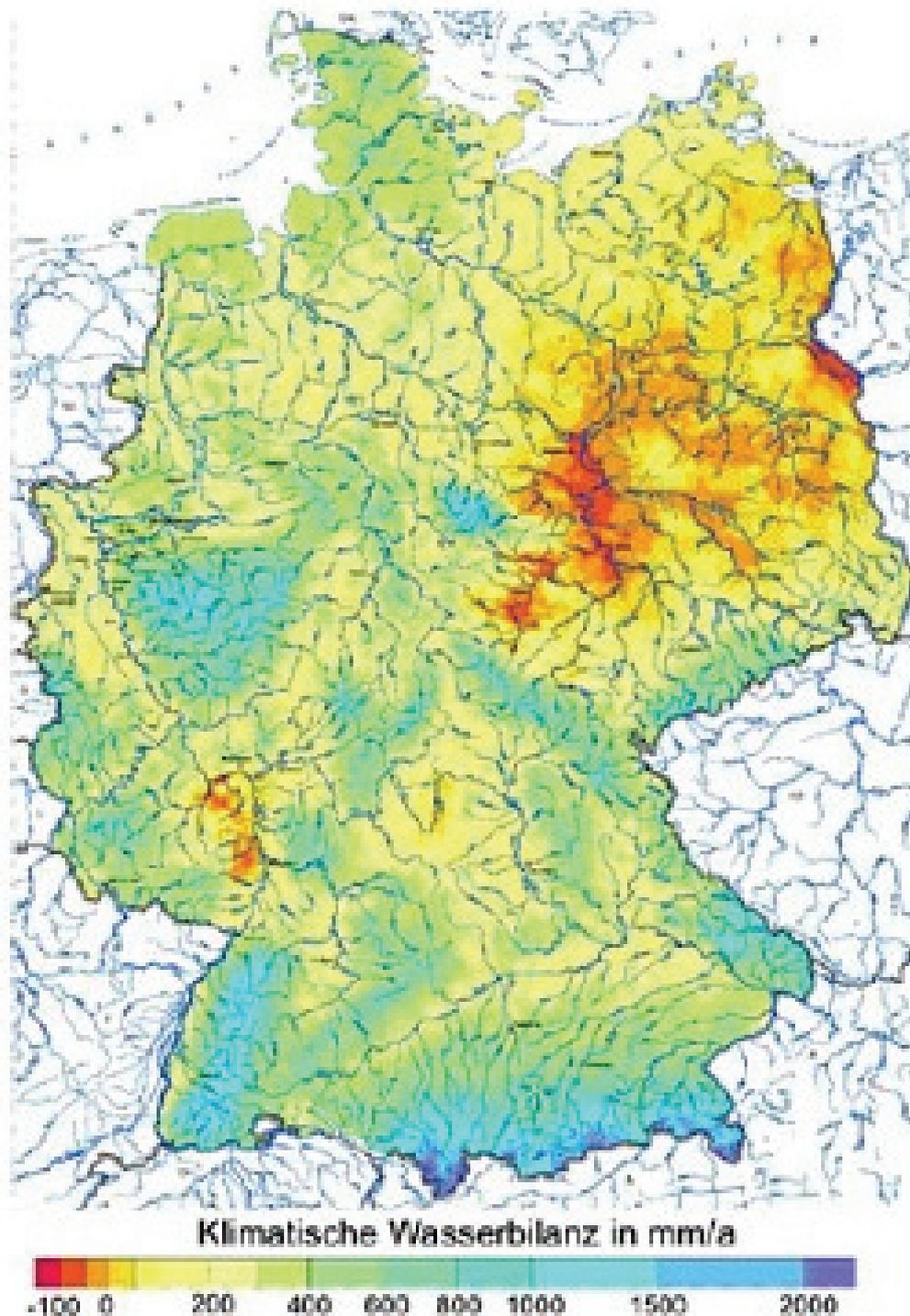


Abbildung 18: Darstellung der klimatischen Wasserbilanz Deutschlands aus der Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Verdunstung (Quelle: BMU, 2003)

Mit abnehmender Verfügbarkeit des Bodenwassers wird die Wasseraufnahme durch die Wurzel eingeschränkt, was in der Folge unmittelbar das Pflanzenwachstum beeinträchtigt bzw. reduziert (Davies, 2006). Davon ist zunächst das oberirdische Sprosswachstum stärker betroffen als die Wurzelentwicklung. Besonders sensitiv reagiert u.a. die Blattentwicklung, so dass sich auch temporär begrenzter Wasserstress durch die Reduktion des Blattflächenindex nachhaltig auf die Photosynthese- und Ertragsleistung auswirken kann. Dabei könnte sich der Wassermangel bei landwirtschaftlichen Kulturen über die Verringerung der Nettoprimärproduktion insgesamt zusätzlich durch die Verringerung des Ernteindex negativ auswirken (Pereira *et al.*, 2006). Insbesondere bei einjährigen Kulturpflanzen verkürzt eine zunehmende Sommertrockenheit die effektive Entwicklungsdauer, wobei eine beschleunigte Abreife der Pflanzen in der Regel nicht nur auf Kosten der Fruchtbildung sondern auch der Produktqualität geht (Hertstein *et al.*, 1994). Tritt eine zunehmende Trockenheit bereits zu Vegetationsbeginn auf, kann sich in Abhängigkeit vom Bodentyp auch das Keimen bzw. Aufgehen von Ackerkulturen verringern (NFU, 2005). Darüber hinaus sind Nährstoffe bei geringer Bodenfeuchte schlechter verfügbar und die Anfälligkeit gegenüber Winderosion nimmt zu. Bei zunehmender ausgeprägter sommerlicher Trockenheit muss damit künftig vermehrt mit Ertragseinbußen in der Landwirtschaft gerechnet werden, wie z.B. das Trockenjahr 2003 und z.T. auch 2006 vor Augen führte (s. Kapitel 3.3.5).

Im Gegensatz dazu kann die prognostizierte Zunahme winterlicher Niederschläge besonders auf schweren Böden oder bei hoch anstehendem Grundwasser und vermehrter Neubildungsrate die Bodenbewirtschaftung einschließlich der Weidewirtschaft erschweren. Auch muss zukünftig wahrscheinlich verstärkt mit Hochwässern – v.a. im Winter und Frühjahr – und damit Überflutung von landwirtschaftlichen Flächen und Staunässe gerechnet werden; gleichzeitig nimmt die Erosionsgefahr und die Auswaschung von Nähr- und Schadstoffen (Abildtrup und Gylling, 2001) zu. Sollte die Häufigkeit und Stärke von Stürmen tatsächlich zunehmen, ist zudem vermehrt mit Lagerschäden zu rechnen.

4.1.6 Kombinationswirkungen verschiedener Klimatelemente

Zukünftige Klimabedingungen werden gekennzeichnet sein durch

- höhere mittlere Temperaturen sowie häufiger auftretenden Hitzeperioden,
- trockenere Wachstumsbedingungen im Mittel über die Vegetationsperiode verbunden mit gleichzeitig zeitweise heftigen Niederschlagsereignissen,
- erhöhte CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre sowie
- - saisonal, regional und lokal unterschiedlich ausgeprägt - höheren O₃-Konzentrationen.

Während die Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration gleichmäßig an jedem Ort der Erde festzustellen sein wird,

sind die übrigen der genannten Klimaveränderungen zeitlich und räumlich erheblich variabler. Gleichwohl finden alle Effekte dieser Klimaänderungen jedoch unter einer Atmosphäre statt, die deutlich mehr CO₂ enthält. Jede der genannten Änderungen einer Klimavariablen hat für sich genommen mehr oder weniger deutliche Auswirkungen auf die Ökosysteme der Erde und damit auch auf die Landwirtschaft. Weitgehend offen ist, ob und inwieweit die Änderungen der verschiedenen Klimavariablen im Hinblick auf ihre Auswirkungen untereinander in Wechselwirkung treten.

Zurzeit ist eine Bewertung der Auswirkungen mehrerer, kombinierter Klimafaktoren auf die Landwirtschaft kaum möglich (SAG, 2007), da auf Grund überwiegend monofaktorieller Untersuchungen noch immer weit reichende Unsicherheiten bezüglich der Auswirkungen der gleichzeitigen Änderung von Klimaelementen bestehen (z.B. Hertstein *et al.*, 1994; Unsworth und Hogsett, 1996; Groth und Krupa, 2000;). Studien bzw. Prozessuntersuchungen auf Bestandes- bzw. Ökosystemebene, die für die Abschätzung der Folgen des Klimawandels auf höheren Aggregatensebenen unerlässlich sind, fehlen z.B. fast vollständig. Wechselwirkungen zwischen Temperaturveränderungen und dem CO₂-Anstieg sind vereinzelt untersucht worden, einige Studien haben dazu noch O₃ als Faktor bewertet. Wenig ist bekannt über Wechselwirkungen mit weiteren Luftinhaltsstoffen, wie z.B. weiterhin hohen atmosphärischen Stickstoffeinträgen in Ökosysteme und möglichen Interaktionen etwa mit der Nährstoff- und Wasserversorgung von Pflanzen.

Wechselwirkungen zwischen Temperatur, Niederschlag und CO₂-Anstieg

Während die Klimaerwärmung auf bisher temperaturlimitierten Standorten – wie z.B. höher gelegenen Grünlandstandorten – zu Ertragssteigerungen führen dürfte, wird an wärmeren Standorten bei einem weiteren Temperaturanstieg zunehmend die Wasserversorgung zum limitierenden Faktor werden. Eine entscheidende Rolle für die „Bilanz“ der sich daraus ergebenden Wechselwirkungen könnte der CO₂-Düngeeffekt spielen. Aus der Biochemie der CO₂-Fixierung lässt sich ableiten, dass die Stimulation der Photosyntheserate durch erhöhte CO₂-Konzentrationen mit steigender Temperatur zunehmen sollte (Long 1991; Morison und Lawlor 1999). Obwohl dies in bestimmten Temperaturbereichen auch experimentell belegt worden ist, wurden entsprechende Synergieeffekte auf der Ebene der Gesamtbiomassereaktion bzw. des Ertrags von Pflanzen nicht immer beobachtet. Negative Effekte erhöhter Temperaturen auf Getreideerträge wurden in einigen Studien durch den positiven CO₂-Effekt kompensiert. Hier gibt es jedoch starke artspezifische Unterschiede.

Erhöhte CO₂-Konzentrationen steigern nicht nur die Erträge, sondern verbessern auch den Wasserhaushalt und verschieben darüber hinaus noch das Photosynthese-Optimum hin zu höheren Temperaturen (siehe dazu Kapitel 4.1.2.1). Letzteres gilt allerdings nur für das vegetative Entwicklungsstadium. Im generativen Stadium wird der negative Einfluss hoher Temperaturen offensichtlich nicht durch eine CO₂-Anreicherung gemildert (Baker und Allen, 1993). Bei suboptimalen Temperaturen

fällt der wachstumsstimulierende CO₂-Effekt dagegen geringer aus (Porter und Perez-Soba, 2001), so dass Erträge wahrscheinlich am deutlichsten auf CO₂-Anreicherungen bei Temperaturen nahe dem Optimum reagieren (Polley, 2002).

Die Interaktionen zwischen erhöhten Temperaturen und erhöhten CO₂-Konzentrationen spielen eine wichtige Rolle bei der Bewertung möglicher Folgen der Klimaerwärmung für die Ernteerträge und damit für die Vorhersage der zukünftigen Versorgung mit Nahrungsmitteln. Je nachdem, ob der physiologische CO₂-Effekt in entsprechenden Pflanzenwachstums- bzw. Ertragsmodellen berücksichtigt wird oder nicht, kann sowohl die Richtung als auch das Ausmaß der vorausgesagten Temperatureffekte variieren. So fallen negative Ertragseffekte bei Getreide, die allein aufgrund erhöhter Temperaturen (und schlechterer Wasserversorgung) berechnet werden, wesentlich geringer aus bzw. kehren sich in positive Wirkungen um, wenn der CO₂-Düngeeffekt in die Bewertung mit einbezogen wird (Hulme *et al.*, 1999). Da dies wiederum davon abhängt, wie hoch die CO₂-bedingten Ertragszunahmen angesetzt werden, ist eine genauere Kenntnis des Effektes notwendig (siehe dazu auch Kapitel 4.1.2.1 und Kapitel 4.6). Relevante Studien, in denen die Wechselwirkungen zwischen erhöhten Temperaturen und CO₂-Konzentrationen bei gleichzeitig reduzierter Wasserversorgung untersucht wurden, sind nicht bekannt. Die möglichen Rückkoppelungseffekte zwischen erhöhten CO₂-Konzentrationen und dem Wasserhaushalt von Pflanzen wurden in Kapitel 4.1.2.1 angesprochen.

Wechselwirkungen zwischen der Temperatur und Ozon

Über die möglichen Auswirkungen phyto-toxischer O₃-Konzentrationen in einem zukünftigen, wärmeren Klima liegen nur Vermutungen vor. Die schnellere Entwicklung von Pflanzenbeständen bei zunehmender Erwärmung könnte dazu führen, dass damit auch die Phase der physiologisch bedingt stärksten O₃-Aufnahme im Jahr zeitlich nach vorne verschoben wird. Der O₃-Fluss in die Pflanze und damit auch die Schadwirkungen könnten geringer ausfallen, wenn die Zeit der höchsten O₃-Konzentrationen (derzeit meist ab Mitte des Sommers) mit einem späteren, d.h. "reiferen" Entwicklungsstadium der Pflanzen zusammenfällt (ICP Vegetation, 2006). Darüber hinaus könnten Schadwirkungen in Zukunft geringer sein, weil bei höheren Lufttemperaturen und geringeren Wasservorräten im Boden die Transpiration der Pflanzen eingeschränkt ist und in der Konsequenz bei stärker geschlossenen Spaltöffnungen weniger O₃ in das Pflanzeninnere gelangt (Harmens *et al.*, 2007). Schon länger bekannt ist eine mögliche Interaktion zwischen O₃ und der Winterhärte. Diese nimmt bei O₃-Belastung ab und insbesondere bei Bäumen aber auch bei Feldkulturen kann dies zu erhöhten Frostschäden führen (Unsworth und Hogsett, 1996).

Wechselwirkungen zwischen CO₂ und Ozon

Die Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂- und O₃-Konzentrationen auf das Pflanzenwachstum sind in vielerlei Hinsicht entgegengesetzt: während CO₂

die Photosyntheserate stimuliert, die Lichtatmung reduziert und allgemein das Pflanzenwachstum und die Produktivität fördert (vgl. Kapitel 4.1.2), wirken sich erhöhte O₃-Konzentrationen negativ auf Photosynthese, Blattalterung und Ertrag aus (vgl. Kapitel 4.1.3).

Aufgrund dieser Einzelwirkungen sind unterschiedliche Szenarien möglich (z.B. Fuhrer, 2003): *zum einen* könnte der globale Anstieg der CO₂-Konzentrationen in Regionen mit hoher Belastung durch O₃ nachteilige Wirkungen auf das Pflanzenwachstum abmildern (Polle und Pell, 1999). *Zum anderen* könnte dagegen die Ertragsstimulation durch erhöhte CO₂-Konzentrationen durch (regional) erhöhte O₃-Konzentrationen geringer ausfallen als angenommen, wie z.B. die Studie von Felzer *et al.* (2005) nahe legt. Welcher der beiden Effekte letztendlich eintritt, ist gegenwärtig nicht zu beantworten, da nicht genügend relevante Daten existieren (Groth und Krupa, 2000). Die Interaktionen zwischen O₃ und CO₂ sind komplex und nicht konsistent (Fangmeier und Bender, 2002; Unsworth und Hogsett, 1996): während sich bei dem Ertrag von Sojabohnen (Mulchi *et al.*, 1992) die Wirkungen der beiden Gase nahezu kompensierten, stellten Heagle *et al.* (1993) fest, dass der Schutz hoher CO₂-Konzentrationen nach längerer O₃-Exposition nachließ und McKee *et al.* (1997) fanden, dass hohe CO₂-Konzentrationen zwar die Biomasse von Weizen gegen Ozonbelastung schützten aber nicht den Ertrag.

In den bisher umfassendsten EU-weit durchgeführten Untersuchungen zu Interaktionen zwischen erhöhter O₃ –Belastung

und zukünftigen CO₂-Konzentrationen konnte für Weizen nur ein sehr geringer, für Kartoffel ein etwas deutlicher Schutz vor O₃-Belastung durch erhöhte CO₂-Konzentrationen festgestellt werden (z.B. Bender *et al.* 1999a; Craigon *et al.*, 2002). Bei Betrachtung weiterer Interaktionen in Bezug auf die Qualität der pflanzlichen Produktion und Auswirkungen auf den Befall durch Schädlinge und Krankheitserreger steigt der Komplexitätsgrad weiter (Valkama *et al.*, 2007).

Die bisherigen Ergebnisse deuten insgesamt darauf hin, dass der CO₂-Düngeeffekt unter Belastungen durch Luftschadstoffe wie O₃ geschmälert werden könnte.

Für Deutschland relevante Studien

Ausser den o.g. älteren, experimentellen Untersuchungen an Sommerweizen und Kartoffel im Rahmen von EU-Projekten, bei denen eher wenig relevante Sorten unter größtenteils artifiziellen Wachstumsbedingungen untersucht wurden, existieren keine einheimischen Untersuchungen unter realen Feldexperimenten, in denen die Auswirkungen kombinierter Klimavariablen untersucht wurden. Dies gilt über die Bundesrepublik hinaus für den gesamten mitteleuropäischen Raum (SAG, 2007). Es kann daher z.Z. kaum eingeschätzt werden, welche „Netto-Effekte“ aus den vorhergesagten Änderungen der wichtigsten Klimavariablen Temperatur, Niederschlag und CO₂-Gehalt der Atmosphäre für die einheimische Pflanzenproduktion und für die Agrarökosysteme zu erwarten sind.

4.1.7 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Qualität pflanzlicher Produkte

Die stoffliche Zusammensetzung von Pflanzen ist nicht nur von überragender Bedeutung im Hinblick auf die Qualität pflanzlicher Nahrungsmittel und Rohstoffe und deren Rolle in der globalen Ernährungssicherheit und Energieversorgung (Gregory *et al.*, 2005; FAO, 2005), sondern spielt auch eine entscheidende Rolle im Rahmen der biogeochemischen Kreisläufe und der ökosystemaren Umsetzungsprozesse (s. nachfolgende Kapitel). Vor diesem Hintergrund sind mögliche Veränderungen der stofflichen Zusammensetzung von Pflanzen auf Grund des Klimawandels im Vergleich zu Veränderungen der Quantität bisher relativ wenig untersucht (Niklaus, 2007; Slingo *et al.*, 2005). Die damit verbundenen offenen Fragen geraten aber zunehmend in den Fokus des allgemeinen Interesses. Nachfolgend werden dazu ausgewählte Beispiele vorgestellt.

Auswirkungen von Hitzestress

Bei *Weizen* können hohe Temperaturen während der Kornfüllung funktionelle Eigenschaften der Kornzusammensetzung beeinträchtigen, die für das Brotbacken wichtig sind. So führt andauernder Hitzestress u.a. durch die gestörte Stärkesynthese zu einer relativen Zunahme der Stickstoff-Gehalte im Weizenkorn (Tester *et al.*, 1995) und kann generell durch die Bildung von Hitzeschockproteinen die Eiweißzusammensetzung verändern (Arbol und Ingram, 1996). Für *Zuckerrüben*

konnte unter Hitzestress ein erhöhter Amino-Stickstoff-Gehalt festgestellt werden (Demmers-Derk *et al.*, 1998), der sich einerseits positiv auf den Rübenantrag auswirkt, andererseits aber die Zuckerkristallisation behindert, wodurch mehr nicht kristallisierbarer Melassezucker entsteht. Bei *Raps* verursachen hohe Temperaturen einen Rückgang des Ölgehaltes, was sich für die Verwendung als Biodiesel negativ auswirkt; dagegen steigt der Eiweißgehalt mit zunehmenden Temperaturen, was u.U. bei der Tierfütterung vorteilhaft ist (Lütke-Entrup, 1986a, Aksouh *et al.*, 2001).

Vor allem im *Gartenbau*, einschließlich Obstbau, Zierpflanzenbau und Gemüseproduktion (Peet und Wolfe, 2000), in dem es nicht in erster Linie um Biomasseproduktion, sondern um ein makelloses und ästhetisches äußeres Erscheinungsbild der produzierten Ware geht, können Qualitätseinbußen zu großen Umsatzverlusten führen. Bei Äpfeln z.B. vermindern geringe Unterschiede zwischen Tag- und Nachttemperaturen die Farbausbildung. Bei Tomaten verursachen hohe Temperaturen einen „Grünkragen“ und bei Blumenkohl, Radies, Kopf- und Feldsalat sowie Spinat vorzeitiges Schossen. Salat, Spinat, Brokkoli und Blumenkohl reagieren unter diesen Bedingungen mit Blütenbildung. Weitere Qualitätsminderungen entstehen bei Pelzigkeit und Verholzen der Frucht, bzw. des Gemüses (Krug, 2002). In Folge der erhöhten Atmung und schnelleren Entwicklung wurde auch eine geringere Süße von Obst, wie z.B. Erdbeeren oder Melonen festgestellt (Wien, 1997 zitiert in Peet und Wolfe, 2000). Für die Veredelungswirtschaft kann sich u.a. die bei Erwärmung erhöhte Lignifizierung

vieler Pflanzen negativ auf die Futterqualität auswirken (Niklaus, 2007).

Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen

Eine in fast allen Studien zum „CO₂-Düngeeffekt“ beobachtete Reaktion ist die Veränderung der chemischen Zusammensetzung des pflanzlichen Gewebes (Idso und Idso, 2001; Loladze, 2002). Betroffen sind sowohl der Gehalt an Makro- und Mikroelementen als auch die Konzentrationen sonstiger Inhaltsstoffe (z.B. Zucker, Vitamine, sekundäre Pflanzenstoffe). Herausragendes Beispiel dafür ist die Reduktion des Stickstoffgehaltes (s.u.) sowohl in vegetativen Organen (Blatt, Stängel) als auch in Früchten, Samen bzw. Körnern (Conroy *et al.*, 1994; Schenk *et al.*, 1997a, b; Cotrufo *et al.*, 1998; Pleijel *et al.*, 1999). Vermutete Ursachen für diese Veränderungen sind u.a. die verminderten Transpirationsraten verbunden mit reduzierter Nährstoffaufnahme, eine generell stärkere Pflanzenentwicklung und erhöhte Gehalte an löslichen und nicht-strukturbildenden Kohlehydraten, wie z.B. Stärke, die zu einer relativ niedrigeren Konzentration an sonstigen Nährstoffen führen.

Die o.g. Kohlehydrate sind nicht einfach nur Speicherprodukte, sondern besitzen darüber hinaus für viele Prozesse Signalfunktion, wie z.B. die C-Allokation innerhalb der Pflanze und Feed-back-Inhibition der Photosynthese (Rogers und Ainsworth, 2006). Die gleichen Autoren zitieren Arbeiten, die gezeigt haben, dass der Gehalt an bestimmten Flavonoiden, die die Pflanze z.B. vor Fraß schützen, bei erhöhten

Kohlenhydratkonzentrationen in den Blättern zunimmt. Generell scheint der Gehalt an sekundären Pflanzenstoffen, wie z.B. Phenolen, bei abnehmender C- und N-Limitierung zuzunehmen (Niklaus, 2007).

Bei *Kartoffeln* nimmt unter experimentell erhöhten CO₂-Konzentrationen die Konzentration von Stickstoff, Kalium und Magnesium in den Knollen ab (Fangmeier *et al.*, 2002), was sowohl Auswirkungen auf die Verarbeitung als auch die Kartoffelqualität (Nitrat) haben könnte. Insbesondere die Verschlechterung der physikalischen Qualität ist dabei für die verarbeitende Industrie ungünstig (Bindi *et al.*, 2006). Andererseits fördern die erhöhten Stärke- und Trockenmassekonzentrationen wiederum die Verarbeitung. Als besonders kritisch für die globale Ernährungssicherheit könnten sich niedrigere Proteingehalte bei *Weizen* und anderen Getreidesorten – einschließlich Reis (Terao *et al.*, 2005) infolge der zunehmenden CO₂-Konzentration in der Atmosphäre erweisen. Auch in der Tierernährung wirken sich möglicherweise reduzierte Proteingehalte im *Rauhfutter* (Isopp *et al.*, 2000) sowie weitere Qualitätsänderungen u.U. negativ aus (Schenk *et al.*, 1997a, b; näheres dazu s. Kapitel 4.4). Beim *Wein* als Vertreter von landwirtschaftlichen Produkten mit hohem Wertschöpfungspotential scheint sich eine CO₂-Erhöhung dagegen nicht auf die Qualität auszuwirken (Bindi *et al.*, 2001). *Gemüse* reagiert auf hohe CO₂-Konzentrationen häufig mit kürzeren Internodien, kleineren, aber dickeren Blättern, stärkerer Seitentriebbildung und bzw. oder verstärktem Wachstum von Knollen, Rüben und Wurzeln

(Krug, 2002), was sich negativ auf den Absatz auswirken kann.

Auswirkungen erhöhter O₃-Konzentrationen und erhöhter UV-B Strahlung

Die Auswirkungen erhöhter O₃-Konzentrationen auf die Qualität pflanzlicher Produkte sind vergleichsweise wenig untersucht. Unter O₃-Belastung verändern sich u.a. die Blatt- bzw. Korngehalte an Stickstoff, Kohlenhydraten und Phenolen. Dabei steigen – bei in der Regel abnehmendem Kornertrag – die Proteingehalte im Korn i.a. leicht an. Dagegen beeinflusst O₃ die Qualität von Kartoffeln eher negativ (Fuhrer, 2003). Bei Gemüse und anderen Pflanzen, deren Marktwert von der visuellen Erscheinung abhängt, ziehen auch z.B. durch Blattnekrosen oder -chlorosen verursachte optische Schäden in der Regel einen unmittelbaren wirtschaftlichen Verlust nach sich (Ashmore, 2005).

Ebenso bewirkt die energiereiche UV-Strahlung eine Veränderung in der chemischen Zusammensetzung pflanzlicher Gewebe, wie z.B. durch die Akkumulation von Phenolen sowie Veränderungen der Anatomie der Pflanzen. Bei der *Wein* ist noch nicht genau abzusehen, ob sich UV-B-bedingte Veränderungen bei der Ausbildung von Farb- und Aromastoffen positiv oder negativ auswirken werden (Schultz, 2005).

Für Deutschland relevante Studien bzw. Auswirkungen

In Deutschland konnten zum ersten Mal im Hitzesommer 2006 u.a. aus dem mediterranen Raum bekannte Veränderungen

der Qualitätseigenschaften bei *Weizen* beobachtet werden. Dies betraf v.a. einen erhöhten Protein- und Klebergehalt bei insgesamt weicheren Klebern und geringeren Wasseraufnahmen aber guten Backeigenschaften des Teiges (Münzing und Lindhauer, 2006). Darüber hinaus reduzierte eine ungünstige Verteilung der Mineralstoffgehalte im Korn die Mehlausbeute. Deutliche Unterschiede wurden dabei zwischen Weizensorten verschiedener Qualitätsstufen (E-, A- und B-Weizen) sowie zwischen verschiedenen Sorten innerhalb der gleichen Qualitätsstufe deutlich, was die Bedeutung der Wahl der Weizensorte herausstellt. Interessanter Weise wurden bei Ökoweizen keine Indizien für trocken- und hitzestressbedingte Veränderungen der Qualitätsausprägung gefunden, was auf die Tendenz zu humushaltigen Böden mit hoher Nährstoff- und Wasserspeicherkapazität im Ökolandbau zurückgehen dürfte; auch die in der Regel bessere Bodenbedeckung und Durchwurzelung könnten eine Rolle spielen (s. Kapitel 3.5). Bei *Pflanzkartoffeln* wurde 2006 in Bayern in der Qualitätsvorernteschätzung ein höherer Anteil an geringeren Sortierfraktionen festgestellt (LKP, 2007).

CO₂-Anreicherungsuntersuchungen (550-650 ppm) an der FAL in Braunschweig an Weidelgras, Weizen und Gerste, die über mehrere Jahre unter unterschiedlichen Wachstumsbedingungen (z.B. unterschiedliche Stickstoffversorgung; Einzelkultur von Klee und Gras sowie Saatmischungen) sowie unterschiedlichen CO₂-Expositionsbedingungen (Laborbedingungen: Klimakammer; Feldbedingungen: Open-top Kammer, FACE) an einheimischen Sorten durchgeführt wurden, erga-

ben im Mittel über alle Versuchsbedingungen eine Reduktion des Stickstoffgehaltes im Blatt (außer Klee) oder in den Getreidekörnern in der Größenordnung zwischen 10% - 15% im Vergleich zur heutigen CO₂-Konzentration sowie speziell bei Weizen (Sorte *Batis*) Veränderungen in den Proteinfractionen (Weigel und Manderscheid, 2005; Weigel *et al.*, 2007; Wieser *et al.* 2007). Ein konsistenter Einfluß des Stickstoff-Düngerniveaus konnte aus den o.g. Untersuchungen nicht abgeleitet werden, d.h. es konnte nicht eindeutig belegt werden, dass eine zusätzliche Stickstoffversorgung der Pflanzen den Proteingehalt auf das Kontrollniveau (heutige CO₂-Konzentration) anhebt. Untersuchungen an älteren Weizen-Sorten ergaben u.a., dass diese neben einer ausgeprägteren Senkenstärke in der Regel auch über generell höhere Proteingehalte verfügen (Weigel und Manderscheid, 2005).

Darüber hinaus wurden in den Getreideuntersuchungen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen auch häufig reduzierte Gehalte an weiteren Makro- und Mikronährstoffen gemessen (Manderscheid *et al.*, 1995), wie z.B. für Weizen in Tabelle 9 dargestellt. Die Qualitätsuntersuchungen von Fangmeier *et al.*, (2002) an einer einheimischen Kartoffelsorte wurden schon erwähnt.

Die sichtbaren Qualitätseinbußen akuter und chronischer O₃-Belastung wichtiger Feldgemüsearten wurden für Deutschland von Kostka-Rick *et al.* (2002) untersucht. Dabei führten chronische O₃-Belastung bei acht und akute O₃-Belastung bei zehn der zwölf untersuchten Gemüsearten zu sichtbaren Blattschäden und damit zu einem Marktwertverlust.

Tabelle 9: Makro- und Mikronährstoffgehalte im Korn zweier Sommerweizensorten (W1 = Turbo; W2= Star) nach Anzucht unter normalen und erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen über die gesamte Vegetationsperiode in Open-Top-Kammern (OTC) sowie das Nährstoffverhältnis unter Angabe des Signifikanzniveaus (Quelle: Manderscheid *et al.*, 1995).

Nährstoff	Mittelwerte				Verhältnis	
	375 ppm CO ₂		710 ppm CO ₂		710 / 375 ppm CO ₂	
	W1	W2	W1	W2	W1	W2
Kalium [mg g ⁻¹]	4,49	4,17	4,61	4,43	1,03 (n.s.)	1,06 ^{***}
Calcium [µg g ⁻¹]	369	326	265	288	0,72 ^{***}	0,88 ^{***}
Magnesium [mg g ⁻¹]	1,05	1,21	0,96	1,05	0,91 ^{***}	0,87 ^{***}
Phosphor [mg g ⁻¹]	3,61	3,95	3,44	3,60	0,95 (n.s.)	0,91 ^{***}
Schwefel [mg g ⁻¹]	1,82	1,82	1,43	1,44	0,79 ^{***}	0,79 ^{***}
Eisen [µg g ⁻¹]	52,2	49,7	39,0	37,0	0,75 ^{***}	0,74 ^{***}
Mangan [µg g ⁻¹]	42,2	50,1	39,7	46,2	0,94 (n.s.)	0,92 (n.s.)
Zink [µg g ⁻¹]	44,0	45,4	33,2	35,3	0,75 ^{***}	0,78 ^{***}

4.2 Auswirkungen von Klima- veränderungen auf den Bo- den bzw. im Boden ablaufen- de Prozesse

Im Boden ist mit ca. 1200-1500 Gigatonnen (GT) Kohlenstoff (C) mehr als die doppelte Menge an C gespeichert als in der Vegetation (ca. 500-600 Gt C) und der Atmosphäre (ca. 700 Gt C; Ågren und Hansson, 2000; Cox *et al.*, 2000). Damit sind Veränderungen dieses C-Pools nicht nur für das Pflanzenwachstum von immenser Bedeutung sondern auch für Rückkopplungsprozesse beim Klimawandel. Dabei besteht die organische Substanz im Boden sowohl aus toter organischer Substanz als auch der Bodenfauna und -flora, die beide in Bezug auf Menge, Zusammensetzung und Aktivität bzw. Umsetzungsprozesse von Klimaveränderungen betroffen sind. Mögliche Einflüsse des Klimawandels auf im Boden ablaufende Prozesse sind in einer umfangreichen Fachliteratur beschrieben. Tabelle 10 fasst wesentliche Punkte dazu zusammen. Im Folgenden werden dazu nur einige wesentliche Punkte angesprochen. Erwähnt werden muss darüber hinaus, dass Bodeneigenschaften und Bodenkohlenstoffvorräte selbstverständlich auch massiv durch die Bodenbewirtschaftung selbst beeinflusst werden, insbesondere, wenn diese den Bodenwassergehalt verändert, wie z.B. bei konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren (Mosier, 1998; Ågren und Hansson, 2000; s. dazu auch Kapitel 3.5.2).

Auswirkungen von Temperaturerhöhung einschließlich Hitzeperioden

Ebenso wie pflanzenphysiologische Prozesse werden auch Umsetzungsprozesse im Boden im Allgemeinen durch steigende Temperaturen stimuliert; für physiologisch gesteuerte Reaktionen gilt dies einschränkend innerhalb des spezifischen Toleranzbereiches der jeweiligen Bodenfauna und -flora (Blankinship und Hungate, 2007) bzw. der Wurzeln. Allerdings zieht eine Erwärmung der Lufttemperatur nicht immer auch eine Erhöhung der Bodentemperatur nach sich, da sowohl eine dichtere Pflanzendecke als auch Streuauflage den Boden vor Erwärmung schützen kann (Niklaus, 2007).

In Agrarökosystemen betrifft eine Erhöhung der Bodentemperatur im Zusammenspiel mit der Bodenfeuchte v.a. die Bodenatmung bzw. generell mikrobielle Umsetzungsprozesse (Niklaus, 2007). Darüber hinaus beeinflusst sie auch die Nachlieferung von Mineralstoffen aus Verwitterungsprozessen bzw. die Oberflächeneigenschaften der Tonmineralfraktion (Rounsevell *et al.*, 1999). Eine ausreichende Bodenfeuchte vorausgesetzt, ist bei einer Temperaturzunahme voraussichtlich mit einer beschleunigten Mobilisierung⁸³ von bodenbürtigem C durch mikrobielle Prozesse zu rechnen; bei einer Limitierung durch Trockenheit kann aber auch der umgekehrte Effekt eintreten (Schulze und Freibauer, 2005). Als eine Folge der bisherigen Klimaerwärmung wird z.B. in England und Wales der zwischen 1978 und 2003 beobachtete durchschnittliche Verlust an Bodenkohlenstoff von ca. 0,6%

⁸³ Andererseits wird in der Literatur auch von vermehrter Lignifizierung, d.h. Verholzung und damit erschwertem Abbau von Pflanzenmaterial, auf Grund von Erwärmung berichtet (z.B. Niklaus, 2007).

pro Jahr interpretiert, bei deutlich höheren Raten für kohlenstoffreiche Böden (Belamy *et al.*, 2005). Für Europa insgesamt wurde im Rahmen des Projektes ATEAM (s. Kapitel 6.2) ein Rückgang des Bodenkohlenstoffes bis 2100 von 20-30% berechnet (Schröter *et al.*, 2004). Andere Berechnungen zeigen, dass die C-Vorräte im Boden weltweit bis 2100 – in Abhängigkeit vom jeweils verwandten Modell – sogar um 54 bzw. 80 Gt C abnehmen könnten (Jones *et al.*, 2005). Dagegen legt die Verlängerung der Vegetationsperiode wiederum eine höhere C-Sequestrierung in Böden nahe (Baldocchi, 2005).

Die erhöhte mikrobielle Aktivität führt durch die Mineralisierung von organischer Substanz allerdings nicht nur zu einer erhöhten Nachlieferung von Nährstoffen – und unter Umständen auch Schadstoffen (Lynch und St. Clair, 2004) – für die Pflanze; auch Nährstoffverluste durch Ausgasen und Auswaschung können zunehmen. Dies gilt insbesondere für Stickstoff, dessen Nährstoffkreislauf auf Grund seiner überragenden Bedeutung für die Pflanzenernährung mit am besten untersucht ist. Feuchte, mildere Winter mit weniger Schneebedeckung, dagegen aber häufigem Wechsel von Frieren und Tauen, werden voraussichtlich zu einer erhöhten Stickstoff-Mineralisation in einer Zeit geringen pflanzlichen Bedarfs führen und damit zu einer erhöhten Nitratbelastung von Ökosystemen und Grundwasser (z.B. in Olesen, 2007). Die Abnahme von Bodenfrost könnte außerdem die Erosions- und damit auch Kontaminationsgefahr erhöhen (Wurbs, 2005 und Brahmer, HLUG, zitiert in Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2007). Zunehmende Wärme

und insbesondere sommerliche Dürreperioden lassen die Böden dagegen häufiger austrocknen, was sich nicht nur negativ auf die Aktivität der Bodenfauna und -flora sondern auch auf die Bodenstruktur auswirkt. Kommt es dann im Anschluss zu einem Starkregenereignis, ist sowohl mit erhöhten Erosionsschäden zu rechnen (Williams *et al.*, 2001) als auch erhöhtem Kontaminationsrisiko für Grund- und Oberflächenwasser (Rounsevell *et al.*, 1999).

Darüber hinaus beeinträchtigt der geringere Wassergehalt von Böden in einer wärmeren Umgebung nicht nur das Pflanzenwachstum negativ. Trockene Böden stellen auch einen positiven Rückkopplungseffekt der Klimaerwärmung dar, da sich nicht nur der Boden sondern auch die Umgebungsluft bei fehlender Verdunstungskühle stärker erhitzt. Möglicherweise lassen sich auch kleinräumig schwankende landwirtschaftliche Erträge durch Temperaturunterschiede erklären, die auf variierendem Untergrund basieren (Bojanowski, 2006). Andererseits verbessert eine Erhöhung der Bodentemperatur die Nährstoffaufnahme durch die Pflanze (BassiriRad, 2000), was insbesondere auf bisher wärme-limitierten Standorten bzw. während kühler Witterungsperioden als positiv zu bewerten ist.

Tabelle 10: Einfluss von Klimaänderungen auf Bodeneigenschaften und Bodenprozesse (+ : positiv bewertete Folgen; - : negativ bewertete Folgen) (Rogasik et al., 1996)

Eigenschaft / Prozess	Beeinflussender Klimafaktor			Trockenheit	extreme Niederschlagsereignisse
	erhöhte CO ₂ Konzentration	erhöhte Temperatur			
biologische Aktivität	+ erhöhte Aktivität des Bodenlebens bei vermehrtem Anfall von Ernte- und Wurzelrückständen (höherer C-Input)	+ Stimulation des Bodenlebens sowie Beschleunigung der Stoffumsätze - übersteigt die Respiration die Photosyntheseleistung kommt es zu Verlust an C _{org}	- Minderung der Bodenflora und -fauna - Hemmung der Stoffumsetzungsprozesse	- Minderung der biologischen Aktivität (häufigkeitsabhängig)	
organische Bodensubstanz	+ höherer Gehalt an organischem Kohlenstoff bei höherem C-Input möglich - Veränderung der Humusqualität	- geringere Produktion von Ernte- und Wurzelrückständen durch Ertragsrückgang führt zu abnehmenden Humusgehalten	(+) Akkumulation von Kohlenstoff möglich	- erhöhte Erodierbarkeit - Verschlechterung der Humusqualität	
Bodenstruktur	+ höhere Anzahl stabiler Bioporen (Regenwurmröhren, Wurzelgänge) + verbesserte Bearbeitbarkeit	+ Reduzierung des Verdichtungsrisikos durch Bewirtschaftung unter trockeneren Bodenbedingungen - Gefahr einer höheren Verdichtung durch Verlust an organischer Boensubstanz	- Schrumpfung, Risse, geringere Makroporosität	- Neigung zu Verschlammung und Verdichtung - reduzierte Bearbeitbarkeit	
Bodenwasser und Gebietswasserbilanz	+ höhere Wassernutzungseffizienz, geringerer Wasserverbrauch der Pflanzen könnte Gebietswasserbilanz verbessern - größere Biomasseproduktion könnte positive Effekte kompensieren	- unproduktive Evaporation - verminderte Speicherung von pflanzenverfügbarem Bodenwasser infolge erwärmungsbedingten Humusabbaus - Verringerung der nutzbaren Grundwasservorräte	- reduzierter Bodenwassergehalt	- zeitweiser Überschuss an Bodenwasser (Auswaschungsgefährdung)	

Eigenschaft / Prozess	Beeinflussender Klimafaktor				extreme Niederschlagsereignisse
	erhöhte CO ₂ Konzentration	erhöhte Temperatur	Trockenheit		
Nährstoffstatus des Bodens	+ stärkere Nährstoffmobilisierung - Reduktion der Nährstoffvorräte infolge erhöhter Biomasseproduktion	+ kurzfristig verbesserte Nährstoffverfügbarkeit - Abnahme der Pufferkapazität und des Redoxpotentials infolge erwärmungsbedingt vermehrten Humusabbaus - verminderte Humusgehalte verschlechtern die Nährstoffdynamik	- Reduzierung der Nährstoffverfügbarkeit - Verminderung der Düngeeffizienz		- Verlagerung von Nährstoffen
pH / Versauerung	+ höhere Sorptionskapazität bei vermehrter Humuszufuhr	- Freisetzung von Schwermetallen durch verminderte Humusgehalte und Abnahme der Kationenaustauschkapazität			- Verlagerung von Ca
Erosion / Infiltration	+ Reduzierung von Oberflächenabfluss und Erodibilität infolge höherer Biomasseproduktion und besserer Bodenbedeckung	- Zunahme des Oberflächenabflusses, geringere Infiltration sowie verstärkte Erodierbarkeit des Bodens durch Wasser und Wind aufgrund von Humusverlust und abnehmender Pflanzendecke	- erhöhte Erodierbarkeit durch Wind		- Erosionsschäden und erhöhter Oberflächenabfluss - Minderung der Niederschlagsinfiltration
Nährstoff – Auswaschung	+ geringerer Nährstoffverlust bei höheren Entzügen bzw. verbesserter Sorptionskapazität	- wärmere Winter beschleunigen die N-Mineralisierung und führen zu N-Verlusten	+ minimale Nährstoffverluste		- Verarmung an Pflanzennährstoffen durch Oberflächenabtrag und Nährstoffaustag
Versalzung	+ vermindertes Risiko durch Verbesserung der Salztoleranz sensibler Pflanzen	- erhöhtes Risiko infolge stärkerer aufwärtsgerichteter Wasserbewegung (höhere negative klimatische Wasserbilanz) bzw. Fehler im Bewässerungsregime			- erhöhtes Risiko durch Anhebung der Grundwasseroberfläche
Produktionspotential der Böden	+ Zunahme des Ertragspotentials auch auf weniger fruchtbaren Böden möglich	- Bei zunehmender Sommertrockenheit bzw. dem vermehrten Auftreten von Extremereignissen ist mit einem verminderten Ertragspotential auch auf fruchtbaren Böden zu rechnen.			

Auswirkungen einer CO₂-Erhöhung

Da die Bodenluft auf Grund der Atmungsaktivität von Wurzeln, Mikroorganismen und Bodenfauna eine viel höhere CO₂-Konzentration als die Atmosphäre aufweist, hat der Anstieg letzterer keine direkte Auswirkung auf den Boden bzw. auf die im Boden ablaufenden Prozesse (Tarnawski und Aragno, 2006). Weitaus wichtiger ist die mögliche indirekte Wirkung über die veränderte Qualität und Quantität des zugeführten Pflanzen- einschließlich des Wurzelmaterials. Am stärksten ist dieser Einfluss in der unmittelbaren Umgebung der Wurzeln, der so genannten Rhizosphäre: hier wird nicht nur durch das unter erhöhten CO₂-Konzentrationen begünstigte Wurzelwachstum vermehrt organische Substanz eingetragen, auch die Ausscheidung von Wurzelexudaten⁸⁴ scheint unter diesen Bedingungen erhöht (Hill, 2006; Phillips *et al.*, 2006). Neben positiven Auswirkungen auf die Bodenstruktur stimuliert die erhöhte Verfügbarkeit von niedermolekularen C-Verbindungen u.a. auch Mykorrhiza-Pilze (Brunnert, 1994), die mit den Wurzeln bestimmter Pflanzenarten in einer Symbiose leben, bei der der Pilz vor allem die Nährstoff- und Wasserversorgung der Pflanze verbessert. Dass die unter hohen CO₂-Bedingungen bessere Versorgung der Mykorrhiza-Pilze zwangsläufig zu einer besseren Nährstoffversorgung der symbiontischen Pflanzen führt, wird dabei von Alberton *et al.* (2005) in ihrem „mykozentrierten Ansatz“ kritisch hinterfragt.

⁸⁴ Ein beträchtlicher Anteil des assimilierten Kohlenstoffes wird über die Wurzeln abgegeben; dabei handelt es sich überwiegend um niedermolekulare Kohlenstoffverbindungen, die u.a. die Aufnahme von Nährstoffen im Wurzelraum verbessern.

Agronomisch besonders wichtig ist die Symbiose zwischen Stickstoff fixierenden Bodenbakterien und Leguminosen, die auf diese Weise von Stickstoff-Düngung unabhängig sind und darüber hinaus die Stickstoff-Versorgung auch für assoziierte bzw. nachfolgende Kulturen verbessern. Im Zuge einer atmosphärischen CO₂-Erhöhung werden – eine ausreichende P-Versorgung vorausgesetzt (Edwards *et al.*, 2005) – Stickstoff fixierende Pflanzenarten häufig gefördert (Lüscher *et al.*, 2006; Hartwig und Sadowsky, 2006). Diese gewinnen damit in Pflanzengemeinschaften, wie z.B. in Weiden und Wiesen, einen Konkurrenzvorteil bzw. können sich besser durchsetzen, was u.a. auch Auswirkungen auf die Futterqualität (Proteingehalt) im Futterbau bzw. in der Weidehaltung hat. Dabei scheint die Reaktion der Stickstoff-Fixierer allerdings von der spezifischen Leguminosensorte und weiteren Umweltbedingungen, wie insbesondere der Stickstoffversorgung, abzuhängen (West *et al.*, 2005)

Hinsichtlich der für die Klimaerwärmung bedeutsamen Frage, ob der erhöhte Eintrag an organischer Substanz aufgrund der gesteigerten Biomassproduktion durch erhöhte CO₂-Konzentrationen letztendlich auch zu einer zunehmenden C-Sequestrierung im Boden durch höhere Humusgehalte führen wird, besteht auf Grund der Komplexität der involvierten Prozesse und Faktoren, sowie unterschiedlich lange Umsetzungsraten verschieden großer C-Pools im Boden noch keine endgültige Klarheit (z.B. Schulze und Freibauer, 2005; Blum, 2005; Rounsevell *et al.*, 1999; Zak *et al.*, 2000; Ågren und Hansson, 2000). Hinzu kommt, dass CO₂-

und Temperatureffekte hier zum Teil entgegengesetzt wirken: während Groeninger *et al.* (2006) in einer Datenanalyse einen durchschnittlichen Anstieg des Boden-C-Gehaltes um 4,1% bei erhöhter CO₂-Konzentration ermitteln, gehen Modelle zur Auswirkung ansteigender Temperaturen langfristig von einer deutlichen Abnahme der Boden-C-Gehalte aus (Jones *et al.*, 2005). Marhan *et al.* (2007) konnten in ihrer Inkubationsstudie mit Weizenstroh unter erhöhten CO₂-Bedingungen geringere Abbauraten feststellen, weisen aber auf die Bedeutung der Temperatur und des Niederschlages für eine Bilanzierung des Boden-C hin. Entscheidend für die Simulation ist das Verhalten des mengenmäßig bedeutsamsten C-Pools mit langen Umsetzungszeiten, der sich als besonders temperatursensitiv herausgestellt hat (Knorr *et al.*, 2005). Dieser wird in Experimenten üblicher Versuchsdauer in der Regel jedoch nicht erfasst (Powlson, 2005).

Von wenigen Ausnahmen abgesehen ist unter erhöhten CO₂-Bedingungen die Bodenatmung deutlich erhöht, was zum einen auf das gesteigerte Pflanzenwachstum und zum anderen auf die erhöhte Aktivität und Biomasse der Bodenmikroorganismen zurückgeht (Zak *et al.*, 2000). Bei der Umsetzung der organischen Substanz nimmt die Stickstoff-Verfügbarkeit im Boden eine Schlüsselrolle ein (Groenigen *et al.*, 2006): bei ausreichender Stickstoff-Versorgung werden höhere Einträge organischer Substanz durch gesteigertes Pflanzenwachstum auch vermehrt abgebaut. Dabei kann es bis zur Einstellung eines neuen Gleichgewichtes zwischen Input von organischer Substanz und Umsetzungsprozessen sogar zum Abbau von

Boden-C kommen. Bei limitierter Mineralstoff-, d.h. in erster Linie Stickstoff- aber auch P-Verfügbarkeit, kommt es dagegen zu einer Immobilisierung von Nährstoffen in der mikrobiellen Biomasse und insgesamt zu einer Akkumulation von C im Boden (Lüscher *et al.*, 2006; Niklaus, 2007).

Da bei erhöhten CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre neben anderen Veränderungen in der Zusammensetzung des Pflanzenmaterials insbesondere die Stickstoff-Gehalte sinken, wird zum Teil mit einer zunehmenden Stickstoff-Limitierung der Pflanzenproduktion gerechnet – sofern nicht durch den vermehrten Anbau von Leguminosen bzw. Düngergaben gegengesteuert wird⁸⁵. Dabei wird allerdings der für den Klimaschutz positive Effekt der C-Sequestrierung in landwirtschaftlichen Böden u.U. durch gleichzeitig ansteigende N₂O-Emissionen konterkariert (Li *et al.*, 2005). Erschwerend für eine umfassende Bilanzierung kommt hinzu, dass noch viele Zusammenhänge wenig untersucht sind (Blankinship und Hungate, 2007). Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Vertreter der verschiedenen trophischen Ebenen der Nahrungskette im Boden sind z.B. erst in Ansätzen verstanden: bei insgesamt relativ weitem Temperaturoptimum ist nicht zuletzt auf Grund der hohen Biodiversität davon auszugehen, dass sie unterschiedlich auf die sich durch die

⁸⁵ Ghannoum *et al.*, 2007 und Fuhrer, 2007 halten dagegen auf Grund des „CO₂-Verdünnungseffektes“ für C3-Pflanzen – im Gegensatz zu C4-Pflanzen – eine erhöhte N-Düngung von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen nicht für notwendig; dagegen könnte sich eine erhöhte P-Düngung für beide Kulturen als vorteilhaft erweisen.

Klimaerwärmung verändernden Faktoren reagieren (Phillips *et al.*, 2006).

Auswirkungen von Veränderungen im Niederschlagsverhalten einschließlich Extremereignissen

Abnehmende Sommerniederschläge verbunden mit höheren Temperaturen werden voraussichtlich verstärkt zu sommerlichen Trockenstressperioden führen. Mit zunehmender Austrocknung des Bodens und insbesondere bei Ausbildung von Trockenrissen wird zum einen die mikrobielle Nährstoffnachlieferung aus der organischen Substanz verringert und zum anderen die Pflanzenwurzeln unmittelbar negativ beeinflusst. Bei ehemals vernässten Böden ist dieser Effekt als positiv zu bewerten. Umgekehrt lassen zunehmende Winterniederschläge eine höhere Vernäsungsgefahr mit entsprechenden Einschränkungen für die Bodenbearbeitung bzw. den Weidebetrieb erwarten (DEFRA, 2000). Darüber hinaus kommen bei wassergesättigtem Boden aerobe Prozesse zum Erliegen, während anaerobe Prozesse zunehmen. Das gleiche gilt für Starkregenereignisse; wird die Infiltrationskapazität des Bodens überschritten, besteht zudem eine zunehmende Erosions- und Hochwassergefahr.

Auswirkungen von Veränderungen in der atmosphärischen Konzentration sonstiger Spurengase

Hier ist in erster Linie die Bodenversauerung zu nennen, die u.a. auf den nach wie vor hohen atmosphärischen Stickstoff-Eintrag (aus Verkehr und Landwirtschaft)

zurück geht (z.B. Bobbink *et al.*, 1998; BMELV, 2006a; Ahlgrimm und Dämmgen, 1994). Die „Stickstoff-Überdüngung“ von Ökosystemen ist ein wesentlicher Faktor des sog. „Globalen Wandels“, der in seiner Definition weiter gefasst ist als der Klimawandel. Auch die weiterhin ansteigenden O₃-Konzentrationen (s. dazu auch Kapitel 2.1.4) können potentiell den Boden und die darin ablaufenden Prozesse beeinflussen. Dabei erfolgt die Wirkung ausschließlich indirekt über die Veränderung der Qualität und Quantität der zugeführten pflanzlichen Biomasse sowie der daraus resultierenden Effekte auf die mikrobielle Aktivität (Larson *et al.*, 2002) und Zusammensetzung (Phillips *et al.*, 2002). In Waldökosystemen führt O₃-Belastung so letztendlich zu niedrigeren und weniger stabilen C-Gehalten im Boden (Loya *et al.*, 2003).

Für Deutschland bekannte Auswirkungen

In Nordrhein-Westfalen ist seit Beginn der 90er Jahre eine Abnahme der C_{org}-Gehalte in Ackerböden festgestellt worden, die beobachtet werden sollte (Preger *et al.*, 2006). In Abhängigkeit vom Bodentyp und -art sowie der Bodenbedeckung traten im Extremjahr 2003 und zum Teil auch im Juli 2006 bzw. im April 2007 tiefe Trockenrisse auf, wie sie sonst eher aus südlichen Ländern mit ausgeprägter Trockenzeit bekannt sind. Dagegen verursachten ungewöhnlich hohe Niederschläge z.B. im Sommer 2007, August 2006 oder auch in Folge des Elbehochwassers (2002) Ertragseinbußen durch die Schädigung der Kulturen und die Behinderung der Ernte.

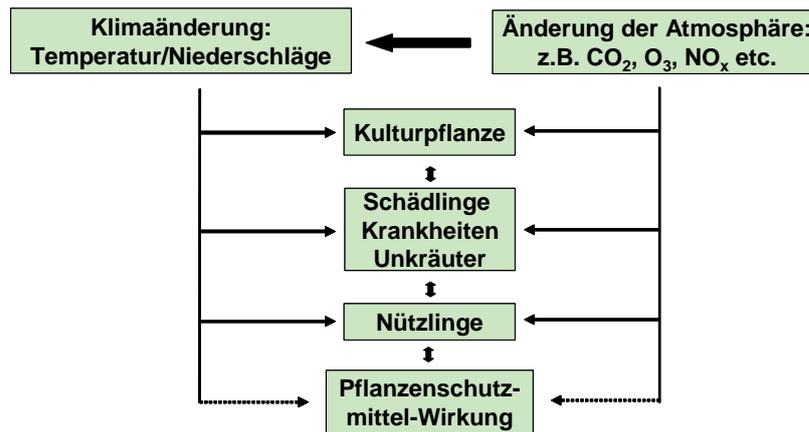


Abbildung 19: Schematische Darstellung möglicher direkter und indirekter Auswirkungen von Klimaänderungen auf Schadorganismen, Krankheiten und Unkräuter.

Auch im Braunschweiger FACE-Experiment stieg die mikrobielle Atmung bei Zuckerrübe in Folge erhöhter CO₂-Konzentrationen an. Dagegen konnte – trotz eines deutlich positiven Effekts der Stickstoff-Behandlung – kein signifikanter Anstieg in der mikrobiellen Biomasse festgestellt werden (Weigel *et al.*, 2005). Im selben Experiment erhöhte sich für Winterweizen die Anzahl an Springschwänzen (*Collembolen*) unter CO₂-Anreicherung (Sticht *et al.*, 2006). Außerdem konnte sowohl unter Winterweizen als auch unter Zuckerrübe eine Verschiebung des Artenverhältnisses auf Grund einer Zunahme hemiedaphischer⁸⁶ auf Kosten euedaphischer Collembolen festgestellt werden (Sticht *et al.*, 2008). Springschwänze spielen als Zersetzer im Boden und als Beute in der Nahrungskette eine große Rolle in vielen Ökosystemen.

Gegenwärtig werden durch verschiedene deutsche Arbeitsgruppen eine Reihe von Prozessstudien zu den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Böden

durchgeführt bzw. initiiert, die hier nicht weiter dargestellt werden können.

4.3 Auswirkungen von Klimaänderungen auf Schadorganismen (Unkräuter, Schädlinge und Krankheiten)

Neben den bisher beschriebenen direkten Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion bzw. auf den Boden als landwirtschaftlichen Produktionsfaktor, sind auch mögliche indirekte Auswirkungen des Klimawandels für eine Wirkungsbeurteilung zu berücksichtigen. Ein entscheidender Faktor ist hierbei der sich aus dem Klimawandel ergebende veränderte Druck durch Unkräuter, Schadorganismen bzw. Schädlinge, und Krankheiten auf landwirtschaftliche Kulturen. Die sich daraus ableitenden Folgen können u.a. aufgrund der komplexen Interaktionen und Rückkopplungen zwischen Klima, Wirtspflanzen und Pathogenen bisher in ihrem Umfang noch kaum abgeschätzt werden (Abbildung 19; z.B. DEFRA, 2000; Rosenzweig und Hillel, 1998b; Chakraborty *et al.*,

⁸⁶ Von Edaphon = Boden.

2000; Scherm, 2004). Coakley *et al.* (1999) vertreten allerdings die Ansicht, dass vollkommen neue Probleme im Pflanzenschutz wenig wahrscheinlich sind, da die meisten Schädlings- und Krankheitsprobleme wirtsspezifisch sind.

4.3.1 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Unkräuter

Unkräuter oder auch Beikräuter sind wie landwirtschaftliche Kulturen Primärproduzenten und konkurrieren mit diesen um für das Wachstum notwendige Ressourcen. Unter anderem auf Grund der Überdauerung ihrer Samen im Boden sind sie weit verbreitet und reduzieren den Ertrag von Kulturpflanzen, sofern sie nicht bekämpft werden. Weltweit liegen die Ertragsverluste durch Unkräuter bei ca. 12%, bei mangelhafter oder fehlender Kontrolle auch deutlich darüber (Patterson *et al.*, 1999; Freier, 2004).

Auswirkungen auf die Wachstumsbedingungen von Unkräutern

Das Wachstum von Unkräutern wird ebenso wie das landwirtschaftlicher Kulturen durch veränderte Klimabedingungen beeinflusst (Rosenzweig und Hillel, 1998b; Patterson *et al.*, 1999). Hierzu können wegen der Vielzahl von Möglichkeiten der möglichen Auswirkungen nur generelle Aussagen getroffen werden. Vom CO₂-Düngeeffekt z.B. werden v.a. Unkräuter profitieren, die dem C₃-Photosynthesetyp angehören. Durch die höheren Temperaturen und die längere Vegetationsperiode können sich bisher wärmelimitierte Arten ausbreiten. Letzte-

res gilt v.a. für C₄-Pflanzen und damit auch Unkräuter, die besser an heiße und trockene Bedingungen angepasst sind. Gleichzeitig können Unkräuter bei einer Erwärmung mehrere Generationen in einem Jahr hervorbringen, und damit könnte ihre Verbreitung generell zunehmen. Auf Grund der raschen Generationsfolge können sich Unkräuter darüber hinaus – im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Kulturen – oftmals sehr schnell an sich verändernde Umwelt- und damit auch Klimabedingungen anpassen, wie z.B. die rasche Entwicklung von Herbizidresistenzen zeigt (DEFRA, 2000). Durch die Klimaerwärmung ist daher – v.a. bei ausreichender Wasserversorgung – mit einer beschleunigten evolutionären Entwicklung zu rechnen, die Unkräutern einen Konkurrenzvorteil einräumen könnte. Einige Unkräuter könnten dagegen ihre gegenwärtigen kompetitiven Fähigkeiten unter veränderten Bedingungen einbüßen (Rosenzweig und Hillel, 1998b).

Auswirkungen auf die Konkurrenz zwischen landwirtschaftlichen Kulturen und Unkräutern sowie auf die Unkrautkontrolle

Durch die gleichzeitige Förderung des Wachstums von Unkräutern und Kulturpflanzen wird ein Teil der positiven Wirkung des direkten CO₂-Düngeeffektes auf landwirtschaftliche Kulturen wieder zunichte gemacht (Rosenzweig und Hillel, 1998b), da die unerwünschte Wachstumsstimulation Nachfolgeprobleme schafft. Da es sich bei den meisten Anbaukulturen in gemäßigten Breiten um C₃-Pflanzen handelt, die am meisten gefürchteten Un-

kräuter jedoch überwiegend dem C₄-Typus angehören, ist bei alleiniger Betrachtung des CO₂-Effektes ein Konkurrenznachteil der C₄-Unkräuter zu erwarten. Offen bleibt auch hier, inwieweit dieser Effekt durch die höhere Temperaturunempfindlichkeit und die relativ größere Trockenstress-Resistenz der C₄-Unkräuter kompensiert wird. Bei C₄-Kulturen, wie z.B. Mais oder Hirse, deren Begleitflora zum C₃-Typus gehört, könnte der Unkrautdruck aufgrund des CO₂-Düngeeffektes in Zukunft zunehmen, aber auch hier ist die jeweilige Reaktion der Unkrautarten auf die gleichzeitige Temperaturerhöhung und auf die zunehmende Trockenheit entscheidend. Auch die jeweilige Toleranz von Unkräutern und Kulturpflanzen gegenüber ansteigenden O₃-Konzentrationen (und weiteren Luftschadstoffen) sowie sich ändernder UV-B-Strahlung kann das Konkurrenzverhalten dieser beiden Pflanzengruppen untereinander beeinflussen (Krupa und Jäger, 1996).

Die Zunahme von Trockenperioden, Starkregenniederschlägen und des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre könnte in Zukunft auch die Applikation von Herbiziden, bzw. generell von Pestiziden, beeinflussen bzw. erschweren, was wiederum im Kontext der möglichen Nebenwirkungen, z.B. auf Nichtzielorganismen, Nützlinge und Ökosysteme zu sehen ist. Auch die Effizienz der Wirksamkeit der applizierten Herbizide kann sich verändern (Rosenzweig und Hillel, 1989b; Patterson *et al.*, 1999): durch die unter erhöhten CO₂-Konzentrationen verringerte Transpiration könnte z.B. die Aufnahme von Wirkstoffen über den Boden reduziert sein. Die Wirkung von Chemikalien, die

über die Blätter appliziert werden, könnte durch Veränderungen in der Blattanatomie und Oberflächenstruktur modifiziert werden – hier könnte z.B. ein durch die CO₂-Anreicherung verursachter höherer Stärkegehalt die Wirksamkeit mindern. Ebenso dürfte ein verstärktes Wurzel- und Knollenwachstum Unkräuter widerstandsfähiger machen (Patterson und Flint, 1990). Darüber hinaus erhöhen steigende Temperaturen sowohl die Flüchtigkeit der Chemikalien selbst als auch den Metabolismus der Pflanzen, so dass eine Veränderung der Wirksamkeit einiger Substanzen vermutet werden kann. Auch die Effizienz biologischer Unkrautbekämpfungsmittel könnte durch die Klimaänderungen betroffen sein, wobei hierzu jedoch noch keine Szenarien vorliegen.

In Deutschland bereits zu beobachtende Auswirkungen

In Deutschland ist z.B. bereits eine Zunahme Wärme liebender Ackerunkräuter zu beobachten (Prof. Böcker, mündl. Mitteilung, landwirtschaftlicher Hochschultag der Universität Hohenheim vom 25.06.2007). Die wegen ihres allergenen Potentials gefürchtete, wärmeliebende beifußblättrige Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia* L.) hat sich in Deutschland dagegen noch nicht dauerhaft etablieren können. Dagegen stellt diese Pflanze in Österreich in einigen Bezirken bereits das Hauptunkraut in Mais und anderen Hackfrüchten (Szith, 2007). Zusätzlich zur Erwärmung könnten auch steigende atmosphärische CO₂-Konzentrationen die Pollenproduktion und damit das Risiko allergischer Reaktionen erhöhen, wie aus CO₂-

Anreicherungsversuchen geschlossen werden kann (Wayne *et al.*, 2002).

4.3.2 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Schädlinge

Neben Ertragsverlusten durch Unkräuter stellen auch Schädlinge, wie v.a. Schadinsekten, eine bedeutende Ursache für Ernteverluste in der Landwirtschaft dar. Der größere Teil davon basiert auf Fraßschäden. Im Falle von saugenden Insekten (z.B. Läusen) kann dazu die Übertragung von Krankheiten treten. Dabei wird das Schadpotential durch die Klimaveränderungen *indirekt* und *direkt* beeinflusst. Indirekt z.B. durch Auswirkungen auf die Qualität von Wirtspflanzen und auf weitere Glieder in der Nahrungskette bzw. im Ökosystem, wie insbesondere Räuber oder Nützlinge und direkt auf Grund ansteigender Temperaturen, veränderter Niederschlags- und Windverhältnisse. Im Allgemeinen wird mit einer Zunahme des Schädlingsdruckes durch die Klimaerwärmung gerechnet (Rosenzweig und Hillel, 1998b; Patterson *et al.*, 1999). Im Jahr 2025 könnten z.B. die dadurch verursachten Ertragsverluste für die acht wichtigsten Ackerbaukulturen weltweit bei ca. 20% liegen, was u.a. die Notwendigkeit von Gegenmaßnahmen unterstreicht (Freier, 2004). Im Folgenden stehen herbivore Insekten im Mittelpunkt. Schäden durch andere Organismen, wie z.B. wühlende Säugetiere etc., sind im Allgemeinen lokal und mengenmäßig begrenzt und werden hier nicht weiter behandelt.

Direkte Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Schädlinge

Für sämtliche Organismen spielt das Klima eine entscheidende Rolle bei der Etablierung von Habitaten. Witterungsschwankungen von Jahr zu Jahr und im Jahresverlauf sowie Wetterextreme beeinflussen dabei die Entwicklung und Größe der jeweiligen Population.

Reaktion auf Temperaturerhöhung

Insekten sind *poikilotherme* Lebewesen, d.h. ihre Körpertemperatur wird durch die Umgebungstemperatur bestimmt. Da die meisten Insekten relativ hohe Temperaturoptima haben, ermöglichen ihnen steigende Temperaturen schneller und größer zu wachsen, eine insgesamt höhere Vitalität zu erreichen und sich stärker fortzupflanzen (Mattson und Haack, 1987). Bei ausreichendem Niederschlag favorisiert die bei höheren Temperaturen höhere relative Luftfeuchte darüber hinaus die meisten metabolischen Prozesse (Ontario Forest Research Institute, 2003). In den mittleren und höheren Breiten werden dabei durch mildere Winter vor allem frostempfindliche Schadinsekten und Wurzelparasiten begünstigt (Wehling, 2004). Im Einzelnen muss mit zunehmender Klimaerwärmung mit folgenden Reaktionen gerechnet werden (zusammengestellt aus: Rosenzweig und Hillel, 1998b; Jahn und Freier, 2001, zitiert in Freier, 2004; Patterson *et al.*, 1999; DEFRA, 2000; Bale *et al.*, 2002):

- Mit einer Ausbreitung polwärts und einem zunehmenden Risiko invasiver, Wärme liebender Arten; dies wird unterstützt durch die gleichzeitige Ausdehnung des Anbaus landwirtschaftlicher Kulturen und das Einschleppen exotischer Arten durch den globalen

Handel und Verkehr; die Wanderungsgeschwindigkeit von Schädlingen wird dabei im Allgemeinen auf ca. 50-80 km pro Dekade geschätzt (DETR, 1998 zitiert in NFU, 2005);

- Mit einer zunehmenden vitalen Überwinterung von Schädlingen und damit einem höheren Befallsdruck im nächsten Jahr. Eine Ausnahme könnten einige Regionen bilden, in denen das Fehlen einer schützenden Schneedecke zu einem verstärkten Erfrieren der Insekten führen könnte. Außerdem könnte eine raschere Entwicklung bei wärmeren Wintertemperaturen die Tiere empfindlicher für Spätfröste und Kälteperioden machen, wie z.B. von Masters *et al.* (1998) für Zikaden (*Auchenorrhyncha*) beobachtet, zu denen auch die Grashüpfer gehören;
- Mit einer Verlängerung der „biologisch aktiven“ Jahreszeit verbunden mit einer schnelleren Entwicklungsrate und einer größeren Anzahl an Generationen. Insbesondere wenn die Schädlinge bereits zu einem früheren, sensitiveren Entwicklungsstadium von landwirtschaftlichen Kulturen massiv auftreten bzw. sich in ihrem Wachstumsstadium befinden, ist mit höheren Einbußen zu rechnen. Einschränkung gilt, dass im gemäßigten Klimabereich die phänologische Entwicklung neben der Temperatur häufig auch von der Photoperiode gesteuert wird;
- Mit einer Verschiebung der Synchronität insgesamt zwischen Pflanzen und Schädlingen einerseits und

Schädlingen und natürlichen Gegenspielern andererseits. Im günstigsten Falle käme es dann wegen Nahrungsmangel zum Zusammenbruch der Population, im ungünstigsten Fall dagegen zu einer explosiven Vermehrung der Schädlinge und hohen Ertragsverlusten.

Andererseits könnten einige bisher angepasste Schädlinge auch durch Klimaveränderungen geschwächt werden, wie z.B. für den bedeutenden Winterweizenschädling *Delia coarctata* in England prognostiziert wird. Ebenso werden neu etablierte Schädlinge voraussichtlich nicht immer in der Lage sein, ihr aus dem bisherigen Verbreitungsgebiet bekanntes Schadenspotential zu entwickeln (DEFRA, 2000).

Reaktion auf verändertes Niederschlags- und Extremwetterverhalten

Da Trockenstress die Massenvermehrung von Schädlingen zu fördern scheint, könnten trockenere Regionen in Zukunft anfälliger gegenüber Schädlingen werden (Rosenzweig und Hillel, 1998b). Nach dem heißen Sommer 2003 wurden z.B. in Großbritannien ca. 15% des Kornes wegen Schädlingsbefall zurückgewiesen (NFU, 2005). In Österreich führten im selben Jahr Trockenstress und ein massenhaftes Auftreten von Engerlingen des Junikäfers (*Phyllopertha horticola*) zu Schäden in Millionenhöhe im Grünland, die auf Grund der Beschädigung der Grasnarbe nicht nur gravierende Folgeschäden für die nachfolgenden Jahre implizierten (Höhe der Schäden insgesamt: 263 Mio. €) sondern auch die Muren- und Lawinengefahr erhöhten (Buchgraber, 2007; Szith, 2007).

Andererseits kann lang anhaltende Dürre auch die Vitalität der Insekten reduzieren. In der Folge reagieren einige Blutsauger mit einer erhöhten Nahrungsaufnahme, um Dehydrierungsverluste auszugleichen (Ontario Forest Research Institute, 2003). Im Gegensatz dazu reduzieren häufiger auftretende Starkregenereignisse bodenbürtige Schädlinge und Brutplätze v.a. Blutsaugender Insekten, wie z.B. Mücken. Dabei resultieren höhere Temperaturen verbunden mit schwierigen Umweltbedingungen in einer höheren Mobilität, bei großräumigen Klimaveränderungen auch in einer stärkeren Durchmischung von Schädlingen und Genpools. Dabei spielt für die überregionale Verbreitung der Transport mit dem Wind eine entscheidende Rolle. Klimaveränderungen, die die atmosphärische Zirkulation, wie z.B. die innertropische Konvergenzzone, beeinflussen, haben damit auch Auswirkungen auf Ausbreitungsmuster windverbreiteter (*anemochorer*) Insekten (Patterson *et al.*, 1999).

Indirekte Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Schädlinge

Wie in Kapitel 4.1.7 ausführlich beschrieben, führen erhöhte CO₂-Konzentrationen zu Veränderungen der stofflichen Zusammensetzung von C₃-Pflanzen. Während ein erhöhter Gehalt z.B. an Flavonoiden und anderen sekundären Pflanzenstoffen einen verbesserten Fraßschutz darstellt, scheinen erhöhte Kohlenhydratgehalte und niedrigere Nährstoffkonzentrationen – wie insbesondere an Stickstoff – die Futteraufnahme von Herbivoren zu stimulieren. Das dient dazu, das verringerte C/N-Verhältnis

zu kompensieren (Brunnert, 1994), zumal Pflanzenfresser ohnehin häufiger Stickstoff als Kohlenhydrat limitiert sind (Niklaus, 2007). Dagegen kann Trockenstress zu einer Nährstoffakkumulation (v.a. Stickstoff) in den Blättern und zu einer Schwächung des Abwehrsystems in der Pflanze und in der Folge zu einem erhöhten Schädlingsbefall führen. Zusätzlich sind Pflanzen unter Trockenstress „gelber“ und wärmer, was über eine erhöhte Infrarotreflektion Insekten anzieht (Rosenzweig und Hillel, 1998b). Zu den Interaktionen zwischen erhöhten O₃-Konzentrationen, UV-B-Strahlung und Schädlingsbefall ist noch relativ wenig bekannt (Krupa und Jäger, 1996).

Klimaveränderungen, Nützlinge und Integrierte Schädlingsbekämpfung („Integrated Pest Management“)

Die Klimaveränderungen werden Auswirkungen auf das Vorkommen und die Vitalität von Nützlingen haben. So ist z. B. die Fraßaktivität von Maikäfern, den natürlichen Feinden von Blattläusen, bereits bei einem Temperaturanstieg von 2°C deutlich erhöht (Freier, 2004). Da Blattläuse besser an niedrigere Temperaturen angepasst sind, dürfte eine Temperaturerhöhung in diesem speziellen Fall ihre natürlichen Feinde begünstigen (Rosenzweig und Hillel, 1998b). Weil von einer Klimaerwärmung v.a. Organismen mit rascher Generationsfolge profitieren, könnte sich das Gleichgewicht generell allerdings zu Gunsten der kleineren, auf einer niedrigeren trophischen Ebene stehenden Schädlinge verschieben.

Dennis und Shreeve (1991, zitiert in Rosenzweig und Hillel, 1998b) haben allgemeine Kriterien für die *Vulnerabilität* gegenüber Klimaveränderungen aufgestellt, die auch für Belange des Naturschutzes und der Biodiversität (s. Kapitel 4.7.2) von Bedeutung sind. Als Vulnerabilität bezeichnet man in der Klimafolgenforschung den Grad der *Sensitivität* eines Systems gegenüber dem Klimawandel (IPCC, 2001b). Die Sensitivität drückt wiederum den Grad der Beeinflussung eines Systems durch Klimaveränderungen aus – sei diese positiv oder negativ. Dabei kann der Effekt direkt oder indirekt erfolgen. Vulnerabilität ist somit eine Funktion der Art, der Größe und der Geschwindigkeit von Klimaveränderungen bzw. der Änderungen, denen das System unterworfen ist. Dabei sind Veränderungen von Extremwerten – vor allem der Temperatur und des Niederschlags – oft entscheidender als Veränderungen der Mittelwerte. Ferner ist die Vulnerabilität eines Systems in hohem Maße von dem Grad seiner Exposition sowie seiner *Anpassungs-* oder auch *Adaptionskapazität* abhängig. Diese Kriterien berücksichtigen:

- die geographische Verbreitung (Breitengrade);
- die Verbreitung innerhalb ihrer geographisch möglichen Ausdehnung; die Abhängigkeit von einer bzw. mehreren Wirtspflanze(n)⁸⁷;
- die Häufigkeit der Wirtspflanze; den Habitattyp (Climax- versus Pionierhabitat); und

- die Ausdehnung des Habitattyps und die Fähigkeit zur Verbreitung.

Danach sind migrierende, polyphage (allesfressende) Arten mit einer beträchtlichen geographischen Ausdehnung, kontinuierlicher Verbreitung, weit verbreiteten Wirtspflanzen und unspezifischen, wenig limitierten Habitaten am wenigsten anfällig gegenüber Klimaveränderungen.

Bereits heute stellt die kurz- bis mittelfristige Simulation der Dynamik von Schädlingspopulationen (wie auch Pflanzenpathogenen, s.u.) zur möglichst exakten Vorhersage des Erreichens von Schadschwellen⁸⁸ mit Hilfe von Witterungsmodellen⁸⁹ ein wichtiges Instrument der biologischen bzw. integrierten Schädlingsbekämpfung dar (DEFRA, 2000). Die langfristige Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Schädlingskomplex unterliegt allerdings noch gewaltigen Herausforderungen (Scherer, 2004): eine Unsicherheit liegt in der nach wie vor relativ großen Spannweite der projizierten Klimaveränderungen, die sich in den Modellen fortsetzt bzw. vervielfältigt. Das hat zur Folge, dass immer die gesamte Szenarienvielfalt abgebildet werden muss, um zuverlässige Aussagen machen zu können. Die nächste Schwierigkeit stellt die Nichtlinearität und die Bedeutung von Schwellenwerten für biotischen Reaktionen auf Klimaveränderungen dar, die auf Grund der bisher noch relativ grobskaligen und schlecht aufgelösten globalen Klimapro-

⁸⁷ entsprechend Beutetieren

⁸⁸ Zur Reduktion des Pestizideinsatzes erfolgt in integrierten Anbauverfahren erst bei Erreichen von Schadschwellen die Schädlingsbekämpfung zur Vermeidung größerer Ertragseinbußen.

⁸⁹ Angeboten z.B. durch die agrarmeteorologische Abteilung des DWD und privaten Wetterdiensten.

jektionen zu ungenauen Aussagen führen können. Eine dritte Herausforderung betrifft die genetische Anpassungsfähigkeit von Schädlingen und Pathogenen, die in den meisten Studien zu Auswirkungen des Klimawandels nicht berücksichtigt wird. Meist wird eine Änderung der Phänologie oder der geographischen Verbreitung als Anpassung an den Klimawandel vorausgesetzt und die Möglichkeit der Anpassung an die sich ändernden Umweltbedingungen außer Acht gelassen (DEFRA, 2000). Dagegen zeigen sowohl fossile als auch aktuelle Beispiele eine Aufspaltung von Arten auf Grund der physiologischen Anpassung von Stämmen an spezifische geographische Umweltbedingungen (Review von Bale *et al.*, 2002).

Eine weitere Schwierigkeit bildet die geringe Datengrundlage zu bisherigen Auswirkungen der Klimaveränderung auf Pflanzenpathogene (Chakraborty *et al.*, 2000) bzw. Schadorganismen, da die meisten so genannter „Fingerprint-Studien“ für Pflanzen oder leicht zu beobachtende Tierarten durchgeführt wurden und landwirtschaftliche Schädlinge mit Ausnahme einer Studie zu Blattläusen in Großbritannien (s. auch DEFRA, 2000) im allgemeinen vernachlässigt wurden. Hinzu kommt das Zusammenspiel des Klimawandels mit anderen Faktoren, wie z.B. dem Betriebsmanagement. Darum versuchen komplexere Modelle neuerer Generation zu Auswirkungen des Globalen Wandels auf Agrarökosysteme auch diese Faktoren, wie insbesondere den Landnutzungswandel und sozioökonomische Faktoren, einzubeziehen (Scherm *et al.*, 2000).

Neben der Schädlingskontrolle üben Nützlinge auch andere wichtige Servicefunktionen in der Landwirtschaft aus, wie z.B. das Bestäuben von Kulturen, die für ihre Verbreitung auf Fremdbestäubung durch Tiere angewiesen sind. Erst in jüngerer Zeit wurde die wirtschaftliche Dimension dieses Problems erkannt, da z.B. Kulturen wie Kakao per Hand bestäubt werden müssen, wenn die natürlichen Bestäuber durch das z.T. massive Anpflanzen von Monokulturen und die dadurch reduzierte Biodiversität in „Agrarwüsten“ ausbleiben oder auf Grund genetischer Verarmung bzw. Parasitenbefall in ihrem Bestand bedroht sind. Besorgt wird seit einigen Jahren das so genannte Bienensterben beobachtet, von dem in den USA rund ein Viertel und in Deutschland ca. ein Fünftel der Honigbienenpopulation betroffen ist. Denn Bienen produzieren nicht nur Honig, sondern bestäuben auch mehr als 90 Obst- und Gemüsesorten. 80% der Bestäubung landwirtschaftlicher Produkte geht auf die Honigbiene zurück und ihr Beitrag zur US-amerikanischen Lebensmittelproduktion wird auf ca. elf Milliarden Euro geschätzt. Als Ursache kommen neben dem Befall durch die Varroamilbe (*Varroa jacobsoni*) auch Bakterien, Pestizide, ein unbekanntes Virus oder eine Kombination aus diesen Faktoren in Frage (spiegelonline, 03.05.2007).

Andererseits könnten Bestäuber, wie z.B. Bienen – und damit auch Imker – von der Klimaerwärmung profitieren, da bei erhöhten CO₂-Konzentrationen u.a. mehr Nektar gebildet wird (Kimball, 1985, zitiert in Rosenzweig und Hillel, 1998b). Bei Trockenheit verringert sich allerdings wiederum die Nektarausbeute.

In Deutschland bereits zu beobachtende bzw. zu erwartende Auswirkungen

In Deutschland finden sich bereits Hinweise auf die Arealausdehnung bisher wärmelimitierter Arten (BFN, 2004), insbesondere auch von Schädlingen (z.B. Maixner und Holz, 2003). Weinanbaugebiete sind mit als erste betroffen, da sie häufig Wärmeinseln darstellen und damit als Trittsteine für wärmebedürftige Arten dienen (Maixner, pers. Mitteilung). Auch im Maisanbau zeigt sich seit den 60er Jahren zunehmend eine Ausbreitung des Vorkommens des wirtschaftlich wichtigsten Schädlings, des Maiszünslers (*Ostrinia nubilalis*), von Süd- nach Norddeutschland (Wehling, 2004). Kam dieser in den 80er Jahren noch überwiegend in Süddeutschland vor, findet er sich mittlerweile nicht nur in Nordwestdeutschland sondern auch in Brandenburg (Lorenz und Langenbruch, 1989; Schmitz *et al.*, 2002; Schröder *et al.*, 2006). Mittlerweile sind bereits über 300.000 ha der Anbaufläche betroffen, wobei sich die Ertragseinbußen in den Hauptbefallsgebieten auf bis zu 20% belaufen. Für einen weiteren Temperaturanstieg von über 3°C könnte er sich mehr als 1000 km weiter nach Norden ausbreiten und in seinem bisherigen Verbreitungsgebiet eine weitere Generation hervorbringen (Porter *et al.*, 1991).

Auch der aus Nordamerika stammende Westliche Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera virgifera*) breitet sich seit 1992 in Europa aus und wird bald in Deutschland auftreten. Ferner könnten Getreidewanzen, die u.a. in Südosteuropa zu den wichtigsten Schädlingen zählen, zunehmend Schadschwellen erreichen. Bereits ein Be-

fall von nur 1% des Getreides führt hier bereits zu Schäden und ab 3-4% verliert das Mehl seine Backfähigkeit (Szith, 2007). Auch Getreidelaufkäfer und verschiedene Blattlausarten könnten in Zukunft häufiger zu massenhaftem Auftreten neigen (Freier, 2004). Nach einer Studie der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bayerischen Landwirte könnten sich die Mindererträge durch Pflanzenschädlinge bei Getreide auf ca. 10 bei Hackfrüchten gar auf 50 Doppelzentner pro Hektar belaufen (Doleschel, 2007).

Im Gartenbau muss damit gerechnet werden, dass sich zunehmend Wärme liebende Arten, die bisher nur im Mittelmeerraum oder geschützt unter Glas auftraten, auch im Freiland existieren können (SAG, 2007; DEFRA, 2000). Auch im Obst- und Weinbau (z.B. Apfelwickler und Zikaden) und in der Forstwirtschaft (z.B. Borkenkäfer, Schwammspinner *Lymantria dispar*) ist mit einem zunehmenden Schädlingsdruck zu rechnen: Szenarien rechnen hier mit einer schnelleren Generationsfolge und damit höherem Schadpotential (PIK, 2005; SAG, 2007).

4.3.3 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Krankheitserreger

Organismen, die Krankheiten verursachen, werden als Pathogene bezeichnet. Während bei Tieren Infektionen überwiegend durch Bakterien und Viren ausgelöst werden, verursachen Pilze die meisten Pflanzenkrankheiten. Auch Nematoden, Phytoplasmen und parasitische Pflanzen gehö-

ren zu dieser Gruppe. Neben dem Vorhandensein und der Aggressivität (Virulenz) von Krankheitserregern entscheidet auch die Prädisposition des Wirts darüber, ob es tatsächlich zum Krankheitsausbruch kommt. Schwächend wirken z.B. Hitze- oder Kältestress, (Luft-) Schadstoffe, UV-Strahlung und mangelhafte Ernährung; auch heftige Regenfälle können zum Ausbruch von Krankheiten führen. Dieses Zusammenwirken von Krankheitserregern, Prädisposition und Umweltfaktoren wird auch als so genanntes „Krankheits-Dreieck“ bezeichnet (Ontario Forest Research Institute, 2003).

Weltweit sollen die durch Krankheitsbefall bedingten Verluste bei den wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturen einschließlich Reis, Weizen, Gerste, Mais und Kartoffeln 9-16% betragen und allein in den USA wurden für Fungizide jährlich 5 Milliarden Dollar ausgegeben (Oerke *et al.*, 1994, zitiert in Chakraborty *et al.*, 2000). Es ist zu erwarten, dass der Klimawandel über die Veränderung der abiotischen Umweltbedingungen hinaus sowohl das Vorhandensein bzw. die Übertragung von Krankheitserregern als auch die Prädisposition des jeweiligen Wirtes sowie Interaktionen zwischen den verschiedenen Faktoren beeinflussen wird. Da die Erreger häufig von so genannten Vektoren (häufig Schadinsekten) übertragen werden, fördern grundsätzlich alle Faktoren, die diese begünstigen, auch den Krankheitsbefall (DEFRA, 2000). Dabei kommt es im Allgemeinen dann zum Krankheitsausbruch, wenn die Umweltbedingungen, d.h. vorwiegend die Temperatur, für die Pflanze einen größeren Stress darstellen als für den Pathogen bzw. den Vektor (Ontario Forest

Research Institute, 2003). Eine genaue Abschätzung der zukünftigen Schadensentwicklung ist zurzeit auf Grund mangelnder Daten und unterschiedlicher Auflösung von globalen Klimamodellen und Simulationen zur Krankheitsentwicklung noch schwierig (Chakraborty *et al.*, 2000). Hinzu kommen vermehrt abiotische Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen, die durch die Zunahme von Extremereignissen, wie insbesondere Dürre, Hochwasser, Windbruch und Hagel verursacht werden (Ontario Forest Research Institute, 2003).

Direkte Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Krankheitsbefall

Wärmere Temperaturen werden wahrscheinlich das Vordringen von bisher in kühleren Regionen nicht etablierten Krankheiten ermöglichen – entsprechend der Ausbreitung bisher wärmelimitierter Kulturen und Vektoren. Darüber hinaus werden wärmere Temperaturen in Abhängigkeit von der *relativen Luftfeuchte* einzelne Pathogene fördern und andere schwächen: so werden z.B. Virose, die durch Blattläuse übertragen werden, nach einem milden Winter besonders häufig beobachtet (Ontario Forest Research Institute, 2003). Weitere Beispiele wurden u.a. von Friedrich (1994) zusammengestellt:

- Mildere Winter führen zu einem rascheren und heftigeren Ausbruch von Ephememem Mehltau (*Erysiphe graminis*), Zwerg- (*Puccinia hordei*) und Gelbrost (*Puccinia striiformis*) (Meier, 1985);
- Milde Winter zusammen mit sehr warmer Witterung während der Vege-

tationsperiode ergeben optimale Wachstumsbedingungen für die *Cercospora* Blattfleckenkrankheit (*Cercospora beticola*), echten Mehltau (*Erysiphe betae*) und *Rhizomania* bei Rüben;

- Warme, feuchte Bedingungen führen zu einem früheren und stärkeren Ausbruch der Krautfäule bei Kartoffel (*Phytophthora infestans*);
- Heiße und trockene Sommer werden dagegen Pilzinfektionen im allgemeinen verringern, da diese für ihre Entwicklung meist feuchte und eher mäßig warme Bedingungen benötigen und die Resistenz der Pflanzen unter diesen Bedingungen erhöht ist. Dies gilt insbesondere für Pilze, deren Sporenverbreitung auf Spritzwassertröpfchen angewiesen ist, wie z.B. die *Rhynchosporium* Blattfleckenkrankheit der Gerste und des Roggens (*Rhynchosporium secalis*) und die Blattdürre und Spelzenbräune des Weizens (*Septoria tritici* und *S. nodorum*);
- Häufigere und heftigere Sommerniederschläge würden diese Krankheitserreger wiederum fördern.

In gemäßigten Breiten dürften damit durch ein wärmeres und trockeneres Klima bei Getreide Gelbroste und Mehltau zugunsten von Braunrost, Blattflecken und *Fusarium* zurückgedrängt werden; bei der Zuckerrübe ergibt sich eine potentiell erhöhte Gefahr für Blattflecken durch *Cercospora* und *Ramularia*, *Rhizomania* und Virosen und bei Raps nehmen Blattkrankheiten ab und Stengelkrankheiten tendenziell zu (von Tiedemann, 1996).

Ansteigende CO_2 - und O_3 -Konzentrationen in der Atmosphäre bzw. ein höherer Anteil an *UV-B-Strahlung* werden voraussichtlich nur geringe direkte Auswirkungen auf Pflanzenpathogene haben (Manning und von Tiedemann, 1995): während bereits heutige UV-Strahlung die Sporenbildung einiger Pilze stimuliert, scheinen die meisten Pilze tolerant gegenüber O_3 zu sein. Die Auswirkungen erhöhter CO_2 -Konzentrationen sind je nach Versuchsbedingungen sehr unterschiedlich, generell allerdings eher gering.

Indirekte Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Krankheitsbefall

Als bedeutender dürften sich indirekte Auswirkungen durch Beeinflussung der Anfälligkeit und Verfügbarkeit von Wirtspflanzen erweisen (von Tiedemann, 1996), wie z.B. durch Veränderungen im Pflanzenwachstum und im Pflanzengewebe sowie der Resistenz von Pflanzen. Während die Verlängerung der Vegetationsperiode eine verlängerte Verfügbarkeit von Wirtspflanzen nach sich zieht, wirkt sich die beschleunigte Pflanzenentwicklung bei determinierten Kulturen entgegengesetzt aus. Die unter erhöhten CO_2 -Konzentrationen stimulierte Biomasseproduktion und höhere Bestandesdichte und die damit verbundene höhere Luftfeuchte dürfte einen höheren Krankheitsdruck nach sich ziehen (DEFRA, 2000; Chakraborty *et al.*, 2000), wie z.B. durch Mehltau-, Blattflecken- und Braunfäulepilze (Manning und von Tiedemann, 1995). Darüber hinaus fördern die unter CO_2 -Anreicherung erhöhten Kohlenhydratgehalte im Blatt die Entwicklung von Rostpilzen. Die zusätz-

lich beobachtete stärkere Verlagerung von Assimilaten in die Wurzel kann sowohl bodenbürtige Pilze und Bakterien stimulieren als auch die Widerstandskraft durch gesteigerte Mykorrhizierung verbessern (Rosenzweig und Hillel, 1998b). Auch höhere Mengen an Pflanzenrückständen nach der Ernte können die Inokulierung mit Krankheitserregern fördern. Die Bedeutung der Verringerung der Spaltöffnungsweite für den Krankheitsbefall ist dagegen noch nicht endgültig geklärt (Manning und von Tiedemann, 1995).

Während die unter höheren CO_2 -Konzentrationen erhöhte Produktivität und die veränderte Qualität der Pflanzenbestände generell eher Krankheiten fördert, wirken sich erhöhte O_3 -Gehalte und UV-B-Strahlung häufig entgegengesetzt aus: reduziertes Pflanzenwachstum und frühere Seneszenz sowie die erhöhte Produktion von sekundären Inhaltsstoffen, wie z.B. Flavonoiden, reduzieren hier häufig den Krankheitsdruck. Eine Ausnahme bilden nekrotrophe Erreger, die auf die Zersetzung von absterbendem Pflanzenmaterial spezialisiert sind. Letzteren wird ferner durch die bei akuten O_3 -Schäden auftretenden nekrotischen Blattschäden der Zugang zum Pflanzengewebe vereinfacht. Auch die erhöhte Zellmembranpermeabilität unter O_3 - und UV-B-Belastung erleichtert den Zugang für Pathogene. Für die Abschätzung der Auswirkungen der Klimaveränderungen auf den Pflanzenschutz ist daher eine Balancierung der Effekte der Veränderungen physikalischer und chemischer (CO_2 , O_3 , UV-B) Klimaelemente unerlässlich (Manning und von Tiedemann, 1995). Insgesamt sind für den Pflanzenschutz allerdings keine vollkom-

men neuen Herausforderungen zu erwarten, zumal infektiöse Krankheiten im Allgemeinen stärker den Anbautechniken als allein klimatischen Faktoren unterliegen (von Tiedemann, 1996).

In Deutschland bereits zu beobachtende Auswirkungen

In Deutschland kann eine Ausdehnung von Krankheiten bzw. das Auftreten neuer Krankheiten beobachtet werden, die auf der bisherigen Zunahme der durchschnittlichen Jahrestemperaturen basieren könnte (SAG, 2007): im *Getreideanbau* und insbesondere im Weizenanbau tritt z.B. der Blattfleckenerreger *Drechslera triticipentis*, der vor einigen Jahren nur im wärmeren Süddeutschland und Österreich vorkam, auch in nördlicheren Anbaugebieten verstärkt auf. Bei *Fusarium* kann eine Veränderung im Artenspektrum festgestellt werden: hier dehnen sich Arten mit höheren Temperaturansprüchen zunehmend nach Norden aus; zudem sind aggressivere Arten durch Rekombinationen verschiedener Arten unter geänderten Bedingungen möglich. Auch mit einem wieder höheren Befall mit *Septoria tritici*, Mehltau, Gelb- und Braunrost, DTR und Fußkrankheiten muss in Zukunft gerechnet werden (Saatenunion, 25.05.2007). Auf Grund der früher beginnenden und länger in den Herbst reichenden Vegetationsperiode sind außerdem Frühinfektionen von Getreide durch Viren bereits im April möglich, die wesentlich höhere Ertragseinbußen verursachen als spätere Infektionen (SAG, 2007).

Im *Gartenbau* ist z.B. die Eckige Blattfleckenkrankheit der Erdbeere (*Xanthomonas*

fragariae), die sich seit einigen Jahren in Deutschland ausbreitet, eine vollkommen neue Bakterienkrankheit. Bei einer allgemeinen Erwärmung ist außerdem zu befürchten, dass Erreger, deren Ausbreitung bereits eingedämmt war, wie z.B. des Erregers des Feuerbrandes im Kernobst (*Erwinia amylovora*), wieder im gesamten Bundesgebiet auftreten könnten.

Auch im *Weinbau* – bekannter Weise auf Warmegunststandorten und damit vielleicht am deutlichsten Auswirkungen der Klimaerwärmung ausgesetzt – treten in jüngerer Zeit häufiger und zunehmend aggressiver pilzliche Erreger wie Echter Mehltau, Falscher Mehltau und Schwarzals auch Traubenfäulnis (*Botrytis*, *Penicillium*, u.a.) auf. Besonders Besorgnis erregend sind allerdings die aus südlichen Anbaugebieten, d.h. vor allem dem Mittelmeerraum stammenden so genannten Holzkrankheiten, die nicht heilbar sind, sondern nur durch Kulturmaßnahmen, wie z. B. Rückschnitt, eingedämmt werden können. Hier hat der Befall der Rebstöcke mit bis zu 80% ein Existenz bedrohendes Ausmaß angenommen (Lipps, 2006). Dabei handelt es sich bei der Schwarzholzkrankheit um eine durch Zikaden übertragene bakterielle Phytoplasmaose, die zum Absterben des Stockes führen kann. Besonders betroffen ist die Rebsorte Lemberger in Baden-Württemberg. Bei den zwei weiteren Krankheiten, *Esca* und *Eutypiose* handelt es sich um Pilzkrankungen, die zu einer langsamen Zerstörung des Rebstammes führen. Besonders *Esca* breitet sich im gesamten deutschen Weinanbaugebiet aus; wichtigste vorbeugende Maßnahme ist ein möglichst rascher

Wundverschluss nach dem Rebschnitt (Lipps, 2006).

4.4 Auswirkungen der Klimaveränderungen auf Nutztiere

Die Veredelungswirtschaft ist durch moderne Stallhaltung in der Regel nicht in dem gleichen Ausmaß wie der Pflanzenbau von Klimaänderungen betroffen. Allerdings können sich auch hier Hitzestress und Veränderungen in der Futterzusammensetzung und –qualität negativ auswirken. Am besten erforscht sind Auswirkungen von Hitzestress auf die Rinderzucht, bei anderen Nutztieren – z.B. Schweinen und Geflügel – besteht z.T. ein erhebliches Kenntnisdefizit (Fischer *et al.*, 2005).

4.4.1 Grünlandproduktivität und -management

Die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Ertrag von Grünland wurden bereits unter 4.1 beschrieben. Hier sind eine höhere Biomassebildung und eine höhere Bestockung bei Beweidung (DEFRA, 2000) sowie eine höhere Flächenproduktivität durchaus möglich. Für die Tierernährung ist neben der Menge allerdings auch die Qualität und Verdaulichkeit des Futters ein entscheidendes Kriterium (s. auch 4.1.7). So wurde z.B. in der Unterweserregion 1998 bei extrem schlechter Silagequalität ein Rückgang der Milchproduktion um 20% beobachtet (Bahrenberg und König, 2005). Allerdings führt der Klimawandel – in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Pflanzengesellschaft und dem Düngenniveau – zu

zwei gegenläufigen Effekten: während erhöhte CO₂-Konzentrationen einerseits zu geringeren Rohproteingehalten und erhöhten Raufasergehalten und damit einer geringeren Milch- oder Fleischproduktion führen können, verbessert der gleichzeitig auftretende höhere Gehalt an nicht-strukturbildenden Kohlenhydraten die Verdaulichkeit des Raufutters (Allard *et al.*, 2003; Steffen und Canadell, 2005).

Nach Bindi und Howden (2004) sollten sich diese beiden Faktoren in etwa die Waage halten. Da in gemäßigten Breiten der Proteingehalt des Grünlandfutters im allgemeinen ohnehin höher ist, als vom Vieh auf Grund zu geringer metabolisierbarer Energie ausgenutzt werden kann, bewirken höhere CO₂-Konzentrationen somit eher eine Zunahme der verfügbaren Energie (Rötter und van de Geijn, 1999), eine verbesserte Stickstoffverwertung durch die Wiederkäuer und damit eine bessere Produktivität. Die Futterqualität ist auch unter Klimaschutzaspekten bedeutsam, weil bei geringerer Verdaulichkeit u.a. auch die CH₄-Produktion von Wiederkäuern erhöht ist (OcCC, 2002; siehe dazu auch Kapitel 3.5.2).

Da neben dem Raufutteranteil in der Viehhaltung auch ein hoher Anteil an in- und externen Futtermitteln eingesetzt wird, spielen für die Wirtschaftlichkeit weiterhin Aspekte der Veränderungen von (Weltmarkt-) Futterpreisen eine wichtige Rolle (NFU, 2005). Außerdem könnte die Ausdehnung des Maisanbaus durch die Klimaerwärmung Futtermittelimporte z.B. von Soja substituieren. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Expansion des Biomasseanbaus für die Energiegewinnung, der

u.a. mit Futtergetreide zunehmend um Flächen konkurriert und die Preise für landwirtschaftliche Produkte beeinflusst, d.h. in der Regel verteuern wird (Schmidhuber, 2006). Der Verknappung traditioneller Futtermittel steht andererseits auch ein wachsendes Angebot neuer Futtermittel durch Nebenerzeugnisse aus der Bioenergiegewinnung, wie z.B. Rapsschrot (Cardy-Brown, 2007) und aus der Lebensmittelverarbeitung gegenüber, deren Futterqualität jedoch häufig noch bestimmt werden muss (s. dazu z.B. auch DLG Fachtagung „Neue Herausforderungen in der Nutztierfütterung“ vom 26.06.07).

Die Klimaveränderungen werden auch das Weidemanagement von extensivem Grünland beeinflussen (DEFRA, 2000): während die Vorverlegung des Vegetationsbeginns besonders in höheren Lagen einen früheren Weidegang im Frühjahr möglich macht, könnten zunehmende Herbst- und Winterniederschläge die Weidehaltung einschränken, da sonst bei zu nassen Böden die Verdichtungsgefahr wächst. Die ansteigende Sommertrockenheit wird nicht nur das Vieh im Falle einer Austrocknung der Wasserstellen⁹⁰ betreffen; auch Grünlandpflanzen sind im Allgemeinen schlecht an längere Trockenphasen angepasst. Eine potentielle Gefahr geht von der Invasion Wärme liebender Unkräuter aus, die in Zukunft bessere Wachstumsbedingungen vorfinden könnten (NFU, 2005).

⁹⁰ Diese sind bei entsprechender Wärme auch zunehmend von Kontamination betroffen (s. 1.4.3.4.1).

4.4.2 Tierhaltung

Bei den Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Tierhaltung sind vor allem Auswirkungen erhöhter Temperaturen und zunehmender Extremtemperaturen relevant. Veränderungen im Niederschlagsverhalten sind durch überwiegende Stallhaltung von geringerer Bedeutung, können sich im Fall von Extremniederschlägen aber auch negativ auf Weidehaltung bzw. Gebäude auswirken. Darüber hinaus führt erhöhte UV-B-Belastung insbesondere bei nicht-pigmentierten Tieren zu einer erhöhten Hautkrebsgefahr (Fischer und Gescheke, 2000).

Auswirkungen von Temperaturerhöhungen auf die Tierproduktion

Besonders empfindlich reagiert Geflügel auf Hitzestress, da es über die geringste körpereigene Thermoregulation⁹¹ verfügt (Rath *et al.*, 1994; DEFRA, 2000). Da Geflügelzucht, ebenso wie Schweinezucht, in der Regel in intensiver Stallhaltung betrieben wird, sind allerdings bereits heute entsprechende Kühlsysteme notwendig, da sonst selbst mäßige Außentemperaturen zu hohen Innentemperaturen führen. Rinder können zwar schwitzen, haben aber in Abhängigkeit von Rasse und Leistung⁹² einen relativ niedrigen Temperatur-Optimumbereich, der außerdem negativ mit der relativen Luftfeuchtigkeit⁹³ korre-

liert ist: bei Hochleistungsrindern beginnt z.B. bereits bei 21°C Lufttemperatur ein Anstieg der Körpertemperatur. Als obere kritische Temperatur für Milchkühe gelten je nach Leistungshöhe, Umweltfaktoren und Rasse bereits 20-25°C (Sharma *et al.*, 1988) bzw. 24-27°C für die meisten Nutztierassen (Fuquay, 1981). Ab 30°C ist kein Wärmeausgleich über die Hautevaporation mehr möglich und die Körpertemperatur steigt bei nicht hitze-adaptierten Tieren zwangsläufig an (Rath *et al.*, 1994).

Weitere wichtige Faktoren für die Reaktion auf Wärmebelastung sind das Alter und Gewicht der Tiere, (Muskel-)Aktivität, Zusammensetzung des Futters, Trächtigkeitsstatus und vor allem der Anpassungsgrad der Tiere, da zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass wiederholter Hitzestress besser verkraftet wird (z.B. Renaudeau, 2005). Milchkühe gelangen auch bei einer ausreichend langen Adaptionsphase wieder auf ihr Leistungsniveau. Neben der Dauer ist ebenso die Höhe der Einwirkung eine wichtige Einflussgröße; ferner Luftbewegung, Stallbelegung und Stallinfrastruktur, wie Ventilation oder Beschaffenheit des Bodens. Auch (nächtliche) kühlere Erholungsphasen während heißer Tage können den Rückgang der Milchleistung reduzieren (Igono *et al.*, 1992). Einen eindrucksvollen Beweis für die außerordentlichen Adaptionsfähigkeiten von Nutztieren liefern Holstein-Frisian Kühe⁹⁴ in den USA (Kalifornien und anderen heißen Bundesstaaten) und Israel, die unter ex-

⁹¹ Verdunstungskühle kann bei Geflügel nur über Wärmehecheln erzeugt werden.

⁹² So liegen die Ursachen für die zunehmende Bedeutung von Hitzestress nicht primär an der Erwärmung, sondern vielmehr an der seit zwei Jahrzehnten nahezu verdoppelten Milchleistung der Kühe.

⁹³ Der für die Milchproduktion kritische Temperatur-Feuchte-Index (THI, *Temperature-Humidity Index*) von 72 wird bei hoher Luftfeuchte bereits bei Tempe-

raturen über 20°C erreicht; diese sind auch für mitteleuropäische Verhältnisse nicht ungewöhnlich.

⁹⁴ Holstein Frisian sind den unter mitteleuropäischen Klimabedingungen gehaltenen Milchviehassen genetisch sehr ähnlich.

tremen Wärmebedingungen Milchleistungen erbringen, die den deutschen Durchschnitt zum Teil deutlich übertreffen (Rath *et al.*, 1994, Hellebrand, mündliche Mitteilung).

Zur Thermoregulation suchen Rinder bei Weidehaltung – wie z.B. an Galloways beobachtet – deshalb an heißen Tagen gerne Schattenplätze auf, die demzufolge stärker beweidet werden und auch eine höhere Konzentration an Exkrementen aufweisen (Fischer, 2001). Dasselbe Verhalten wurde bei Merinoschafen beobachtet, die ebenso bereits in den frühen Morgenstunden die Nahrungsaufnahme unterbrechen und erst in den kühleren Abendstunden wieder aufnehmen. Damit wird die Wärmeproduktion sowohl durch eine verringerte Futtermittelaufnahme als auch durch eine reduzierte Muskelaktivität gesenkt. Daraus lässt sich ableiten, dass Rinder und Schafe zwar kälte- aber weniger hitzetolerant sind. Schafe vertragen auf Grund ihrer sowohl Wärme als auch Kälte isolierenden Wollschicht sowie ihres günstigeren Verhältnisses von Oberfläche zu Körpermasse hohe Lufttemperaturen wesentlich besser als Rinder.

Dabei reduzieren nicht nur steigende Temperaturen sondern auch eine lange Sonnenscheindauer sowie hohe Strahlungsintensitäten (Sharma *et al.*, 1988) die Futtermittelaufnahme beim Rind (Fischer *et al.*, 2005). Bereits bei Temperaturen über 24°C tritt eine leichte, ab 30°C eine drastische Verringerung auf. Darüber hinaus ist der Stoffwechsel von Rindern durch hohe Umgebungstemperaturen belastet, was z.B. bei Milchkühen zu einem verstärkten Auftreten von Ketosen führen kann. In

erster Linie ist der Energie- und Proteinstoffwechsel betroffen, wodurch sich der Nährstoffaufwand pro kg Lebendmassezunahme erhöht. Legel (1989) zeigte z.B. dass Rinder bei schattenloser Haltung 17% mehr Nährstoffe pro kg Gewichtszunahme benötigen. Auch der Wasser- und Mineralstoffhaushalt ist in Mitleidenschaft gezogen, was einen höheren Bedarf an Tränkwasser und Salzen, insbesondere an Na, K, Ca, Mg und Cl, notwendig macht (Fischer *et al.*, 2005). In Abhängigkeit vom Futter und Produktionsleistung verdreifacht sich bei Rindern der Wasserbedarf bei einem Temperaturanstieg von 15 auf 38°C (Rath *et al.*, 1994). Dabei kühlt kaltes Wasser die Körpertemperatur und wirkt sich positiv auf die Futtermittelaufnahme (Fuquay, 1981) und vermutlich auch die Milchproduktion (Savoini und Moretti, 2006) aus. Als positiver Effekt hoher Umgebungstemperaturen ist die bessere Verdaulichkeit von rohfaserreicherem Futter durch eine erhöhte Pansenmotilität und damit schnellere Passage zu nennen (Rath *et al.*, 1994). Bei Wahlmöglichkeit ist allerdings eine Verschiebung der Futtermittelaufnahmepräferenz hin zu Konzentrataufnahme feststellbar (Klein und Weniger, 1984).

Unmittelbare Folgen der Wärmebelastung⁹⁵ für die Veredelungswirtschaft sind bei Masttieren eine geringere Lebendmassezunahme und bei Milchkühen eine ver-

⁹⁵ Laut Sächsischer Landesanstalt für Landwirtschaft ist für die Tagesleistung einer Milchkuh von über 50 kg Milch ein Input von ca. 300 MJ umsetzbare Energie erforderlich; mehr als 2/5 dieser Energiemenge wird während des Stoffwechsels in Wärme umgewandelt, wodurch in Sommermonaten ein akutes Wärmeentsorgungsproblem entsteht. Bei einer täglichen Milchleistung von nur 10 kg beträgt die Wärmebildung dagegen nur ca. 90 MJ (Gädeken, 1993, zitiert in Rath *et al.*, 1994)

minderte Milchleistung sowie -qualität (Rath *et al.*, 1994; Savoini und Moretti, 2006). Auch bei Schafen, Ziegen und Wasserbüffeln nimmt die Milchleistung mit zunehmendem Hitze- und Strahlungstress deutlich ab (verschiedene in Fischer *et al.* (2005) zitierte Arbeiten). Tritt der Hitzestress zu Beginn der Laktationszeit auf, so ist der Rückgang besonders ausgeprägt. Hinsichtlich der Veränderung der Zusammensetzung der Milch, in erster Linie des Fettgehaltes, gibt es widersprüchliche Befunde (Fischer *et al.*, 2005). Savoini und Moretti (2006) berichten z.B. von möglicher Weise reduzierten Fett- und Proteingehalten und Barash *et al.* (2001) fanden eine Proteinreduktion von ca. 0,01 kg pro °C unter Hitzestressbedingungen. Darüber hinaus sind die Gehalte an Laktose und titrierbaren Säuren erniedrigt, der pH-Wert dagegen erhöht (Fischer *et al.*, 2005). Des Weiteren ist der Gehalt an Kalzium, Phosphor und Magnesium reduziert, was Konsequenzen für die menschliche Ernährung – insbesondere von Kleinkindern – hat. Über den Einfluss von Hitzestress auf die einzelnen Proteinfractionen ist bisher wenig bekannt. Für die Käseproduktion sind allerdings durch veränderte Herstellungseigenschaften, Qualität und Rohstoffverfügbarkeit gravierende Auswirkungen zu erwarten.

Bei steigenden Temperaturen ist ferner für die Milchhygiene mit Konsequenzen zu rechnen. Laut DEFRA (2000) gibt es einen direkten Zusammenhang zwischen der Temperatur, der Kontamination von Vieh und dem Auftreten von Lebensmittelvergiftungen beim Menschen. Das unterstreicht die Notwendigkeit, die gesamte Produktionskette – von „farm to fork“ zu

betrachten (Savoini und Moretti, 2006). Häufigere Stromausfälle in Folge zunehmender Extremereignisse wie Unwetter, können sich dabei generell negativ auf die Kühlsysteme auswirken.

Schweine reagieren ebenfalls auf Hitze mit einer Reduktion der Futterraufnahme und Verschlechterung der Futtermittelverwertung (Rath *et al.*, 1994). Weitere Stresssymptome sind eine deutlich gesteigerte Atem- sowie Herzschlagfrequenz und erhöhter Blutdruck (Patience *et al.*, 2005). Neben einer geringeren Lebendmassezunahme verschiebt sich die Zusammensetzung der Körpermasse hin zu weniger Fett. Auch der Wasserbedarf erhöht sich in einem ähnlichen Umfang wie derjenige von Rindern. Schafe haben dagegen einen geringeren Wasserbedarf. Allerdings ist der Wärmeanspruch von Schweinen, die nur über eine geringe Anzahl an Schweißdrüsen und damit geringe Möglichkeiten der Thermoregulation verfügen, stark altersabhängig: während Jungtiere sehr wärmebedürftig sind, sind ältere Tiere mit zunehmender Wärme isolierender Fettschicht sehr empfindlich gegenüber Hitzestress. Während kurzfristig Temperaturen auch von 40°C überstanden werden, können andauernde Temperaturen über 35°C dagegen zum Tod durch Überhitzung führen (Rath *et al.*, 1994).

Auswirkungen von Hitzestress auf das Reproduktionsverhalten von Nutztieren

Bei allen Nutztieren ist die reproduktive Leistungsfähigkeit durch Hitzebelastung eingeschränkt (Rath *et al.*, 1994). Dabei verringert sich bei männlichen Tieren in erster Linie die Spermaqualität, bei weib-

lichen Tieren sowohl die Fruchtbarkeit als auch die Brunstzeit. Bei Kühen mit hoher Milchleistung führen Hitzestress, geringerer Appetit und geringerer Verzehr von Trockenmasse insbesondere bei Befruchtung während der heißen Jahreszeit zu einer reduzierten Konzeptionsrate, einem höheren Prozentsatz an Abgängen und damit längeren Zeitabständen zwischen Konzeption und Kalben (Jaskowski *et al.*, 2005). Bei Temperaturen über 33°C sinkt die Konzeptionsrate auf wenige Prozent, bei Temperaturen über 35°C gar auf Null (Cavestany *et al.*, 1985). Auch die Entwicklung des Embryos ist durch das bei vermindertem Blutfluss verringerte Nährstoff- sowie Sauerstoff- und Wasserangebot reduziert. Das Wachstum von Färsen ist unter Hitzestress reduziert und selbst als adulte Tiere bleiben sie weniger entwickelt, insbesondere hinsichtlich ihrer Milch- und reproduktiven Leistung (Lacetera *et al.*, 1994 und Tardone *et al.*, 1993, jeweils zitiert in Fischer *et al.*, 2005).

Auch bei Schweinen führen Umgebungstemperaturen über 32°C zu einer herabgesetzten Konzeptionsrate sowie Größe und Lebensfähigkeit der Embryonen (Edwards *et al.*, 1968). Die Embryonal-Fetalentwicklung beim Schaf scheint etwas weniger hitzesensitiv zu verlaufen (Rath *et al.*, 1994). Allerdings lässt ein reduzierter Energie- und Eiweißgehalt des Weidefutters bei den Muttertieren die Reproduktionsleistung sinken, wobei Rassen mit niedriger Lebendmasse durch den geringeren Erhaltungsbedarf begünstigt sind (Hasselmann *et al.*, 2003). Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Sommerzeit bei den meisten Nutztieren nicht die Hauptsaison für die Zucht ist. Auswirkun-

gen von Hitzestress auf spätere Trächtigkeitsstadien könnten sich unter Umständen jedoch als gravierender erweisen (Fuquay, 1981).

Auswirkung von (Hitze-) Stress auf die Tiergesundheit

Auch das Immunsystem wird durch Hitzestress belastet, wodurch die Tiere besonders anfällig gegenüber Krankheiten sind, zumal sich Krankheitserreger und Vektoren bzw. Parasiten unter warmen und insbesondere feuchten Klimabedingungen besser vermehren (Ontario Forest Research Institute, 2003; s. auch Kapitel 2.3.2.). Bei Weidehaltung könnte unter erhöhter UV-B-Strahlung zusätzlich die Immunabwehr unterdrückt werden, wodurch die Anfälligkeit gegenüber Krankheiten weiter steigt. Auch bei Stallhaltung muss mit einer stärkeren Ausbreitung von Parasiten und Krankheitserregern bei wärmerer Witterung gerechnet werden (Doleschel, 2007). Dabei können Nutztiere durch die Klimaerwärmung vermehrt sowohl direkt als auch indirekt Krankheitserregern ausgesetzt sein, wie z.B. den bei höheren Temperaturen verstärkt auftretenden, von Pilzen verursachten Hautkrankheiten oder durch die Belastung von Futtermitteln mit Mykotoxinen, deren Produktion durch Pilze bei höheren Temperaturen und gleichzeitig hoher Luftfeuchte zunimmt.

Häufig fördern dabei heftige Regenfälle sowohl durch Schwächung der Tiere als auch durch Kontamination von Trinkwasser den Krankheitsausbruch. Eine Verseuchung des Trinkwassers kann bei warmen Temperaturen auch durch die Vermehrung

von Cyanobakterien erfolgen, deren Toxine besonders schädlich für Rinder sind. Hinzu kommt eine raschere Ausbreitung von Seuchen durch die zunehmende Globalisierung, wofür die Vogelgrippe und die Blauzungenkrankheit die jüngsten Beispiele sind (Savoini und Moretti, 2006). Es ist jedoch kaum möglich, die Folgen auf Grund der in wärmeren Klimazonen bekannten Infektionserkrankungen abzuschätzen, da dies identische Verhältnisse voraussetzen würde (Rath *et al.*, 1994). Generell dürften sich aquatische Systeme – und damit auch die Fischzucht in der Teichwirtschaft (Doleschel, 2007) – als besonders anfällig gegenüber Auswirkungen von Klimaveränderungen erweisen (Ontario Forest Research Institute, 2003).

Hitzestress lässt sich bei Milchkühen z.B. auch an einer Abnahme der Glycocorticoid-Werte bzw. einer Zunahme des Prolactins messen (Fischer *et al.*, 2005). Darüber hinaus hat Hitzestress bzw. Belastung mit hohen THI-Werten einen erhöhten Vitamin A-Bedarf zur Folge. Direkte Klima- bzw. Hitze- bedingte Krankheiten sind u.a. der Sonnenstich, der durch eine plötzliche übermäßige Erhitzung des Gehirns – z.B. durch starke Sonneneinstrahlung – hervorgerufen werden kann. Beim Hitzschlag ist durch etwas langsamere Hitzeeinwirkung das Wärmeregulationszentrum gestört, wobei letztendlich durch Kreislaufkollaps der Hitzetod eintreten kann. Hiervon sind vor allem ältere Tiere betroffen, so dass dies weniger die intensive Viehhaltung in Mitleidenschaft zieht (DEFRA, 2000). Dabei wird Hitzestau im Tier durch dichtes Fell, subkutane Fettpolster sowie fehlende Ventilation verstärkt. Durch Erhöhen der Atemfrequenz –

bei Rindern erhöht sich z.B. die Atemfrequenz zwischen 25 bis 35°C auf bis zu 120 Atemzüge pro Minute – wird ferner dem Körper verstärkt CO₂ entzogen, was eine Verschiebung im Säure-Basengleichgewicht des Blutes bewirkt und zur respiratorischen Alkalose führen kann (Rath *et al.*, 1994). Hühnern kann deshalb zur Abhilfe CO₂-angereichertes Tränkwasser angeboten werden (Okelo *et al.*, 2003)

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Auswirkungen von Hitzestress auf Nutztiere sind auch positive Auswirkungen einer leichten Temperaturerwärmung zu erwarten, da in der kalten Jahreszeit weniger Energie für die tiereigene Thermoregulation, wie z.B. Kältezittern, verbraucht wird. Damit steht mehr Energie für Wachstum und Nutzleistung zur Verfügung, die Überlebensrate – insbesondere bei Jungtieren – steigt und es fallen geringere Heizkosten an (Ontario Forest Research Institute, 2003; Rötter und van de Geijn, 1999). Dagegen könnte bei Extensivhaltung in Folge verstärkter Niederschläge im Winter die Gefahr von Lungenentzündung und Lahmen zunehmen. Darüber hinaus verringern Wetterextreme, wie z.B. starke Winde, die Nahrungsaufnahme durch Verweilen im Windschutz (NFU, 2005). Insgesamt fallen nach Hahn *et al.* (1992, zitiert in IPCC, 2001b) die positiven Auswirkungen einer Klimaerwärmung auf die Nutztierhaltung vermutlich geringer aus als die negativen.

Für Deutschland bekannte Auswirkungen

Am Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) in Müncheberg wurden

zahlreiche Studien zur Weidehaltung durchgeführt, die u.a. auch Aufschluss auf die Reaktion des Weideverhaltens auf Hitzestress geben (Fischer *et al.*, 2005). Wie bereits erwähnt, führte dabei Hitzestress in Abhängigkeit der Rasse zu einer differenzierten Reduktion der Weidezeit und damit u.U. der Nahrungsaufnahme. Außerdem verschlechterten die in Hitzeperioden reduzierten Energie- und Eiweißgehalte des Weidefutters in Abhängigkeit von der Lebendmasse der untersuchten Rasse die Reproduktionsleistung von Mutterschafen. Weitere im Rahmen des Hitzesommers 2003 (2006) aufgetretene Auswirkungen wurden bereits in Kapitel 3.4.1 dargestellt.

4.5 Auswirkungen von Klima- veränderungen auf betriebliche Bewirtschaftungsformen, wie Bodenbearbeitung und Dünge- und Pflanzenschutz- mitteleinsatz

Viele der unter 4.2 beschriebenen Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Boden haben auch Konsequenzen für die Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Flächen und werden Anpassungsmaßnahmen notwendig werden lassen (s. Kapitel 5).

Auswirkungen auf die Bodenbearbeitung

Veränderungen im Aufkommen von Ernterückständen, die bei erhöhter Biomasseproduktion vor allem in getreidereichen Fruchtfolgen zur Beeinträchtigung der Strohrotte und in der Folge zu Strohmatte führen können, müssen ebenso berücksichtigt werden wie veränderte Bewirt-

schafungsabläufe auf Grund der verlängerten Vegetationsperiode und unter Umständen veränderten Fruchtfolgen. Humuschwund (s. Kap. 4.2) kann die Bodenstruktur verändern und die Tragfähigkeit des Bodens verringern mit entsprechenden Folgen für die Bodenbearbeitung. Erhöhter Pilz- und Schädlingsbefall, wie z.B. im Falle des Maiszünslers (vgl. Kap. 4.3.2), wird – entgegen dem gegenwärtigen Trend – eine intensive Bodenbewirtschaftung notwendig machen (Wehling, 2004). Zunehmende Starkniederschläge führen zu einer erhöhten Gefahr durch Wassererosion und Verschlammung. Vor allem im Herbst und Winter kann durch stark veräasste Böden die Bodenbearbeitung eingeschränkt sein, was Qualitätsverluste beim Ernte- bzw. Pflanzgut und Terminkosten ansteigen lässt (Gerhard, 2007). Gleiches gilt für extrem verhärtete Böden in Folge langer Dürreperioden, die spezielle Bewirtschaftungstechniken oder Geräte erforderlich machen könnten bei gleichzeitiger Gefahr von zunehmender Bodenverdichtung (SAG, 2007).

Auswirkungen auf den Dünge- und Pflanzenschutzmitteleinsatz

Sowohl ausgeprägtere Trockenheit als auch häufiger auftretende Starkregenniederschläge können die Anwendung bzw. Effizienz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln problematischer werden lassen (vgl. Kap. 4.3.1). Darüber hinaus lässt die erwartete Erhöhung des Schädlings- und unter Umständen auch Unkrautdruckes einen höheren Pflanzenschutzmitteleinsatz wahrscheinlich werden (z.B. Doleschel, 2007), wobei sich der jeweilige

Bedarf an den verschiedenen Pestiziden (Herbizide, Insektizide, Fungizide, etc.) verändern könnte. Neben der Umwelt belastet dies die Rentabilität der landwirtschaftlichen Betriebe. So wird in den USA z.B. bei steigenden Niederschlägen mit höheren Pestizidanwendungen bei Weizen, Mais und Kartoffel gerechnet (Chen und McCarl, 2001). Höhere Temperaturen lassen dagegen bei Weizen den Pestizideinsatz und die Kosten sinken, für alle anderen betrachteten Kulturen steigen. Zusätzlich zieht die zunehmende Klimavariabilität eine größere Schwankungsbreite bei der Applikation und den Kosten von Pflanzenschutzmitteln nach sich. Besonders problematisch könnte der zunehmende Schädlingsdruck auf Grund limitierter Bekämpfungsmöglichkeiten für den Ökolandbau werden (mündliche Mitteilung Wechsung, 2007).

4.6 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Agrarproduktion in Deutschland

Auf Grund des globalen Anbaus der wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturen lassen sich – unter entsprechender Berücksichtigung existierender Unterschiede zwischen einzelnen Standortfaktoren und Betriebsmanagement – mögliche Auswirkungen der Klimaveränderung und insbesondere der Erwärmung bereits durch den Vergleich mit anderen Anbauregionen prognostizieren. So liegen z.B. die Weizenenerträge in den heißeren Anbauregionen Australiens oder Indiens weitgehend unter dem europäischen Durchschnitt. In Europa zeichnen sich die nördlicheren, kühleren

Länder durch höhere Hektarerträge aus. Selbst in Deutschland gibt es – insbesondere unter extremen Klimabedingungen – ein Nord/Süd- bzw. West/Ost-Gefälle der Getreideerträge wie unter 3.3.1 bzw. 3.3.5 beschrieben.

Als Grundlage für eine Folgenabschätzung des Klimawandels für die Agrarproduktion existieren darüber hinaus auf nationaler wie internationaler Ebene Ergebnisse aus zahlreichen Labor- und Feldversuche zu möglichen Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt, den Boden sowie auf verschiedene pflanzen- bzw. tierphysiologische Prozesse einschließlich der Temperaturempfindlichkeit verschiedener Entwicklungsstadien bzw. metabolischer Prozesse (Ainsworth und Long, 2005; Kimball *et al.*, 2002; Rosenzweig und Hillel, 1998a; FAO, 1996; Kenny *et al.*, 1993). Diese Ergebnisse fließen – ebenso wie die neuesten Entwicklungen der Klimasimulation - in kontinuierlich weiterentwickelte Ertrags- und Ökosystemmodelle ein (z.B. Crafts-Brandner und Salvucci, 2004; Gerstengarbe *et al.*, 2003; Schröter *et al.*, 2004; IPCC 2001b; Harrison *et al.*, 1995). Aus diesen Modellen werden wiederum – entsprechend Abbildung 14 – weitere Modelle auf höheren Aggregationsebenen erstellt, die von Sektor- und Regionalmodellen bis hin zur globalen Agrarproduktion reichen.

Inputgrößen für Ertragsmodelle und ihre Beeinflussung durch den Klimawandel

Die simultane Untersuchung mehrerer, für die landwirtschaftliche Produktion entscheidender Faktoren sprengt im Allgemeinen den Rahmen von Experimenten.

Darum wird mit Hilfe von Modellen versucht, die komplexen Auswirkungen der Klimaveränderung auf Pflanzenwachstums- bzw. Produktionsprozesse bis hin zu ganzen Ökosystem- und Landnutzungsänderungen abzubilden. Dabei muss selbst bei Betrachtung eines Teilsystems dieses auf Grund der Komplexität der verschiedenen Wechselwirkungen immer im Wirkungsgeflecht Boden-Vegetation-Atmosphäre-Landnutzung betrachtet werden (Mirschel und Wenkel, 1996). Ein Vorteil von einigen Modellen besteht darin, dass diese bei entsprechender Parametrisierung der Faktoren im Gegensatz zu Ergebnissen aus Feldversuchen von den spezifischen Untersuchungsbedingungen unabhängig sind.

Da die Ergebnisse von Modellen immer nur so gut sein können, wie die im Modell verwandten Daten, ist es von entscheidender Bedeutung, möglichst alle Prozesse sowie die Veränderungen durch den Klimawandel so genau wie möglich zu erfassen (Ritchie und Alagarwamy, 2005). Dabei handelt es sich um einen iterativen Prozess, in dessen Verlauf die jeweils neueren Modelle schrittweise die komplexe Umwelt besser abbilden können. Da auch die Klimamodelle einer permanenten Weiterentwicklung unterliegen, ist es erforderlich, dass die neuesten Ertragsmodelle jeweils mit Daten der letzten Generation von Klimamodellen arbeiten. Ein weiteres Problem stellen die verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen dar (The Royal Society, 2005): während Klimamodelle bis in jüngste Zeit vor allem im globalen Maßstab und grober zeitlicher Skala arbeiteten, sind Ertrags- bzw. Ökosystemmodelle auf Grund der kleinräumigen

Einflüsse von Produktionsfaktoren wie Boden, Niederschlag und Betriebsführung häufig für regionale bzw. sogar lokale Betrachtungen interessant. Hinzu kommen sozioökonomische und technologische Änderungen im Betriebsmanagement, die zu berücksichtigen sind, die aber fortlaufend stattfinden und deshalb nur schwer für mehr als wenige, maximal 20 Jahre vorhersehbar sind (z.B. Isermeyer, 2004; Baker *et al.*, 1993; Parry *et al.*, 2005).

Klassische biophysikalische Wachstumsmodelle werden seit über 30 Jahren entwickelt und simulieren bei entsprechender Eingabe von Boden- (Textur, Struktur, Wassergehalt, Leitfähigkeit, etc.), Pflanzenwachstums- (Sortencharakteristika, wie z.B. bez. Ontogenese, Biomassebildung, Photoperiodizität, etc.), Wetter- (Strahlung, Niederschlag, Minimum- und Maximumtemperatur, jeweils täglich aufgelöst) und Bewirtschaftungskonditionen (Bodenbearbeitung, Düngeregime, Pflanzdichte, etc.) inzwischen recht zuverlässig das Pflanzenwachstum, die phänologische Entwicklung und die Erträge (Ritchie und Alagarwamy, 2005). Dabei liegen für die Vergangenheit modellierte Erträge allerdings häufig unter den tatsächlichen Ertragsdaten, was im Allgemeinen daran liegt, dass nur ungenügende Informationen zu den lokalen Anbaubedingungen vorliegen (Franzaring *et al.*, 2007).

Mittlerweile existiert eine Vielzahl von Modellen zur Simulation von Erträgen der wichtigsten Kulturpflanzen in verschiedenen Regionen der Erde, wie z.B. die CERES-Modelle für Getreide (z.B. in: Rao, 2002; Southworth *et al.*, 2002; Harrison *et al.*, 1995) oder die sog. AGROSIM-

Familie (Mirschel und Wenkel, 1996). Weltweit betrachtet ist Weizen eine der wichtigsten Anbaukulturen für die menschliche und tierische Ernährung, was die Vielzahl von globalen und regionalen Studien zu dieser Kultur erklärt (Lawlor und Mitchell, 2000). Dabei finden die Ertragsprognosen meist unter Berücksichtigung der (mittleren) Klimaveränderungen statt; die Zunahme der Klimavariabilität und von Extremereignissen und ihre besondere Bedeutung für die landwirtschaftliche Produktion bleiben dabei allerdings noch häufig unberücksichtigt. Das gleiche gilt für weitere Faktoren, wie z.B. die zunehmende Belastung durch O₃ und andere Schadstoffe sowie mögliche Interaktionen der verschiedenen Klimafaktoren. Kritisch ist ebenfalls, dass Auswirkungen der Klimaveränderungen auf Pflanzenkrankheiten

und Schädlinge in den meisten Modellen nicht berücksichtigt werden (Parry *et al.*, 2005; s. Kapitel 4.3).

Modelle, die Erträge im Zuge der Klimaveränderung simulieren, müssen Einflüsse der Klimaveränderung auf diese Inputgrößen möglichst „realitätsnah“ abschätzen. Damit sind regionale Ertragsprognosen auch erst mit der Entwicklung regionaler Klimamodelle mit einer relativ engen Bandbreite der projizierten Änderungen von Klimaparametern möglich geworden. Eine weitere Einengung der Unsicherheiten bezüglich der zu erwartenden Klimaveränderungen stellt die Verwendung von Szenarien dar, von denen möglichst jeweils mehrere für eine spezifische Fragestellung zu Grunde gelegt werden sollten (s. Kapitel 2.2.2).

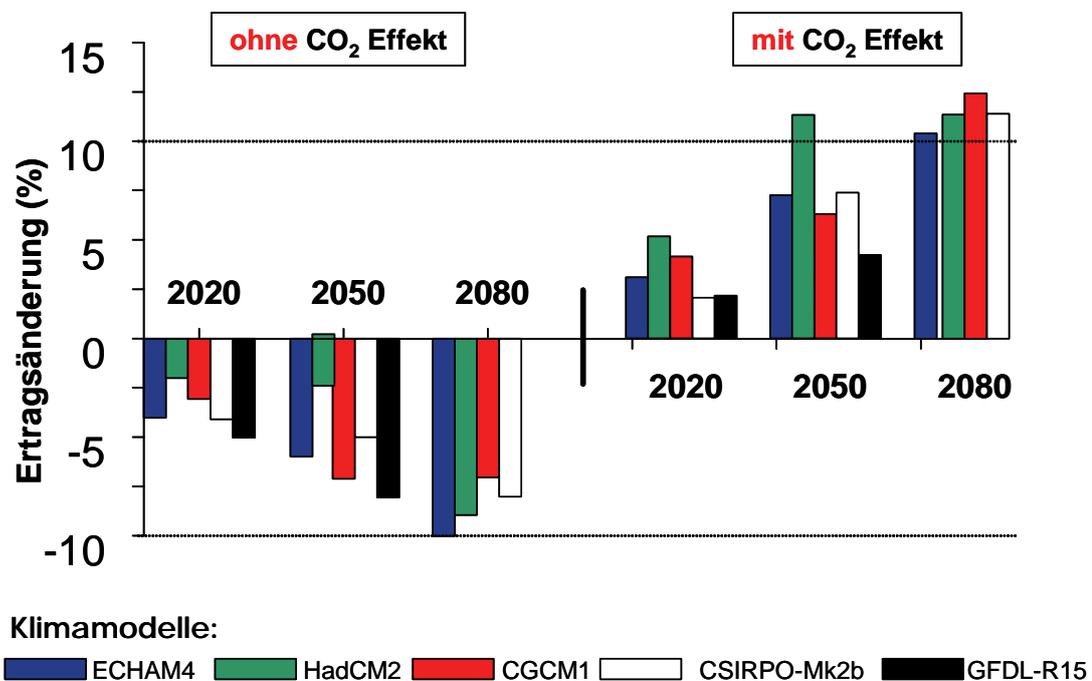


Abbildung 20: Modellgestützte Ertragsprognosen für Weizen in Österreich für 2020-2080 ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes. Einzelne Säulen beziehen sich auf verschiedene globale Zirkulationsmodelle (n. Alexandrov *et al.* 2002).

Da die meisten Wachstums- und Entwicklungsprozesse über die Temperatur bzw. Temperatursummen gesteuert werden, wird die Auswirkung eines wärmeren Klimas auf die Pflanzenentwicklung in Modellen über die Veränderung der entsprechenden Parameter simuliert. Demzufolge wird z.B. der frühere Vegetationsbeginn, wärmere Durchschnittstemperaturen und die längere Vegetationsperiode bei mehrjährigen bzw. *nicht determinierten* Pflanzen mit einer langen Entwicklungsphase (z.B. Grünlandarten, Zuckerrübe) bei ausreichender Wasserversorgung zu einer höheren Ertragssicherheit, vermehrtem Wachstum und voraussichtlich auch höherem Ertrag führen. Dagegen sagen diese Modelle voraus, dass bei *determinierten* Pflanzenarten – wie den meisten in Deutschland angebauten Getreidesorten – durch das schnellere Erreichen notwendiger Temperatursummen Entwicklungsprozesse rascher durchlaufen werden, was sich insbesondere durch die Verkürzung der Kornfüllungsperiode häufig als negativ erweisen dürfte.

Allerdings bestehen auch in Bezug auf die Modellierung der Temperatureuswirkung noch Unsicherheiten. Generell betrifft dies die Schwierigkeit, Einzelergebnisse aus Labor- und Feldversuchen auf die Wirklichkeit zu übertragen; Unsicherheiten bestehen weiterhin z.B. in der nichtlinearen Reaktion von Erträgen auf einen Temperaturanstieg, in der das Überschreiten von Grenzwerten während empfindlicher Entwicklungsphasen eine große Rolle spielt und in der noch weitgehend ungeklärten Interaktionen zwischen Temperatur und Stickstoffgehalt auf die Atmung (Cassman, 2007). Noch größeren Unsicherhei-

ten unterliegt die Detailmodellierung des Einflusses der Veränderung des Wasserhaushaltes bzw. von Niederschlägen, da diese meist sehr regional erfolgt und auch von den regionalen Klimamodellen bisher nur innerhalb einer relativ großen Schwankungsbreite prognostiziert werden kann.

Für die Frage, ob die Klimaerwärmung zu Ertragsverlusten oder -gewinnen in der Landwirtschaft führen wird, wird es von entscheidender Bedeutung sein, neben den Auswirkungen der Temperatur- und Niederschlagsänderungen auch diejenigen des CO₂-Anstiegs in der Atmosphäre auf den Ertrag der verschiedenen Kulturpflanzen experimentell zu bestimmen und in den Modellen entsprechend zu berücksichtigen (s. Abbildung 20). Einen wesentlichen Beitrag leisten hierbei z.B. Freilanduntersuchungen wie die so genannten *Free Air Carbon dioxide Enrichment* - FACE-Experimente (s. Kapitel 4.1.2), deren Ergebnisse oft andere „CO₂-Düngeeffekte“ prognostizieren als unter Laborbedingungen. Für deutsche Verhältnisse liegen aussagekräftige FACE-Ergebnisse bisher nur zu einer begrenzten Anzahl an landwirtschaftlichen Kulturen vor. Um die Auswirkungen der Veränderungen verschiedener Klimafaktoren auf die Pflanzenproduktion unter realistischeren Bedingungen experimentell erfassen zu können, ist eine „neue Generation“ von CO₂-Anreicherungsexperimenten im Freiland geplant, die auch die gleichzeitige Temperaturerhöhung berücksichtigen (sogenannte „Hot-FACEs“; Hendrey und Miglietta, 2006).

4.6.1 Regionale Auswirkungen der Klimaveränderung

Wie bereits heute zu erkennen ist, wird sich der Klimawandel regional sehr unterschiedlich auf die Landwirtschaft in Deutschland auswirken. Dies liegt daran, dass die *Vulnerabilität* der Landwirtschaft gegenüber dem Klimawandel unterschiedlich ausgeprägt ist. Zum einen wird sich das Klima unterschiedlich stark in den verschiedenen Regionen verändern. Zum anderen hängt dies von der jeweiligen regionalen naturräumlichen (s. Kap. 3.2) als auch sozioökonomischen Ausgangssituation einschließlich der regionalen Anbausituation (Kap. 3.3) sowie von der *Anpassungs-* oder auch *Adaptionskapazität* ab. Diese Adaptionskapazität eines Systems wiederum hängt insbesondere von dem Vorhandensein von – in erster Linie ökonomischen – Ressourcen ab. Weitere wichtige Faktoren sind der Stand der jeweiligen Technologie, die Qualifikation der Akteure, die Verfügbarkeit von bzw. der Zugang zu Wissen und Information, eine gewisse Infrastruktur sowie Institutionen, die Anpassungsmaßnahmen fördern (IPCC, 2007b).

So konnte z.B. in einer Studie in Großbritannien (ADAS, 2005, zitiert in NFU, 2005) belegt werden, dass besser informierte Landwirte eher Anpassungen planen als weniger gut informierte. Als Indikatoren für die adaptive Kapazität von landwirtschaftlichen Betrieben können ferner betriebswirtschaftliche Kenngrößen wie Inputintensität, ökonomische Größe und der Anteil an Ackerland herangezogen werden. Auf Grund dieser Bedingungen ist z.B. innerhalb Europas sowie generell in

den mittleren Breitengraden (COM/AGR/CA/ENV/EPOC(2002)98) überwiegend mit einer guten Anpassungsfähigkeit der Landwirtschaft an Klimaveränderungen zu rechnen und damit mit einer deutlichen Reduktion schädlicher Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktion und Ökonomie. Anders stellt sich die Situation in den Entwicklungsländern dar, wo die Produktionsbedingungen häufig schon heute durch hochgradig variable bzw. extreme Temperaturen und unsichere Niederschläge beeinträchtigt sind und mangelnde Ressourcen und ungenügende Infrastrukturen Adaptionsmaßnahmen erschweren (Fischer *et al.*, 2005; Parry *et al.*, 2005; Mendelsohn, 2000).

Im zahlreichen Modellen wird weltweit versucht abzuschätzen, wie sich die Klimaveränderungen mit und ohne Anpassungsmaßnahmen auf die Landwirtschaft auswirken (z.B. mit dem Century-Crop-Ecosystem-Modell, u.a. in Antle *et al.*, 2004). Ein Szenarium ohne Anpassungsmaßnahmen (Zebisch *et al.*, 2005) geht z.B. von dem so genannten „*dumb farmer* (*dummen Landwirt*)“ aus und vergleicht dies mit einem Szenarium, in dem der „*clairvoyant farmer* (*weitsichtige Landwirt*)“ (z.B. Schneider *et al.*, 2000; Reilly und Schimmelpfennig, 2000) entsprechende Maßnahmen einsetzt. Einzelheiten dazu können im vorliegenden Rahmen nicht weiter beleuchtet werden (vgl. z.B. McCown, 2005).

4.6.1.1 Regionale Klimastudien

Das Jahr 2003 ließ erahnen, wie sich zukünftig zunehmende extreme Klimate-

reignise auf die Landwirtschaft auswirken könnten. Während z.B. Betriebe in Norddeutschland teilweise ungewöhnlich hohe Ernten einführen, waren v.a. Regionen mit ungünstigen standortlichen Voraussetzungen von Ertragsausfällen betroffen. Diese Ungunstregionen zeichnen sich neben armen Böden mit einer geringen Wasserspeicherkapazität (z.B. grundwasserferne Sandböden) durch eine negative klimatische Wasserbilanz und bzw. oder ohnehin schon hohe Sommertemperaturen aus, die die landwirtschaftliche Produktion anfällig gegenüber Klimaextremen machen (s. Kap. 3.2). Demnach könnten vor allem bisher eher wärmelimitierte Regionen in Norddeutschland, den Mittelgebirgslagen sowie dem Alpenraum von der Klimaerwärmung zunächst profitieren, solange die Erwärmung das Temperaturoptimum vieler Kulturpflanzen nicht überschreitet. Das gleiche gilt auch für tendenziell zu feuchte und zu nasse Standorte (Zebisch *et al.*, 2005).

Kritisch wird die Situation dagegen in Regionen, die bereits heute unter Wassermangel leiden, wie v.a. der Nordosten und Teile des Südwesten Deutschlands. Hier könnten in Zukunft zunehmend Felder verdorren und der Nordosten könnte generell für den Weizenanbau zu trocken werden (Spiegel-online, 02.02.2007b). Besonders trockenstressgefährdet sind Brandenburg und Sachsen-Anhalt, wo schon zwischen 1996 und 2000 die Getreideproduktion zu 10 bzw. 25% durch Wassermangel limitiert war (Schindler *et al.*, 2007). In Zukunft könnten hier über 40% der landwirtschaftlichen Fläche (einschließlich Wurzelkulturen und Grünland) dürrefährdet sein und die Erträge in Abhängig-

keit von den Anbaubedingungen regional um ca. 5-15% abnehmen (Mirschel *et al.*, 2005). Anders sieht es im Westen Deutschlands aus: hier könnte der Übergang von Dauer- zu Starkregen die Bodenerosion erhöhen bzw. ganze Ernten könnten dadurch vernichtet werden. Auch wird hier rascher das Temperaturoptimum bisher angepasster Kulturen erreicht. Die prognostizierte Zunahme von „Tropenächten“ (Kreienkamp *et al.*, 2007; s. Kap. 2.3.2) könnte sich auch für die Tiergesundheit und insbesondere die intensive Tierhaltung als problematisch erweisen. Insgesamt wird die Ertragssicherheit in ganz Deutschland durch zunehmende Wetterextreme und wachsende Klimavariabilität abnehmen.

Die unterschiedliche regionale Vulnerabilität einzelner Bundesländer gegenüber Klimaveränderungen spiegelt sich in den bisher vorliegenden regionalen Klimastudien wieder: wie aus Tabelle 3 ersichtlich, liegen regionale Klimastudien unter Berücksichtigung des Sektors Landwirtschaft v.a. aus dem vergleichsweise wärmeren Süden und dem durch Trockenstress gefährdeten Nordosten Deutschlands vor. Allerdings wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch unterschiedliche Vorgehensweisen bzw. die Einbeziehung unterschiedlicher Datengrundlagen beeinträchtigt. Dies betrifft insbesondere das jeweils verwandte globale Zirkulationsmodell, das IPCC-Emissionsszenarium, die Downscaling-Methode und vor allem die Verwendung verschiedener Ertragsmodelle und die darin berücksichtigten Klimafaktoren (z.B. mit und ohne CO₂-Düngeeffekt). So wurde einigen Studien z.B. das relativ gemäßigste IPCC-B2-Szenarium zu Grunde

gelegt, das angesichts der aktuellen Dynamik der CO₂-Emissionen sehr optimistisch erscheint. Da die meisten regionalen Klimastudien einen Zeithorizont bis ca. 2050 betrachten, dürften sich die Unterschiede hinsichtlich der verwandten Szenarien jedoch noch nicht so gravierend auswirken (s. dazu Kapitel 2.2.2). Darüber hinaus bestehen auch Unterschiede hinsichtlich der Gewichtung des landwirtschaftlichen Sektors innerhalb der jeweiligen Studie sowie hinsichtlich der Intensität der Betrachtung, die von qualitativen Abschätzungen bis zu quantitativer Ertragsmodellierung reicht.

So lag z.B. der Schwerpunkt einer der ersten regionalen Klimastudien in Deutschland, der bayerischen Klimastudie „BayFORKLIM“ aus dem Jahr 1999, auf den Auswirkungen einer erhöhten UV-Belastung, die im Verdacht stand, zusammen mit weiteren Faktoren eine Blattverbräunung bei Gerste auszulösen. In der Folge wurde auch ein spezifisches UV-Projekt (BayFORUV) aufgelegt. Darüber hinaus wurde ein Klimaatlas von Bayern erstellt, der u.a. auf Grund der Veränderung der Pflanzenentwicklung und des Wasserhaushalts einen erhöhten Beregnungsbedarf in NW-Bayern prognostiziert. Dieser könnte für Winterweizen um bis zu 30% ansteigen und entsprechende Kosten⁹⁶ verursachen (Bayerischer Klimaforschungsverbund, 1999). Wesentlich dramatischer in ihren Auswirkungen ist eine jüngere Einschätzung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, nach der auf Bayern jährliche Ernteschäden von

durchschnittlich 500 Millionen Euro durch die Klimaerwärmung zukommen könnten, die durch temperaturbedingte Ertragsrückgänge sowohl bei Getreide als auch bei Hackfrüchten, extremwetterbedingte Ernteaufwände und einen Mehraufwand an Pflanzenschutzmitteln verursacht werden. Dazu sollen weitere 100 Millionen Verluste aus der Tierhaltung kommen, die allein auf Grund verminderter Tiergesundheit und Produktion durch erhöhten Krankheitsdruck entstehen (Doleschel, 2007).

Deutlich mehr Aspekte der landwirtschaftlichen Produktion untersuchte die badenwürttembergische Klimastudie „KLARA“ aus dem Jahr 2005. Neben einer Ertragsimulation für den Weizen- und Maisanbau an ausgewählten Standorten mit dem ökohydrologischen Modell SWIM – in dem keine Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes erfolgt – wurden hier auch die Auswirkungen des Klimawandels auf den Weinbau und die phytosanitäre Entwicklung im Obstanbau betrachtet (PIK, 2005). So soll z.B. in der Obstbauregion Bodensee mit steigenden Temperaturen und weitgehend gleich bleibender Höhe der Jahresniederschläge der Schaderregdruck steigen, wie am Beispiel des Apfelschorfes und des Apfelwicklers gezeigt werden konnte. Für den Weinbau ist mit unterschiedlichen Entwicklungen zu rechnen. Während in Württemberg überwiegend mit einer Verbesserung der Weinanbaubedingungen und dem Anbau höherwertigerer Rotweine zu rechnen ist, ist in der Weinregion Baden eine Geschmacksverarmung der klassischen Weißweine zu befürchten, der mit entsprechenden Maßnahmen entgegengesteuert werden müsste. Im Ackerbau ist beim Weizen auf Grund

⁹⁶ Allerdings überschätzt das darin verwandte ältere ECHAM3-Modell meist Winter-Niederschläge und Sommer-Trockenheit (Podzun *et al.*, 1995).

von Trockenstress und beschleunigter Pflanzenentwicklung mit Ertragsverlusten zu rechnen, die im Mittel 14% betragen. Ein Teil des Ertragsrückganges könnte unter Umständen jedoch durch eine höhere Backqualität auf Grund der verkürzten Kornfüllungszeit ausgeglichen werden (s. dazu auch Kap. 4.1.7). Dagegen dürfte sich der (Körner-) Maisanbau ausdehnen, der bei leichten Ertragsabnahmen im Rheintal vor allem im Süden und Nordosten zunehmend bessere Anbaubedingungen erfahren soll.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt die hessische Klimastudie „INKLIM 2012“ (HLUG, 2005), die für den landwirtschaftlichen Teil das Simulationsmodell „Day-cent“ verwandte, das ebenfalls nur Veränderungen der Temperatur und des Niederschlages, dagegen nicht des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre berücksichtigt (USF, 2005). Allerdings wurden hier mehrere landwirtschaftliche Kulturen betrachtet, die in Zukunft – bei relativ kleinräumiger Heterogenität der Erträge – überwiegend Ertragsverluste erwarten lassen. Im Einzelnen werden Ertragsverluste von ca. 10% für Winterweizen, 5% für Futtermais und Zuckerrübe und 14% für Winterraps im Vergleich zur heutigen Situation berechnet. Der Ertrag von Grünland nimmt dagegen zu (+10%) und der von Wintergerste bleibt in etwa auf dem gegenwärtigen Niveau. Darüber hinaus ist mit einer weitgehenden Abnahme der Ertragssicherheit zu rechnen. Im Weinanbau ist das geringere Spätfrostisiko positiv zu bewerten, kritisch dagegen die Veränderung der Sorten und des Weintyps durch die höhere Abbaurate der Äpfelsäure bei höheren Temperaturen sowie der vermehrte Schäd-

lingsdruck (Schultz *et al.*, 2005). Im Obstbau bietet die Erwärmung zum einen die Chance, neue bisher Wärme limitierte Arten und Sorten anzubauen. Zum anderen nehmen die Risiken und potentielle Schadereignisse durch Wetterextreme wie Hagel und Spätfrostereignisse zu. Die Studie gibt einen Überblick über die Kosten, die für den Schutz der Plantagen durch die Installation von Hagelnetzen etc. entstehen würden. Allerdings wurde der Pflanzenschutz in dieser Studie nicht weiter berücksichtigt (Jacob und Koch, 2005). Im Rahmen der sich in Planung befindlichen Projektphase „INKLIM 2012 Baustein II-plus“ sollen räumlich explizite Klimafolgenabschätzungen für die Landwirtschaft in Hessen erfolgen, der Zusatzwasserbedarf zur Sicherung der landwirtschaftlichen Produktion ermittelt werden und Anbauempfehlungen für die Landwirtschaft im hessischen Ried erstellt werden. Auch die Studien zum Wein- und Obstbau werden fortgeführt.

Die Frostgefahr im Obstbau wird besonders hoch in der sächsischen Klimastudie „Klimawandel in Sachsen“ – ebenfalls aus dem Jahr 2005 – eingeschätzt (SMUL, 2005): hier wird im Süßkirschanbau eine Versechsfachung der Gefahr von Spätfrost und bei Apfel eine Verdopplung der mittelschweren Fröste während der Blüte prognostiziert. Dagegen sollen sich die Anbaubedingungen bisher Wärme limitierter Kulturen, wie z.B. Körnermais und Wein verbessern. Allerdings sollen generell Trockenstress und Ertragsrisiko zunehmen, v.a. auf den ärmeren Sandböden, wohingegen die Lößstandorte weniger gefährdet sind. Darüber hinaus ist im Ackerbau mit einem veränderten Schädere-

gerspektrum zu rechnen, was die Notwendigkeit der Applikation von Fungiziden senken, von Insektiziden dagegen steigen lassen könnte.

In der Brandenburger Studie „PIK Report No. 83“ (Gerstengarbe *et al.*, 2003) wurden – ebenfalls mit dem Modell SWIM – Ertragsverluste für Winterweizen berechnet, die ohne Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes bis ca. zum Jahr 2050 ca. 17% betragen, die jedoch bei Berücksichtigung des CO₂-Effektes auf nur 10% Verlust sinken sollen. Für Mais und Gerste könnten die Erträge bei erhöhten CO₂-Konzentrationen sogar um 7 - 8% steigen. Allerdings werden neben einer Kostensteigerung durch die verstärkt notwendig werdende Bewässerung – die einen kompetitiven Nachteil für die Landwirte in Brandenburg darstellen könnte – auch mittelfristig Probleme durch die Grundwasserabsenkung gesehen. Außerdem werden stärkere Ernteschäden durch die Zunahme von Extremereignissen erwartet.

In der regional deutlich enger gefassten Studie für den Landkreis Märkisch-Oderland belaufen sich die vorhergesagten Ertragsverluste nach Modellberechnungen ohne Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes für die Hauptgetreidearten auf ca. 5% und auf bis zu 14% für Kartoffeln (Mirschel *et al.*, 2005). Unter Einbeziehen des CO₂-Effektes reduzieren sich die Ertragsverluste auf maximal 10% bzw. fallen für Getreide marginal aus oder wandeln sich gar in geringfügige Ertragssteigerungen um.

Etwas höher liegen wiederum die Ertragsverluste, die für das Elbeinzugsgebiet in dem Projekt „GLOWA-Elbe“ unter Zug-

rundelegen eines besonders trockenen Szenariums berechnet wurden: bei einer relativ hohen Schwankungsbreite der Ergebnisse und ohne Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes werden hier die Ertragsabnahmen für verschiedene Getreidearten auf 11-15%, für Raps geringfügig höher und für Mais mit im Mittel nur ca. -1% deutlich weniger (Hattermann *et al.*, 2005) geschätzt. Der Schwerpunkt dieser Studie liegt – ebenso wie derjenige der Studie zur Unterweserregion (s. Tabelle 3) – auf den Veränderungen des Wasserhaushaltes und ihren sozioökonomischen und ökologischen Auswirkungen.

In der im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellten Studie „Klimawandel in Deutschland“ (Zebisch *et al.*, 2005) wurden auf Grund mangelnder flächendeckender Szenarien keine eigenen Ertragsprognosen für den landwirtschaftlichen Sektor entwickelt. Im Einzelnen wird auf die Gefahr des Verlustes von Bodenkohlenstoff, der Zunahme und Ausbreitung von Krankheiten und Schädlingen und der Abnahme der pflanzlichen Qualität, die auch die Tierproduktion in Mitleidenschaft ziehen könnte, hingewiesen. Bei einer volkswirtschaftlichen Betrachtung der durch den Klimawandel verursachten Schäden könnten sich nach einer Studie des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW) die auf Grund von Trockenheit und Wasserknappheit prognostizierten Ernteeinbußen in der deutschen Land- und Forstwirtschaft in den nächsten 50 Jahren auf insgesamt drei Milliarden Euro belaufen (Kemfert, 2007). Am stärksten betroffen wären die Bundesländer mit den größten Anteilen an landwirtschaftlicher Fläche, Bayern und Nieder-

sachsen, sowie Baden-Württemberg mit rund der Hälfte der Schäden. Hinzu kommen weitere Kosten durch Schäden an Infrastruktur und Immobilien durch Extremereignisse wie Hochwasser und Überflutungen. Allerdings beziehen diese ökonomischen Betrachtungen noch keinerlei Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel ein, durch die sowohl die Auswirkungen als auch die Kosten des Klimawandels deutlich reduziert werden könnten (s. Kapitel 5). Weltweit prognostiziert Stern (2006⁹⁷) die volkswirtschaftlichen Schäden durch den Klimawandel auf 5-20% des globalen Bruttosozialproduktes.

4.6.2 Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die wichtigsten landwirtschaftlichen Produktionszweige in Deutschland

Bei einer maximalen mittleren Erwärmung um 2°C bis Ende des Jahrhunderts⁹⁸ sollte der parallel dazu stattfindende Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration durch die Stimulierung der Biomasseproduktion etwaige temperaturbedingte Ertragsausfälle kompensieren, sofern der Wasserbedarf der Kulturen gedeckt werden kann. Bei einem stärkeren Anstieg der THG-Emissionen und damit verbunden der durchschnittlichen Temperaturen könnten entsprechend der Prognosen regi-

onaler Klimamodelle in ganz Deutschland Temperaturerhöhungen von über 2,5°C und im Süden wohl auch deutlich darüber erreicht werden (UBA, 2006a, b; s. auch Kapitel 2.3.2). Dies wird einerseits eine (weitere) Nordwärtsverschiebung bzw. –ausdehnung der Anbaumöglichkeiten von (Sommer-) Getreide um ca. 100-150 km je °C bzw. eine Höherverschiebung des Rauhfutteranbaus in alpinen Gebieten um ca. 100 m je °C Temperaturerhöhung ermöglichen, wie sie schon heute z.B. am Körner- oder Silomaisanbau zu beobachten ist (s. Kap. 3.3.1). Auch der Anbau bisher überwiegend Wärme limitierter landwirtschaftlicher Kulturen, wie z.B. Sonnenblumen, C₄-Gräser (Hirse, Sudan-gras) oder auch Obstarten (wie u.U. Aprikosen) könnte erfolgreich werden.

Andererseits ist aber auch eine Reduktion der Erträge bisher angepasster Kulturen zu erwarten (s. Kapitel 4.1.1.1). Auf Trockenheit bzw. Wasserstress sollten landwirtschaftliche Kulturen mit flachen Wurzelsystemen, wie z.B. Kartoffeln oder verschiedene Gemüse- und Grünlandarten, am empfindlichsten reagieren. Insbesondere die bei stärkeren Klimaänderungen häufiger auftretenden Extremwetter, wie Starkregenereignisse und Dürreperioden, dürften alle landwirtschaftlichen Produktionszweige in ganz Deutschland in Mitleidenschaft ziehen und erhebliche Verluste für die Agrarwirtschaft bzw. die gesamte Volkswirtschaft verursachen, wie das Jahr 2003 gezeigt hat. Unsicherheiten für eine detaillierte Folgeabschätzung ergeben sich aus den noch weitgehend unbekanntem Interaktionen verschiedener Klimaelemente untereinander, wie sie z.B. aus einem

⁹⁷ Für die britische Regierung erstellter Klimabericht des ehemaligen Chefökonom der Weltbank.

⁹⁸ Es ist erklärtes Ziel der Europäischen Union, einen Anstieg um mehr als 2°C zu verhindern, was beachtliche Anstrengungen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen notwendig machen wird. Allerdings hätte selbst ein Anstieg um 2°C bereits gravierende Auswirkungen auf empfindliche Ökosysteme (IPCC, 2007b).

weiteren Anstieg von Schadgasen wie O₃ resultieren könnten.

Ackerbau

Für Mitte des 21ten Jahrhunderts wird in den unter Kapitel 4.5.1 angeführten regionalen Klimastudien ein Ertragsrückgang für die wirtschaftlich bedeutendste Ackerfrucht *Winterweizen* vorausgesagt, der zwischen 10% in Hessen und 17% in dem gegenüber Trockenstress wohl vulnerabelsten Bundesland Brandenburg (bzw. knapp 5% für die Beispielregion Märkisch-Oderland) liegen soll (s. Tabelle 11). Für diese Abschätzungen wurden eine Temperaturerhöhung von weniger als 1,5°C und regionale Niederschlagsveränderungen, d.h. in der Regel eine Abnahme der Sommerniederschläge, zugrunde gelegt. In Brandenburg reduziert sich der Ertragsrückgang bei Berücksichtigung eines CO₂-Düngeeffektes von ca. 60 ppm über dem heutigen Niveau auf 10% (bzw. steigt auf + 0,5% in der Beispielregion Märkisch-Oderland). Demzufolge könnte sich der temperatur- und niederschlagsbedingte Ertragsrückgang bei Winterweizen bis Mitte des Jahrhunderts bei Berücksich-

tigung des CO₂-Anstieges in der Atmosphäre in weiten Landesteilen bzw. im Bundesdurchschnitt bei wenigen Prozent bis hin zu leichten Ertragszuwächsen einpendeln. Sollte der CO₂-Düngeeffekt – v.a. auch bei Berücksichtigung des Wasserersparnis-effektes und in Abhängigkeit von der jeweiligen Sorte – höher ausfallen, ist generell auch ein leichter Ertragsanstieg möglich; bei deutlich ungenügender Wasserversorgung bzw. häufigerem Auftreten von Dürreperioden ist dagegen vermehrt mit erheblichen Ertragsausfällen zu rechnen.

Für die nationale Weizenproduktion ist allerdings neben dem prozentualen Rückgang der Ertragsleistung in den einzelnen Bundesländern deren relativer Anteil an der Gesamtproduktion Deutschlands ausschlaggebend (s. Tabelle 4): so würden höhere Ertragsverluste z.B. im Land Brandenburg mit nur 5% der nationalen Produktion wenig ins Gewicht fallen. In diesem Zusammenhang sollte erwähnt werden, dass im Agrarland Bayern seit einigen Jahren die Weizenenerträge nicht mehr im Umfang des Bundesmittels zunehmen (s. 3.3.1).

Tabelle 11: Ertragsänderungen ohne (und mit) Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes für Winterweizen nach Modellberechnungen für einzelne Bundesländer bzw. Naturräume in Deutschland.

Bundesland/Naturraum	Ertragsänderung [%]	IPCC-SRES-Szenarium	Zeithorizont
Baden Württemberg	-14	A1	2050
Hessen	-10	B2	2041-2050
Brandenburg	-17 (-10)	A1B	2055
Märkisch-Oderland	-5 (+0,5)	A1B	2055
Elbeinzugsgebiet	-7,5	A1, B2	2020

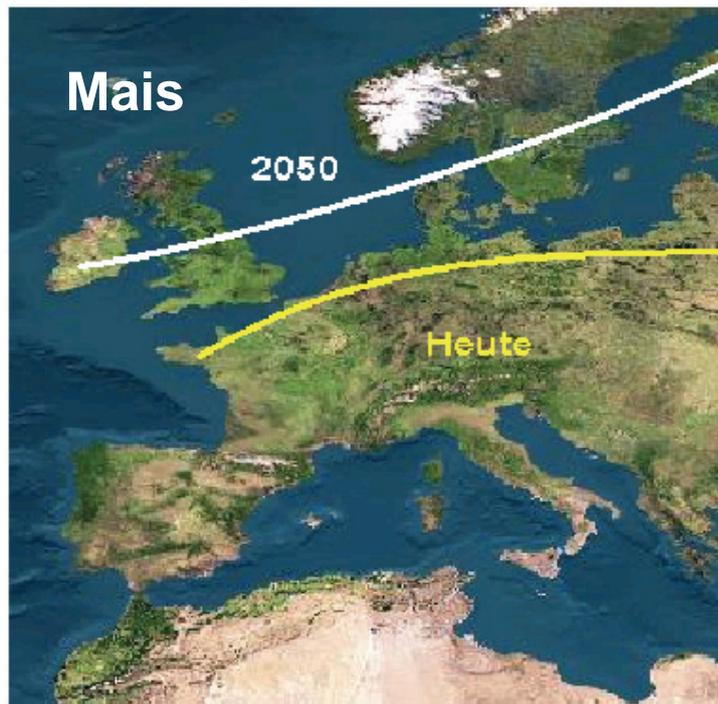


Abbildung 21: Schematisierte Darstellung der möglichen Ausdehnung des Maisanbaus bei zukünftiger Erwärmung (Quelle: Fuhrer, 2003).

Bei *Wintergerste* liegt der CO_2 -Düngeeffekt im Mittel in einer ähnlichen Größenordnung wie bei Winterweizen (s. Kap. 4.1.2.2). Neben sortenspezifischen Reaktionsmustern, spielt hier auch eine relativ geringere CO_2 -Stimulierung bei niedrigeren Temperaturen eine Rolle, da Gerste früher als Weizen geerntet wird und somit weniger sommerlichem Wärmestress ausgesetzt ist (s. Kap. 3.3.1). Andererseits besteht auch eine geringere Wahrscheinlichkeit hitzebedingter Ertragsrückgänge. Dies dürfte in noch größerem Maße für den Vergleich zwischen Winter- und Sommergetreide gelten, da letzteres deutlich später im Jahr seine Vegetationsentwicklung durchläuft. Darüber hinaus könnte für Wintergerste mehr als für andere Wintergetreide eine höhere Gefahr des Auswinterns bestehen auf Grund geringerer Winterhärte und abnehmender Abhärtung bei zukünftig wärmeren Wintertem-

peraturen (mündl. Mitteilung Löpmeier, 2006).

Im Gegensatz zu den Winterweizenerträgen nahmen die *Maiserträge* in den bisher durchgeführten regionalen Simulationen zu den Folgen des Klimawandels allein auf Grund der zu erwartenden höheren Temperaturen (und verändertem Niederschlag) bis Mitte des Jahrhunderts (ohne Berücksichtigung des CO_2 -Düngeeffektes) überwiegend geringfügig zu (Ausnahme Hessen mit - 5%). Bei Berücksichtigung des CO_2 -Effektes, der bei Mais als C_4 -Pflanze hauptsächlich über eine Verbesserung des Wassernutzunseffizienz wirksam wird, wurden Ertragszuwächse bis zu 8% berechnet. Bei weiterer Erwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts und ausreichender Wasserversorgung ist mit einer weiteren Ausdehnung der Anbaueignung von Silo- und Körnermais in höhere Lagen

und Breiten zu rechnen (Abbildung 21). Durch die zunehmende klimatische Eignung und durch die Förderung des Biomasseanbaus könnte damit der Flächenanteil von Mais (und anderen Wärme liebenden schnellwüchsigen nachwachsenden Rohstoffen) in Zukunft deutlich zunehmen und weniger lukrative Kulturen zurückdrängen (z.B. Gömann und Kreins, 2006).

Das Ausmaß des CO₂-Düngeeffektes bei der *Zuckerrübe* blieb in dem Braunschweiger FACE-Versuch deutlich hinter den Erwartungen zurück (vgl. Kap. 4.1.2.2). Damit stellt sich die Frage, ob für diese Kultur die unter den sonstigen Klimaveränderungen zu erwartenden Ertragsänderungen durch ansteigende CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre ausgeglichen bzw. insgesamt beeinflusst werden. Im EU-weiten Vergleich befinden sich heutige, nicht bewässerte Hohertragsstandorte für Zuckerrübe u.a. in Frankreich, Belgien, und Deutschland. In Zukunft wird auf Grund der Erwärmung – allerdings ohne eine Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes – eine Verlagerung des Anbaus weiter in den Norden Europas erwartet (Jones *et al.*, 2003). Nach Einschätzung dieser Autoren nimmt in Deutschland - bei insgesamt gleich bleibendem Ertragspotential - sowohl der Zuwachs im Frühjahr auf Grund wärmerer Temperaturen als auch der Trockenstress im Sommer zu und die Ertragssicherheit verschlechtert sich. Bei Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes sollte das Ertragspotential ansteigen, insbesondere auf bewässerten Flächen. Ähnlich sieht die Situation bei *Kartoffel* aus (s. Kapitel 4.1.2.2).

Grünlandwirtschaft

Die produktivsten Grünlandstandorte sind jene mit einem raschen Vegetationsbeginn im Frühjahr und atlantischen, d.h. feuchten und mäßig-warmen Bedingungen im Sommer. Entsprechend hoch waren die Ertragsausfälle im Grünland im trockenheißen Sommer 2003. Damit kann sich die Klimaerwärmung in Abhängigkeit vom Standort unterschiedlich auswirken: besonders auf wärmelimitierten, frischen Standorten (wie z.B. Niedermooren oder Marschlandschaften in Norddeutschland oder in höheren Lagen) führt die raschere Frühjahrserwärmung zu einem früheren Beginn der Biomasseproduktion. Dadurch sinken im Allgemeinen die Kosten durch Futtermittel in der Tierproduktion, wie z.B. für den US-amerikanischen Rinderweidebetrieb von Baker *et al.* (1993) beschrieben wurde. Auch in der hessischen Klimastudie INKLIM 2012 wurde eine Zunahme der Produktivität von Grünland von 10% berechnet (USF, 2005) und Ergebnisse der britischen Modellstudie ECCLIPS (Effect of Climate Change on Livestock Production Systems) liegen in einer ähnlichen Größenordnung (DEFRA, 2000).

Dagegen wird die zunehmende Sommer-trockenheit insbesondere auf schon heute Feuchte limitierten Böden, wie insbesondere in Regionen Brandenburgs oder Sachsen-Anhalts (s. Kap. 3.2 und 3.3) deutliche Produktionseinbußen in der Sommerzeit nach sich ziehen. So liegen z.B. die für den Landkreis Märkisch-Oderland berechneten Ertragsverluste (ohne Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes) für Klee gras bei 13%

(Mirschel *et al.*, 2005). Andererseits wird der CO₂-Düngeeffekt für Grünlandpflanzen mit ca. 20% Ertragszuwachs bei einem CO₂-Anstieg auf 550-700 ppm relativ hoch eingeschätzt (vgl. Kap. 4.1.2.2), so dass sich auch hier etwaige Ertragsverluste auf Grund von Temperatur- und Niederschlagsänderungen z.T. kompensieren lassen werden. Auf die Veränderung der Zusammensetzung der Grünlandvegetation und deren Folgen wurde bereits in dem Kapitel 4.1.2.2 eingegangen.

Sonderkulturen

Für Deutschland liegen keine konkreten Studien zur *Gemüseproduktion* vor, allerdings lassen sich aus der internationalen Literatur einige Ergebnisse bzw. Trends übertragen. Für die Gemüseproduktion unter Gewächshausbedingungen lässt sich z.B. unmittelbar folgern, dass die Betriebskosten bei höherer CO₂-Konzentration der Außenluft sinken könnten (NFU, 2005). Auch die Heizkosten während der kühlen Jahreszeit werden abnehmen; dagegen wird der Kühlungs- bzw. Ventilierungsbedarf während heißer Perioden zunehmen. Für viele im Freiland gezogene Gemüsesorten wird eine Temperaturerhöhung vorteilhaft sein und voraussichtlich dazu führen, dass sich der Gemüseanbau auf bisherig weniger günstige Standorte ausdehnt (Bindi und Howden, 2004). Als Folge höherer Temperaturen werden die Keimung und auch die vegetative Entwicklung insbesondere von frühem Gemüse verbessert solange die Temperaturen unter 25°C bleiben (Peet und Wolf, 2000). Eine Temperaturzunahme könnte ferner zu einer besseren Verfügbarkeit von

regional produziertem, Wärme liebendem Gemüse, wie z.B. Tomaten oder Paprika auf dem Markt führen. Für Gemüse mit geringen Wärmeansprüchen bzw. gewissen Kälteansprüchen (*Vernalisationsreiz*), wie z.B. Blumenkohl könnte die Produktion in den Sommermonaten dagegen auf Grund von Qualitätsproblemen zurückgehen. Auch der Krankheitsdruck, z.B. durch *Xanthomonas*, könnte zunehmen (IGER, 2003).

Für den *Obstanbau* eröffnen sich durch den Klimawandel zum Einen Chancen, da durch die Erwärmung einerseits zunehmend Wärme liebende Obstsorten angebaut werden können und andererseits der kommerzielle Obstanbau in bisher klimatisch dafür nicht geeignete Regionen ausgedehnt werden könnte (vgl. Kap. 3.2 und 3.3.4). Allerdings wird durch die anhaltende Spätfrostgefahr der Anbau mediterraner Früchte, wie z.B. Aprikosen oder Pfirsiche, auf besondere Gunstlagen beschränkt bleiben (mündliche Mitteilung Hr. Rupp, LVWO Baden-Württemberg). Dagegen wird sich der Trend zum Anbau südländischer Obstsorten, wie z.B. im Apfelanbau (Braeburn, Fuji) seit einigen Jahren zu beobachten, weiter fortsetzen. Andererseits wird möglicherweise die Spätfrostgefahr und sehr wahrscheinlich der Schädlings- und Krankheitsdruck zunehmen. Darüber hinaus werden in einigen Regionen auch Extremereignisse, wie Hagel und Sturmschäden, aber auch Sonnenbrand durch Zusammenwirken hoher Temperaturen und starker Einstrahlung zunehmen.

Wie im Obstbau wird sich auch im *Weinbau* der Trend zu Wärme liebenden Sorten

und zur Verschiebung möglicher Anbaugrenzen fortsetzen. Dies ist für den Rotwein insgesamt überwiegend positiv zu bewerten, da hier die Anbaueignung höherwertiger und vom Verbraucher geschätzter mediterraner Weine, wie z.B. Merlot oder Cabernet Sauvignon, erreicht wird. Im Weißweinanbau können zwar auch mehr sonnenverwöhnte und alkoholreichere Sorten, wie z.B. Chardonnay, angebaut und damit das Sortenspektrum erweitert werden. Andererseits wird der abnehmende Säuregehalt zu einem Charakterverlust traditionsreicher deutscher Weinsorten, wie vor allem dem Riesling, führen (Schultz, 2005). Auch die Produktion von Eiswein wird zunehmend problematischer werden. Kritisch ist vor allem der erhöhte Schaderreger- und Krankheitsdruck zu sehen, wie bereits unter 4.3.3 dargestellt. Außerdem wird insbesondere in Steillagen das Erosionsrisiko bei häufigeren Starkregenereignissen nach längerer Trockenheit zunehmen, v.a. wenn die Bodenbegrünung auf Grund von Wassermangel eingestellt werden muss (Ziegler, 2006, DLR-Rheinpfalz). Voraussichtlich wird die Bewirtschaftung von Steillagen bei abnehmenden Niederschlägen während der Vegetationsperiode und mangelnder bzw. aufwändiger Wasserversorgung unrentabel werden.

Veredelungswirtschaft

Bisher existieren wenige Untersuchungen oder Modelle zu den möglichen Auswirkungen der Klimaveränderungen auf Nutztiere in Deutschland – wie auch weltweit (Zebisch *et al.*, 2005; DEFRA, 2000; Baker *et al.*, 1993). Wie unter 4.4 dargelegt,

nimmt die Leistungsfähigkeit für hitzesensitive Hochleistungsrasen bereits oberhalb von 20°C ab, d.h. in einem Temperaturbereich, der bereits unter heutigen sommerlichen Bedingungen erreicht wird. Bei zukünftig höheren Durchschnittstemperaturen und insbesondere häufiger auftretenden Hitzeperioden ist damit mit einer stärkeren Hitzebelastung der Tiere und geringeren Produktivität in der Veredelungswirtschaft zu rechnen.

4.7 Auswirkungen auf den ländlichen Raum

Die Klimaveränderungen wirken sich in mehrfacher Hinsicht auf ländliche Räume aus: zum einen, indem sie die Wirtschaftlichkeit von Einzelbetrieben, bestimmten Betriebszweigen oder von Betrieben in bestimmten Regionen beeinflussen. Dies kann zu betrieblichen Strukturänderungen bis hin zu Betriebsaufgaben mit unmittelbaren sozialen und ökologischen Auswirkungen für den ländlichen Raum führen. Darüber hinaus übt die Landwirtschaft über die primäre Erzeugung von landwirtschaftlichen Produkten auch wichtige Servicefunktionen für Agrarökosysteme aus. Diese reichen von Regelungsfunktionen z.B. für den (Trink-) Wasser- und Stoffhaushalt bis hin zur Gestaltung von Kulturlandschaften als Lebens- bzw. Erholungsraum für Mensch, Fauna und Flora (z.B. Rounsevell *et al.*, 2005). Damit ergeben sich zahlreiche Interaktionen mit benachbarten Sektoren, wie z.B. der Wasserwirtschaft, dem Naturschutz, der Forstwirtschaft oder dem Tourismus.

4.7.1 Auswirkungen auf die wirtschaftliche Entwicklung von landwirtschaftlichen Betrieben

Die Betrachtung der Auswirkungen der Klimaveränderungen auf landwirtschaftliche Betriebe muss stets im Kontext weiterer sozioökonomischer und ökologischer Randbedingungen erfolgen. Denn zum einen unterliegt die Landwirtschaft Faktoren, die einen stärkeren Einfluss auf ihre Entwicklung haben als der Klimawandel. Hier ist vor allem die Europäische Agrarpolitik zu nennen, die die Landnutzungsmaßgeblich bestimmt; allerdings sind auch Interaktionen denkbar, wenn z.B. veränderte Produktionsvolumina in der EU auf Grund des Klimawandels zu Änderungen in der europäischen Agrarpolitik führen. Auch die Entwicklung auf dem Markt für erneuerbare Energien hat gewaltige Auswirkungen auf den Agrarsektor, die sich bereits heute im Landschaftsbild und den Preisen für Agrarprodukte niederschlagen. Durch die zunehmende Flächenkonkurrenz zur Grundnahrungs- und Futtermittelproduktion wird mit einem weiteren Anstieg der Preise für Agrarprodukte und zwar insbesondere von tierischen Produkten gerechnet (z.B. Schmidhuber, 2006). Ein weiterer wichtiger Faktor ist der seit Jahren zu beobachtende Strukturwandel, der zu immer größeren Schlägen und Betrieben bei tendenziell immer engeren Fruchtfolgen führt. Verschärft wird dieser Trend in Zukunft durch den Bevölkerungsschwund im ländlichen Raum (European Commission, 2007). Zum anderen sind auch Auswirkungen auf andere Sektoren relevant, wie insbesondere die Forstwirtschaft, den Naturschutz, den Tou-

rismus und die Wasserwirtschaft, da diese wiederum Rückwirkungen auf die Landwirtschaft – und umgekehrt – haben können.

Generell ist davon auszugehen, dass sich die Produktivität und damit die Wirtschaftlichkeit einzelner Betriebe oder auch Betriebszweige verändern wird. Verluste sind insbesondere in vulnerablen Regionen zu befürchten oder wenn keine Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden bzw. durchgeführt werden können (s. Kapitel 5). Dagegen sind in Zukunft auch höhere Gewinne möglich, so dass sich die landwirtschaftliche Produktion voraussichtlich in Gunstregionen intensivieren, auf weniger günstigen Standorten dagegen extensivieren wird. Speziell für die nationale Gemüseproduktion könnte sich die Lage verbessern, da sich der Marktanteil südeuropäischen Gemüses auf Grund der sich dort zunehmend verschärfenden Wassersituation verringern dürfte. Darüber hinaus könnte sich die Nachfrage nach bestimmten Produkten, die den menschlichen Organismus bei zunehmendem Hitzestress nicht so sehr belasten, wie z.B. Obst, Gemüse oder Milchprodukten und ihren Derivaten steigern, die an hochkalorischen Lebensmitteln, wie z.B. fettem Fleisch dagegen sinken.

4.7.2 Auswirkungen auf und Interaktionen mit benachbarten Sektoren

Forstwirtschaft

Ebenso wie für die Landwirtschaft gilt auch für die Forstwirtschaft, dass der Klimawandel auf Grund der längeren Vegeta-

tionsperiode und des CO₂-Düngeeffektes positive Auswirkungen auf die Biomasse- bzw. Holzproduktion haben kann. Dies um so mehr als der CO₂-Düngeeffekt bei Bäumen – und zwar insbesondere im Jugendstadium – deutlich höher auszufallen scheint als für landwirtschaftliche Kulturen (Ainsworth und Long, 2005). Allerdings tritt zum Teil noch nach mehreren Jahren ein Akklimatisierungsprozess ein, der die anfängliche Wachstumsstimulierung reduziert (Adam *et al.*, 2004). Darüber hinaus bietet die längere Wachstumsphase zusammen mit höheren Temperaturen auch Chancen durch den Anbau neuer Arten (Zebisch *et al.*, 2005), wobei allerdings die Einbürgerung von Exoten v.a. unter Naturschutzaspekten umstritten ist.

Dagegen steigt mit zunehmender sommerlicher Wärme und Trockenheit nicht nur der Hitzestress für die Wälder, auch die Gefahr durch Waldbrände und Schädlinge, wie z.B. den Borkenkäfer, nimmt extrem zu (Zebisch *et al.*, 2005; Kölling und Zimmermann, 2007). Besonders gefährdet sind auch hier wieder die trockenen bzw. wärmeren Regionen Ost- und Südwestdeutschlands sowie generell Regionen mit wenig angepassten Beständen. Darunter fallen vor allem die u.a. auf Grund ihrer Schnellwüchsigkeit weit verbreiteten Fichtenforsten, die wegen ihrer flachen Wurzelteller besonders anfällig gegenüber häufiger auftretenden Extremereignissen wie Stürmen und Starkniederschlägen sowie Trockenstress sind. Hinzu kommt, dass der Klimawandel wiederum nur ein Faktor unter anderen ist und die meisten Bestände durch die Luftverschmutzung und den hohen atmosphärischen Stickstoffeintrag ohnehin einen schlechten Gesundheitszu-

stand aufweisen. Dieser ist die Folge der seit den 70er Jahren bekannten „neuartigen Waldschäden“, die seit 1994 in dem jährlich erscheinenden nationalen Waldzustandsbericht (näheres dazu unter: BMELV, 2007b) erfasst werden.

In der Forstwirtschaft wurde deshalb schon vor ein paar Jahren u.a. auf die enormen Schäden, die die Stürme „Wibke“ und „Lothar“ in den 90er Jahren und kürzlich Kyrill vor allem in nicht standortangepassten Nadelwäldern verursachten, mit einem Waldumbauprogramm reagiert. Dieses sieht neben einem stärker gegliederten Altersstrukturaufbau der Forste v.a. den Umbau von Nadelwald in artenreichere und widerstandsfähigere Mischwälder vor. Unter dem Aspekt des Klimawandels sollten dabei insbesondere wärmeliebende trockenheitsverträgliche Arten, wie z.B. Eiche⁹⁹, Hainbuche und (Sommer-) Linde berücksichtigt werden, da neben der Fichte selbst die Buche auf Grenzstandorten wie z.B. in Ostdeutschland zu trockenstressgefährdet werden könnte (Zebisch *et al.*, 2005; Lange, 2006). Auf Grund der langen Umtriebszeiten in der Forstwirtschaft muss bereits heute die Grundlage für den Waldbau Ende des Jahrhunderts gelegt werden, zumal meliorative Maßnahmen wie Düngung und Bewässerung im Allgemeinen nicht praktikabel sind (Kölling und Zimmermann, 2007).

Interaktionen mit der Landwirtschaft ergeben sich u.a. daraus, dass viele Landwirte auch Privatwald besitzen. Außerdem könnte die Aufforstung in Zukunft eine sinnvolle Option für trockenstressgefähr-

⁹⁹ In Zukunft werden zunehmend die klimatischen Ansprüche der mediterranen Flaumeiche erreicht werden.

dete landwirtschaftliche Standorte – z.B. in Brandenburg – darstellen. Darüber hinaus greift die Forstwirtschaft über die Bestandesverdunstung unmittelbar in den Wasserhaushalt einer Region ein, und kann z.B. durch den Umbau von Nadelwäldern mit Grasunterwuchs in Mischwälder die Grundwasserneubildungsrate in Regionen mit sommerlichem bzw. ganzjährigem Wassermangel erhöhen.

Wasserwirtschaft

Folgen der Klimaveränderungen für die Wasserwirtschaft ergeben sich in erster Linie durch das erhöhte Hochwasserrisiko vor allem im Winter und im Frühjahr und die zunehmende Wasserknappheit im (Früh-)Sommer bzw. während der Hauptvegetationsperiode, insbesondere in Teilen Ostdeutschlands (Zebisch *et al.*, 2005). Auch eine Verschlechterung der Trinkwasserqualität ist bei abnehmender Grundwasserbildung, höheren Wassertemperaturen und u.U. erhöhter Belastung aus der Landwirtschaft denkbar.

Interaktionen mit der Landwirtschaft ergeben sich damit einerseits durch die Möglichkeit, Hochwasserspitzen durch die Bereitstellung von Retentionsflächen zu verringern und so Schäden zu vermeiden bzw. zu mildern. Auch Maßnahmen, die die Infiltrationskapazität der oftmals durch schweres Arbeitsgerät verdichteten Böden verbessern, dienen letztendlich diesem Ziel, wie z.B. von Schnug und Haneklaus (2002) für den ökologischen Anbau nachgewiesen werden konnte (s. auch Kapitel 3.5.2.1). Dieses Konzept des dezentralen Hochwasserschutzes könnte mit häufige-

rem und höherem Hochwasserrisiko¹⁰⁰ wichtiger werden und wird in Fachkreisen zunehmend diskutiert (DWA, 2006; Berz und Kron, 2005). In diesem Zusammenhang ist auch die Kontamination von landwirtschaftlichen Flächen bei Hochwasser zu berücksichtigen, was u.a. in dem geplanten Sonderforschungsbereich „Risikobeherrschung von Natur- und Zivilisationsgefahren für Infrastruktur und Umwelt“ an der TU Braunschweig untersucht werden soll.

Andererseits sind landwirtschaftliche Flächen wichtig für die Grundwasserneubildung. Außerdem kann die Landwirtschaft ihren Wasserbedarf durch effizientere Bewässerungssysteme bzw. durch den Anbau wassersparender Kulturen bei mangelnder Wasserverfügbarkeit reduzieren. Auch die Anlage von Wasserreservoirien und weitere Maßnahmen zur Rückhaltung des Wassers in der Landschaft sind mögliche Optionen. Weitere Interaktionen ergeben sich mit der Forstwirtschaft, die durch den Umbau von Nadel- zu Laub- und Mischwald die Grundwasserneubildungsrate positiv beeinflussen kann (s.o.).

Naturschutz

Wie bereits verschiedentlich erwähnt führt die Klimaerwärmung neben der Verlängerung der Vegetationsperiode und dem Vorverlegen von phänologischen Phasen auch zu einer Arealverschiebung bzw. Erweiterung bisher wärmelimitierter Arten, sofern eine Wanderung möglich ist (IPCC,

¹⁰⁰ Integrationskonzepte für Raumplanung, Flächenmanagement und Landbewirtschaftung waren z.B. auch Thema der wissenschaftlichen Fachtagung der Universität Bonn zum Hochwasserschutz im November 2006.

2002; Leuschner und Schipka, 2004). Dabei stellen Bergregionen häufig Inseln ohne Rückzugsmöglichkeiten dar (Flannery, 2006). Neben Ausbreitungsschranken tritt als Bedrohung eine Desynchronisation von Nahrungsketten sowie Veränderungen im Konkurrenzverhalten, da unterschiedliche Arten verschieden auf die Klimaerwärmung reagieren (Parmesan und Yohe, 2003; Cleland *et al.*, 2006; Pampus, 2005; Morecroft und Paterson, 2006).

In der Vergangenheit ist generell eine Abnahme kältetoleranter und eine Zunahme wärmetoleranter Arten beobachtet worden – ein Trend, der sich in Zukunft verstärken dürfte (EEA, 2004), wobei die Auswirkungen auf Biodiversität und Ökosysteme bisher nur ansatzweise abgeschätzt werden können (Walther *et al.*, 2002; Thomas *et al.*, 2004; IPCC, 2007b). Dabei sind insbesondere Arten mit limitierten Habitat- und Klimaansprüchen oder denen die Erwärmung zu schnell geht, vom Aussterben bedroht. So rechnen pessimistische Szenarien mit einem Artenverlust von 60% bei einer Erwärmung um 3°C bis Ende des 21. Jahrhunderts (Flannery, 2006) und von 18-24% bei gemäßigteren Szenarien (Thomas *et al.*, 2004). Für Landvögel könnten ca. 10 bis 20% der Arten durch den Wandel ihrer Lebensräume durch Klimawandel und Landnutzungsänderungen gefährdet sein (Jetz *et al.*, 2007). Allerdings wurde in der Studie nicht die Möglichkeit einbezogen, dass die Vögel auf andere Lebensräume ausweichen. Besonders betroffen sind dabei generell Arten am Rand ihres Verbreitungsgebietes (CIRCLE, 2006).

Für den Erhalt der Biodiversität ist deshalb u.a. die Vernetzung von Habitaten durch

das Vorhandensein bzw. die Schaffung von Korridoren zwischen Schutzgebieten und anderen natürlichen Lebensräumen von entscheidender Bedeutung – Konzepte, die im Naturschutz zunehmend berücksichtigt werden (z.B. Initiative des BfN „Biodiversität und Klima – Vernetzung der Akteure in Deutschland“, s. dazu auch Anhang 2). Eine wichtige Rolle kann dabei die Landwirtschaft spielen, z.B. durch die Vernetzung von natürlichen Arealen durch Hecken und ähnliche Ackerrandstrukturen (Agroforstsysteme), die gleichzeitig als Erosionsschutz fungieren und Verdunstungsverluste verringern. Darüber hinaus ist die Landwirtschaft auch von Veränderungen in der heimischen Fauna und Flora durch die Desynchronisation von Nahrungsketten sowie Veränderungen von Gleichgewichten, u.a. zwischen Schädlingen und Nützlingen betroffen (s. dazu auch Kapitel 4.3.2). Außerdem garantiert eine hohe biologische Diversität eine nachhaltige Landwirtschaft, indem genetische Vielfalt für zukünftige Produktionsbedingungen erhalten wird (Walls, 2006).

Tourismus

Während der Wintersporttourismus in den tieferen Lagen der Alpen und den deutschen Mittelgebirgsregionen bereits heute beginnt, über Alternativangebote¹⁰¹ zu dem klassischen „weißen Urlaub“ nachzudenken, wird der Badetourismus an den Küsten und Seen von den steigenden Temperaturen und geringeren Niederschlägen im Sommer profitieren (Zebisch

¹⁰¹ Z.B. aus dem boomenden Wellnesssektor, geführte Touren, etc.

et al., 2005). Von dem insgesamt „schöneren Urlaubswetter“ in Deutschland und der Verschlechterung der Wetteraussichten bisheriger Anbieter aus dem Mittelmeerraum, in dem es im Sommer in Zukunft voraussichtlich zu heiß werden wird, können unter Umständen auch landwirtschaftliche Betriebe profitieren, die in die notwendige Infrastruktur für einen „Urlaub auf dem Bauernhof“ investieren. Dies dient gleichzeitig dem Prinzip der Produktdiversifizierung zur Risikominimierung (s. Kapitel 5).

5 Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft an den Klimawandel

Neben dem Klimaschutz, d.h. der Mitigation von Treibhausgasemissionen ist mittlerweile die Anpassung an die Klimaveränderung auf der politischen und zunehmend auch administrativen Tagesordnung (z.B. KOM(2007) 354). Dabei wird in der Klimafolgenforschung mittlerweile verstärkt davon ausgegangen, dass die zunehmende Variabilität des Klimas, insbesondere verstärkte auftretende Klimaextreme wie Hitze- und Dürreperioden, eine ebenso große, wenn nicht größere Herausforderung darstellen wird als ansteigende Durchschnittstemperaturen (IPCC, 2007b; EEA, 2004; Wheeler *et al.*, 2000; Pfeifer *et al.*, 2002). Neben der Ausarbeitung einer nationalen Anpassungsstrategie werden mit wachsender Betroffenheit durch den Klimawandel eine Reihe von regionalen Projektverbänden gebildet, die u.a. die Anpassung der Landwirtschaft an bereits zu beobachtende und künftige Klimaver-

änderungen zum Ziel haben (s. dazu auch Kap. 6.1). Dabei müssen die verschiedenen Ebenen der landwirtschaftlichen Produktion von der Auswahl der einzelnen Kultur bis hin zum gesamtbetrieblichen Management sowie vor- und nachgelagerte Produktionszweige und der internationale Agrarhandel betrachtet werden. Da es sich bei der Diskussion um Anpassung an den Klimawandel um ein relativ junges, sich dynamisch entwickelndes Themengebiet handelt, gibt es eine Vielzahl von neuen Begriffen, die zum Teil auch unterschiedlich gebraucht werden (z.B. OECD/IEA, 2006; Kurukulasuriya und Rosenthal, 2003).

Kategorien von Anpassungsmaßnahmen

Bei den Anpassungsmaßnahmen werden z.B. *autonome* oder auch *spontane* Anpassungen von *geplanten* unterschieden (OECD, 2002). Während erstere sich im Allgemeinen auf den privaten Sektor beziehen und überwiegend reaktiver (*ex post*) Natur sind, handelt es sich bei zweiteren meist um vorausschauende (*ex ante*) Maßnahmen der öffentlichen Hand (Kurukulasuriya und Rosenthal, 2003). Nach dem IPCC Bericht von 2001 gibt es bisher wenig Beweise, dass spontane Anpassungsmaßnahmen tatsächlich zu effizienten und effektiven Anpassungen an Risiken des Klimawandels führen, da die einzelnen *Stakeholder*¹⁰² in ihren Entscheidungen subjektiven Kriterien, Erfahrungen und Präferenzen unterliegen. Auch Johnston und Chiotti (2001) betonen die Schwierigkeit, auf Grund der Überlage-

¹⁰² Interessenvertreter, Akteure: Begriff der sich in der partizipativen Forschung eingebürgert hat.

zung klimatischer durch sozioökonomische oder auch historisch-kulturelle Rahmenbedingungen die „richtige“ Entscheidung zu treffen – selbst wenn der Klimawandel als solcher erkannt wurde. Dagegen fand eine Studie in England heraus (ADAS 2005, zitiert in NFU, 2006), dass die effektivsten Anpassungsmaßnahmen von Landwirten durchgeführt wurden. Allerdings ist die Effektivität von Anpassungsmaßnahmen nur schwer zu messen (OECD/IEA, 2006), insbesondere wenn es sich um vorausschauende Maßnahmen handelt. Generell werden adaptive Initiativen vor allem in Sektoren mit einem kurzen bis mittelfristigen Planungshorizont bzw. Umlegungsrate von Investitionen ergriffen. Für die Planung und Umsetzung langfristiger Anpassungsmaßnahmen könnte dagegen die Unterstützung durch entsprechende Institutionen bzw. die Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen notwendig werden.

So werden Anpassungsmaßnahmen häufig auch erst durch klare Signale der Märkte und Institutionen ermöglicht, da Klimawandel für die Landwirtschaft i.a. nur ein Kriterium unter anderen ist (Lemmen und Warren, 2004). Bisher haben z.B. in der Europäischen Union Änderungen in der Subventionspolitik deutlich größere Auswirkungen auf die Landwirtschaft als der Klimawandel. Am erfolgreichsten sind deshalb immer Anpassungsmaßnahmen, die den Klimawandel im Gesamtkontext betrachten und unabhängig von Klimaänderungen zur Verbesserung der landwirtschaftlichen Ökonomie beitragen, so genannte „Win-Win“- oder auch „no regret“ Adaptionen (z.B. Lemmen und Warren, 2004; Kurukulasuriya und Rosenthal,

2003). Weitere Unterscheidungsmöglichkeiten sind *temporärer* bzw. *räumlicher* Natur, wie z.B. kurz-, mittel-, und langfristige und lokale bzw. regionale oder nationale Anpassungsmaßnahmen, etc. So erfordert die zunehmende Klimavariabilität nach Kurukulasuriya und Rosenthal (2003) z.B. kurzfristige, die Klimaänderung dagegen langfristige adaptive Maßnahmen.

Klein (2004) untergliedert ferner in die „*facilitating adaptation*“, die durch die Bereitstellung von Ressourcen finanzieller oder sonstiger, z.B. informativer, Art Anpassung ermöglicht, während die „*implementing adaptation*“ die konkreten Änderungen im (operativen) Verhalten bezeichnet. Für den gleichen Sachverhalt werden auch die Begriffspaare weiche und harte Anpassungsmaßnahmen verwandt (OECD/IEA, 2006). Ein mögliches Dilemma kann aus der unterschiedlichen Skala dieser beiden Prozesse resultieren, da es sich bei den unterstützenden Organen im Allgemeinen um überregionale Institutionen handelt, während die tatsächlichen Anpassungsmaßnahmen auf der regionalen bis lokalen Ebene umgesetzt werden müssen, für die häufig noch gar keine ausreichend genauen Projektionen zur Klimaveränderung vorliegen.

5.1 Anpassung des Pflanzenbaus an Klimaveränderungen

Die einheimische Landwirtschaft kann sich an mittlere Klimaänderungen, d.h. höhere mittlere Temperaturen und geringere Sommer – bei gleichzeitig erhöhten Winterniederschlägen, mit einer Reihe von

kurz- bis mittelfristigen – für holzige Sonderkulturen auch längerfristigen – Maßnahmen anpassen. Während einige Anpassungen selbständig (*autonom*) und weitgehend kostenneutral von den Landwirten durchgeführt werden können, benötigen längerfristige, insbesondere strukturelle Maßnahmen häufig Vorgaben seitens der Wissenschaft, Politik und Verwaltung, um die Anpassungskapazität des Agrarsektors gezielt zu fördern (z.B. Olesen, 2007). Anpassungsmaßnahmen an die zunehmende Klimavariabilität sind schwieriger zu realisieren. Hier könnten in Zukunft eventuell staatlich subventionierte Mehrgefahrenversicherungen für die Landwirtschaft gefordert sein wie sie bereits in einigen Ländern, z.B. den USA, existieren. In Tabelle 12 sind einige Maßnahmen mit ihrem zeitlichen Umsetzungshorizont aufgeführt.

Tabelle 12: Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel durch die Landwirtschaft und die Dauer der Umsetzung (verändert nach Reilly, 1995).

Maßnahme	Dauer (Jahre)
Sortenauswahl	3-14
Sortenentwicklung	8-15
Einführung neuer Sorten (z.B. mediterrane Weinsorten)	15-30
Bewässerungssysteme / Dammbau	50-100
Bewässerungsmaschinen	20-25
Anpassung von Dünge- und Pflanzenschutzregime	10
Erschließung von Neuland	3-10
Änderung von Transportsystemen	3-5
Versicherungen	??

5.1.1 Anpassungsmaßnahmen von Seiten der landwirtschaftlichen Betriebe

Für den Landwirt ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, sich an diese Änderungen anzupassen und so klimabedingte Ertrags- und Qualitätseinbußen zu verhindern oder zumindest abzumildern bzw. sich neu eröffnende Potentiale zu nutzen. Dazu zählen neben einem gezielten Humusaufbau z.B. die Änderung von Aussatterminen; der Anbau von anderen Sorten oder sogar anderen Kulturen; die Anpassung des Dünge- und Pflanzenschutzregimes und der Bodenbearbeitung einschließlich Änderungen in der Fruchtfolge und der Ausbau von Bewässerungsanlagen (Reilly und Schimmelpfennig, 1999; DEFRA, 2000; Rosenzweig und Hillel, 1998c; Abildtrup und Gylling, 2001; Zebisch *et al.*, 2005; Kurukulasuriya und Rosenthal, 2003; IPCC 2007b). Dabei müssen die Einzelmaßnahmen aufeinander abgestimmt werden, um einen gesamtbetrieblichen Ablauf zu gewährleisten, und generell die naturräumlichen und agrarstrukturellen Potentiale und Limitationen der jeweiligen Region berücksichtigt werden (s. Kap. 3.2 und 3.3).

- *Anpassung der Aussattermine, Saatedichte, Reihenabstand und Fruchtfolge:* Die Verlängerung der Vegetationsperiode ermöglicht zum einen den Anbau von spät reifenden Sorten mit einem höheren Ertragspotential (Reilly und Schimmelpfennig, 1999), wie z.B. Körnermaissorten mit hohem Wärmesummenbedarf (IGER, 2003). Zum anderen könnte der Anbau zwei-

er Hauptkulturen¹⁰³ innerhalb einer Vegetationsperiode möglich werden sofern der Wasserbedarf gedeckt werden kann. Weitere Änderungen in der Fruchtfolge ergeben sich aus dem verstärkten Anbau von Winterungen, die bei Vorsommertrockenheit eine effizientere Wasserausnutzung ermöglichen. Durch die Verringerung von Bracheflächen im Winter reduziert dieser gleichzeitig das Erosionsrisiko (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2007). Im Fall der Zuckerrübe verlangen immer wärmere Winter und früh einsetzende milde Frühjahrstemperaturen sogar regelrecht nach der Innovation „*Winterrübe*“ (Koch, 2007). Dieser Trend könnte ausgeprägtere Arbeitsspitzen nach sich ziehen und ist von der Disponibilität von Maschinen und Arbeitskräften abhängig. Im Frühjahr könnte die Aussaat von Sommerkulturen (Sommergetreide, Freilandgemüse, etc.) früher erfolgen, was gleichzeitig Ertragsverluste durch Hitze- und Trockenheit im Hochsommer vermeiden hilft. Auch die Verringerung der Bestockungsdichte kann Trockenstress reduzieren. Winterkulturen werden dagegen voraussichtlich später ausgesät werden müssen, um Schäden durch hohe Saatbeetttemperaturen und Auswinterung bei einer rascheren Vegetationsentwicklung im Herbst und Risiken von Krankheitsübertragungen, z.B. bei Winterweizen, zu reduzieren (IGER, 2003). Die rasche-

re Pflanzenentwicklung im Herbst erhöht nicht nur das Risiko durch Krankheits- und Schädlingsbefall; auch durch den höheren N-Bedarf steigen die Produktionskosten, die nicht immer durch höhere Erträge gedeckt werden können (Böse, 2003). Dagegen ist eine gute Wurzel Ausbildung im Herbst für eine rasche Frühjahrsentwicklung vorteilhaft, so dass unter Berücksichtigung dieser beiden Kriterien der optimale Saattermin gefunden werden muss. Bei früherem Räumen der Sommerkulturen und späterer Aussaat der Winterkulturen sind die landwirtschaftlichen Flächen wiederum länger ohne eine schützende Vegetationsdecke, was die Anfälligkeit gegenüber Wind- und Wassererosion erhöht. Anpassungsmaßnahmen können konservierende Bodenbearbeitung oder, bei ausreichender Wasserversorgung, der Anbau von Zwischenfrüchten darstellen.

- *Anbau anderer Sorten:* Zur Vermeidung von Ertragsausfällen und Qualitätseinbußen auf Grund von zunehmendem Trocken- und Hitzestress im Sommer, gibt es verschiedene Strategien: einmal, diesen durch die Vorverlegung des Aussaattermins und den Anbau frühreifer Sorten zu vermeiden, die so genannte „*escape*“-Strategie; ein weiterer Vorteil dieser Sorten ist, dass sie durch die verkürzten Entwicklungsphasen weniger Wasser verbrauchen. Zum anderen, hitze- und trockenheitstolerante Sorten (bzw. Arten) zu verwenden. Bei Sommertrockenheit kann auch der Einsatz tief wurzelnder Kulturen, wie

¹⁰³ Insbesondere bei Anbau von nachwachsenden Rohstoffen, die bereits vor Erreichen des Reifestadiums geerntet werden können.

z.B. verschiedener Gräser, eine Lösung darstellen; diese helfen gleichzeitig den Boden gegen Erosion zu stabilisieren (BBSRC, 2006). Auch Roggen zeichnet sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit seines Wurzelsystems aus, was ihm in Zukunft einen Wettbewerbsvorteil in der Fruchtfolge einräumen könnte; nachteilig wirkt sich dagegen seine Sensitivität gegenüber hohen Temperaturen aus (s. dazu auch Kap. 3.3.1). Da die meisten Saatgutunternehmen international operieren, gibt es für die Hauptanbaukulturen in der Regel eine Fülle von Sorten mit verschiedenen Charakteristika (Reilly und Schimmelpfennig, 1999), u.a. Trockenstressresistenz bei guter Ertragsleistung, wie z.B. im Falle vieler Hybridsorten. Allerdings ist die Verwendung von Sorten aus anderen Klimabereichen nicht immer problemlos möglich, da sich neben Klimafaktoren auch häufig Boden- und Managementparameter unterscheiden. Bei gleichzeitig stärkeren Niederschlägen werden in Zukunft voraussichtlich auch lagerresistentere Ackerkulturen vermehrt nachgefragt werden. Insgesamt wird die zunehmende Klimavariabilität die Verwendung robusterer Sorten erfordern. Dadurch könnte in Zukunft wieder der Anbau von Sommergerste interessanter werden, die eine weitgehende Ertragsstabilität auch unter extremen klimatischen Bedingungen aufweist (s. auch Kap. 3.3.1 bzw. 3.3.5). Außerdem könnte bei weiterhin steigenden Wintertemperaturen der Vernalisationsbedarf einiger landwirtschaftli-

cher Kulturen – wie z.B. von Blumenkohl (IGER, 2003) – nicht mehr gewährleistet sein, was neben Anpassungen in der Züchtung die Verwendung von Sorten mit einem geringeren Vernalisationsbedarf bzw. den Wechsel von Winter- zu Sommerkulturen notwendig machen könnte.

- *Anbau anderer Kulturen:* Generell wird im Zuge der Klimaerwärmung mit einer Ausdehnung bisher wärme-limitierter Kulturen gerechnet und den darin implizierten Änderungen für das Betriebsmanagement und die Bodenfruchtbarkeit (Kurukulasuriya und Rosenthal, 2003). Für Deutschland bedeutet dies zunächst die (weitere) Ausbreitung Richtung Norden und in höhere Lagen von Kulturen, die bereits heute in wärmeren Regionen angebaut werden, wie z.B. (Körner-) Mais, Sonnenblumen oder Wein. Dabei könnte der zunehmende Anbau von Futtermais die Abhängigkeit von Futtermittelimporten in der Veredelungsindustrie verringern. Auch Kulturarten, für die die bisherigen klimatischen Bedingungen in Deutschland Grenzlagen darstellten, könnten in Zukunft anbauwürdig werden, wie z.B. Durumweizen oder Winterhafer (Christen, 2007); letzterer könnte zunehmend den temperatursensitiven Sommerhafer ersetzen, der zudem eine geringe Wassernutzungseffizienz aufweist (s. auch Kap. 3.3.1). Neben Durumweizen könnte auch der Anbau von höherwertigem Weizen (A-, E-) in den nördlicheren Bundesländern möglich und in Abhängigkeit von den Deckungsbeiträ-

gen attraktiv werden. Im Biomasseanbau wird das Spektrum der angebauten Kulturen kontinuierlich mit wärmeliebenden schnellwüchsigen und möglichst wassereffizienten (C₄-) Arten erweitert werden, wie z. B. Sudangras oder Hirse. Inwieweit frostempfindliche Kulturen, wie z.B. Soja oder auch mediterrane Obstbäume (z.B. Aprikose), in Zukunft problemlos angebaut werden können, ist noch umstritten. Die Erhöhung des Anteils perennierender Arten kann dazu beitragen, Erosion, Auswaschung und Bodendegradation zu reduzieren (Hertstein *et al.*, 1994). In Folge dieses Wandels im Kulturartenspektrum wird sich das Landschaftsbild verändern, was Auswirkungen für die einheimische Fauna und Flora nach sich zieht.

- *Anpassung der Bodenbearbeitung:* Auch der Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung kann dazu beitragen, zunehmenden Trockenstress zu reduzieren: konservierende Systeme vermindern nicht nur die Evaporation sondern erhöhen auch die Wasserspeicherkapazität des Bodens nach Niederschlagsereignissen durch Humusaufbau im Oberboden. Durch die Bedeckung des Bodens mit einer in der Regel stärker reflektierenden Mulchschicht verbessert sich außerdem das Mikroklima in Bodennähe und eine Überhitzung oberflächennaher Bodenschichten einschließlich Pflanzenwurzeln kann unterbunden werden. Gleichzeitig wird die Anfälligkeit des Oberbodens gegenüber Wind- und Wassererosion verringert

(Reilly und Schimmelpfennig, 1999). Allerdings steht dem Verbleib bzw. dem Einarbeiten von Ernterückständen auf dem Feld zunehmend deren energetische Nutzung in Biogasanlagen entgegen (Bayerische Landesanstalt für Umwelt, 2007). Bei engen Fruchtfolgen kann bei reduzierter Bodenbearbeitung zudem ein stärkerer Krankheitsdruck, z.B. von Fusariumpilzen sowie generell Fußkrankheiten, problematisch werden. Auf Grund des steigenden Unkrautdruckes sind häufig auch höhere Herbizidanwendungen notwendig, die sich u.a. auf mikrobiologische Umsetzungsprozesse im Boden negativ auswirken. Weitere ungünstige Folgen, die die Anwendung dieser Technik in Frage stellen können, sind die hohen Kosten der Maschinen¹⁰⁴ sowie ihr Gewicht, das sie ungeeignet für verdichtungsgefährdete Böden macht (Johnston und Chiotti, 2000). In speziellen Fällen kann zur Aufnahme von Niederschlagswasser dagegen auch eine tieflockernde Bodenbearbeitung bei anschließender Festigung des Oberbodens zur Unterbindung des Aufstiegs von Kapillarwasser sinnvoll sein (Schönberger, 2004). Weitere Konsequenzen für die Bodenbearbeitung können sich aus vernässten Flächen im Herbst bzw. Winter ergeben, die das Befahren der Felder unmöglich machen (IGER, 2003).

- *Wasserversorgung und Be- bzw. Entwässerungssysteme:* Wo bereits Bewässerungssysteme installiert sind, ist

¹⁰⁴ Abhilfe können hier Maschinenringe schaffen.

voraussichtlich mit einem steigenden Wasserverbrauch und damit höheren Produktionskosten zu rechnen, um den zusätzlichen Wasserbedarf der Pflanzen, wie z.B. von Zuckerrüben (IGER, 2003) oder auch Kartoffeln, bei höheren Temperaturen zu decken (Reilly und Schimmelpfennig, 1999). Weitaus kostspieliger und damit voraussichtlich an die Bereitstellung von Fördermitteln gebunden ist die Neuinstallation von künstlicher Bewässerung – vorausgesetzt diese ist bei generell steigendem Wasserbedarf aller Sektoren und u.U. sinkenden Grundwasserständen überhaupt möglich. Die Verwendung neuester Technologie z.B. in der Tröpfchenbewässerung hilft hier, den Wasserverbrauch zu reduzieren und gleichzeitig die Gefahr durch Versalzung und Pilzbefall (NFU, 2005; Ontario Forest Research Institute, 2003) zu minimieren. Evaporationsverluste können auch durch nächtliche Nutzung (Rosenzweig und Hillel, 1998c; NFU, 2005) und durch Windschutzhecken (Abildtrup und Gylling, 2001) verringert werden. Ebenso kann die Wasserverfügbarkeit für landwirtschaftliche Kulturen durch den Rückbau von Drainagesystemen bei gleichzeitiger Verbesserung der Wasseraufnahmekapazität des Bodens erhöht werden. Eine weitere Option stellt die Speicherung von Wasser (Kurukulasuriya und Rosenthal, 2003), die Trennung von sauberem und gebrauchtem Wasser, die Sammlung von Regenwasser und Wasserrecycling dar. Wenn auch in Deutschland die Situation nicht so

kritisch ist, wird weltweit 70% des Süßwassers für die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen benutzt, so dass in Zukunft alle Einsparpotentiale ausgeschöpft werden müssen, um drohende Nutzungskonflikte zu entschärfen (z.B. Spiegel-online, 24.01.07). Umgekehrt muss bei erhöhter Gefahr durch Staunässe in den Herbst- und Wintermonaten eventuell verstärkt in Drainagesysteme investiert werden (NFU, 2005), bei Hochwassergefahr auch der Abfluss von höher gelegenen Flächen reduziert werden.

- *Anpassung sonstiger Inputgrößen:* Da die Pflanzen nur dann von dem CO₂-Düngeeffekt profitieren können, wenn sie ausreichend Nährstoffe für ein stärkeres Wachstum zur Verfügung haben, ist eine Anpassung der Düngerapplikation und wahrscheinlich auch der Düngerzusammensetzung notwendig. Während in der Literatur im Allgemeinen auf die Notwendigkeit einer erhöhten N-Zufuhr hingewiesen wird (z.B. Reilly und Schimmelpfennig, 1999; Porter und Steffen, 2004), gehen Ghannoum *et al.* (2007) davon aus, dass für C₃-Pflanzen bei höherer atmosphärischer CO₂-Konzentration voraussichtlich höhere P- und niedrigere N- und Zn-Konzentrationen benötigt werden. Die Auswirkungen auf die Versorgung mit anderen Nährstoffen sind dagegen noch weitgehend unbekannt. Da höhere (N-)Düngergaben durch das verstärkte Wachstum den Wasserverbrauch erhöhen, muss hier ein Gleichgewicht gefunden werden.

Längere Trockenphasen verbunden mit einer höheren Intensität einzelner Niederschlagsereignisse erschweren voraussichtlich die Ausbringung und Wirksamkeit von Dünge- wie auch anderen Betriebsmitteln. Insbesondere Phosphor ist bei Trockenheit schlecht pflanzenverfügbar. Die platzierte Applikation, z.B. im so genannten CULTAN-Verfahren¹⁰⁵, das gleichzeitig die Bearbeitungsintensität reduziert, könnte hier einen Ausweg darstellen. Mit dem optimierten Einsatz von Betriebsmitteln bei gleichzeitig verringerter Umweltbelastung beschäftigt sich das Arbeitsgebiet „*precision farming*“, dessen moderne Technologie allerdings noch nicht in bedeutendem Umfang in der landwirtschaftlichen Praxis übernommen wird (Lilienthal *et al.*, 2004). Ein höherer Krankheits-, Unkraut- und Schädlingsdruck wird wahrscheinlich zu einem intensiveren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im konventionellen Anbau führen. Eine mögliche Abhilfe könnte hier die Förderung des Integrierten Pflanzenschutzes darstellen (Krukulasuriya und Rosenthal, 2003). Gleichzeitig muss die Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln unter veränderten Umweltbedingungen überprüft werden. Im biologischen Anbau könnte u.U. das Befallsrisiko zunehmen. Dagegen werden die Trocknungskosten bei Getreide bei niedrigerer Luftfeuchte während der Erntezeit geringer ausfallen.

- *Diversifizierung*: Die Diversifizierung von landwirtschaftlichen Produkten bis hin zu außerlandwirtschaftlichen Aktivitäten, wie z.B. Angebote für den Tourismussektor, ist generell eine Möglichkeit das Betriebsrisiko zu senken; dies gilt insbesondere in Hinblick auf die zunehmende Klimavariabilität und zunehmenden Krankheits- und Schädlingsdruck (Zebisch *et al.*, 2005; s. auch Portfoliotheorie der Wirtschaftswissenschaften). Allerdings zeigt sich in der modernen Landwirtschaft ein Trend zu einer Spezialisierung auf immer weniger Produkte um kostengünstiger zu produzieren, der sich nur schwer wird umkehren lassen (Bradshaw *et al.*, 2004; Skees *et al.*, 1999). Eine weitere Möglichkeit der Einkommensdiversifizierung ist der Verkauf eigener bzw. selbst verarbeiteter Produkte, beispielsweise durch hofeigene Direktvermarktung.
- *Monitoring*: Um eine effektive Anpassung zu gewährleisten, sollten Managementpläne erstellt werden.

Neben diesen überwiegend für den Ackerbau geeigneten Anpassungsmaßnahmen existieren auch verschiedene Möglichkeiten Sonderkulturen, wie z.B. den Weinanbau, an die Klimaveränderungen anzupassen: während extreme Steillagen in Zukunft zunehmend unrentabel werden könnten, kann mit Hilfe einer Flexibilisierung der Bodenbewirtschaftung Wasser effizienter genutzt werden. Ferner ist eine höhere Langlebigkeit der Weinstöcke anzustreben, da alte Reben durch den hohen Altholzanteil und ihr besser ausgebildetes

¹⁰⁵ “Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition”

Wurzelsystem weniger trockenstressgefährdet sind. Mit Hilfe von Blattdüngung kann im Sommer zusätzlich auf den veränderten Nährstoffhaushalt reagiert werden (Schultz *et al.*, 2005).

Spezielle Maßnahmen auf Trockenstandorten

Auf trockenstressgefährdeten (Acker-)Standorten (v.a. Brandenburgs und Sachsen-Anhalts, s. Schindler *et al.*, 2007) können eine ganze Reihe von Maßnahmen ergriffen werden, um einen möglichst sparsamen Umgang mit der Ressource Wasser zu erreichen (Schönberger, 2004):

1. *Der Boden muss die Niederschläge aufnehmen können.* Neben der konservierenden Bodenbearbeitung kann dabei in Abhängigkeit von den Standortbedingungen auch eine tiefe Bodenlockerung sinnvoll sein, um die Infiltration des Niederschlagswassers zu fördern. Wichtig ist die anschließende Wiederverfestigung, um Hohlräume zu verfüllen und die Kapillarität zu erhalten;
2. *Vermeidung unnötiger Bodenbearbeitung.* Jede Bodenbearbeitung kostet Wasser und sollte deshalb so sparsam wie möglich eingesetzt werden;
3. *Förderung des Wurzelwachstums.* Eine tiefe Lockerung kann auch das Wurzelwachstum stimulieren. Des Weiteren ist für eine gute Entwicklung des Wurzelsystems der Kontakt zwischen Wurzeln und Boden entscheidend, für den ein hoher Anteil an Feinerde notwendig ist;
4. *Anpassung von Standraum und Saattiefe.* Einzelpflanzen mit ausreichend Standraum bilden bessere Wurzeln aus. Bei zu viel Platz bestockt die Pflanze unnötig stark, bei zu wenig bildet sie weniger Bestockungstriebe und Kronenwurzeln aus;
5. *Anpassung der N-Düngung an die Wasserverfügbarkeit.* Wasser wird proportional zur Blattfläche verdunstet, weshalb die Pflanze nicht mastig werden darf;
6. *Ausreichende Versorgung mit allen Nährstoffen.* Eine einseitige Nährstoffversorgung verringert die Wassereffizienz. Für die Ausbildung des Wurzelsystems ist insbesondere eine ausreichende Phosphor- und Manganversorgung sicherzustellen, für die Wasserausnutzung unter Trockenstress die Kaliversorgung;
7. *Zurückhaltender Einsatz von Wachstumsreglern.* Wachstumsregler, wie z.B. CCC etc., aber auch wachstums-regulatorisch wirkende Herbizide oder Fungizide verringern den Wasserfluss in der Pflanze und müssen deshalb vorsichtig eingesetzt werden;
8. *Kontrolle von Halmbasiskrankheiten.* Krankheiten, wie insbesondere Halmbasiskrankheiten, können zu einer Verstopfung des Leitbahnsystems führen und müssen verhindert werden;

9. *Vermeidung von Hitzeschäden.* Wasserstress wirkt oft erst durch Hitze tödlich. So genannte Escape-Strategien können hier eine Abhilfe darstellen. Auch im Boden wirkt sich Hitzestress negativ auf die Wurzeln und das Bodenleben aus; besonders auf dunklen Böden reduziert eine Bodenbedeckung, z.B. durch Mulch die Aufheizung;
10. *Wahl einer an den Standort angepassten Sorte* mit möglichst gut ausgebildetem Wurzelsystem, hoher Robustheit gegenüber Hitze und Trockenheit und ausreichender Winterhärte. So ist z.B. in einigen, strahlungslimitierten Standorten Norddeutschlands nach wie vor „*Ritmo*“ die ertragsreichste Winterweizensorte, die sich durch ein aufrecht stehendes (*erektophiles*) Blatt auszeichnet. In Süddeutschland, wo nicht nur Trockenheit sondern auch Hitze vermehrt ertragslimitierend wirken kann, eignen sich dagegen eher Sorten mit flach liegendem (*planophilen*) Blattapparat, wie z.B. „*Cubus*“ (Dölger und Heubach, 2007). Generell kommen z.B. begrannte Sorten besser mit Trockenheit zurecht, da unter diesen Bedingungen die Blätter frühzeitig absterben und daher die Ährenorgane, d.h. die Grannen auf Grund ihrer wesentlich kleineren Spaltöffnungen die Hauptmenge an Assimilaten in der Kornfüllungsphase liefern.

Darüber hinaus beginnt sich aber auch die Erkenntnis durchzusetzen, dass die Inten-

sivlandwirtschaft auf armen Böden an ihre natürlichen Grenzen stößt und dass nicht kontinuierlich mit Hilfe von engen Fruchtfolgen und hohem Chemieeinsatz maximale Ernten herausgeholt werden können (Thies, 2007).

In Deutschland bereits angewandte Maßnahmen

Ein Teil der oben beschriebenen Anpassungsmaßnahmen wird bereits heute umgesetzt. Dabei handelt es sich nach Zebisch¹⁰⁶ *et al.* (2005) überwiegend um die Verwendung angepasster Sorten sowie wasser- und bodenschonender Betriebstechnik. Der Adaption weiterer Maßnahmen stehen zum Teil finanzielle Hindernisse aber auch fehlende Informationen bezüglich neuer Anbauverfahren und der konkreten Auswirkungen des Klimawandels (z.B. EEA, 2007) entgegen. Auf die Schwierigkeit, in diesem Zusammenhang die „richtige“ Entscheidung zu treffen, wurde bereits hingewiesen (s. dazu Johnston und Chiotti, 2000). Ob empfohlene Maßnahmen letztendlich von den Landwirten übernommen werden, hängt nicht zuletzt davon ab, ob sie selbst erkannten bzw. formulierten Bedürfnissen entsprechen (Reilly und Schimmelpfennig, 1999). Allerdings waren nach der Studie von Zebisch *et al.* mehr die Wetterextreme der Vergangenheit und Einsparpotentiale bei den Betriebskosten Anlass für die Veränderungen als die zu erwartenden Klima-

¹⁰⁶ Für die Studie wurde pro Bundesland eine Fachperson aus dem Landwirtschaftssektor befragt, wobei Antworten aus den folgenden Bundesländern vorlagen: Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen, Thüringen, Hessen und Saarland.

veränderungen, so dass man davon ausgehen kann, dass die Landwirtschaft zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht an die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels angepasst ist.

Auch bei Interviews im Rahmen des Projektes „LandCare 2020“ (s. Kapitel 6.1) in Mecklenburg-Vorpommern bzw. Sachsen gab die Mehrzahl der befragten Stakeholder an, bereits Aktivitäten durchzuführen, um mit den Auswirkungen des Klimawandels umzugehen bzw. gezielt Vorsorge zu betreiben (IFOK, 2007). Dabei handelt es sich ebenfalls überwiegend um wasser- und bodenschonende Bodenbearbeitungssysteme, die Anpassung von Aussaat-Terminen an die zunehmende Vorsommertrockenheit sowie die Verwendung von stress- und insbesondere trockenstressresistenten Sorten. So wird nach Angaben der Saaten-Union (Böse, 2004b) in Trockenregionen, wie z.B. auch Mecklenburg-Vorpommern, bereits 11% Hybridweizen angebaut, der auf Grund seiner besseren Wurzelleistung besonders gut an Trockenstandorte angepasst ist. Vereinzelt wird sogar mit besonders dürreresistenten dafür aber auch ertragsschwächeren Getreidesorten experimentiert, wie z.B. dem in Nordafrika bewährten „Kamelweizen“ (Thies, 2007). Der gute Kenntnisstand der Befragten zu dem Klimawandel war dabei eine unmittelbare Konsequenz der Bedeutung dieses Themas in den Medien während der vergangenen Monate sowie der Ernteausfälle im Jahr 2006, dem zweiten Extremsommer in Folge. So berichten z.B. auch Johnston und Chiotti (2000), dass betriebliche Entscheidungen oftmals an Vorjahresergebnissen festgemacht werden.

5.1.2 Anpassungsmaßnahmen der Pflanzenzüchtung

Während bis ca. 1990 etwa zwei Drittel des Ertragszuwachses durch optimierte Verfahren im Pflanzenbau erreicht wurden, nimmt seitdem der Anteil der Züchtung deutlich zu und macht im Augenblick ca. 60% aus (mündliche Mitteilung Schachschneider, DLG Pflanzenbautagung 2007). Dabei ist das Ertragspotential der meisten Kulturpflanzen noch nicht ausgereizt: allein bei Winterweizen wird mit einem Ertragszuwachs von ca. 15-18 dt ha⁻¹ in den kommenden Jahren gerechnet. Kritisch ist in diesem Zusammenhang allerdings, dass Ertragszuwächse im Allgemeinen auf guten Standorten bzw. Jahren erfolgen, während weniger produktive Standorte insbesondere in ungünstigen Jahren an diesem Fortschritt nicht teilhaben (mündliche Mitteilung Wechsung, DLG-Pflanzenbautagung 2007; Evans, 1993; Eulenstein *et al.*, 2005). Da davon auszugehen ist, dass im Zuge der Klimaveränderungen die Anbaubedingungen insgesamt kritischer werden, wird von der Pflanzenzüchtung ein wesentlicher Beitrag zur Anpassung der Landwirtschaft an die Klimaänderungen geleistet werden müssen. Dabei wird ein beträchtlicher Teil dieser Aufgaben nicht nur durch die private Pflanzenzüchtung sondern auch durch universitäre und ähnliche Forschungseinrichtungen sowie die Ressortforschung (z.B. BBA) bearbeitet.

In Hinblick auf die zunehmende Klimaerwärmung und Klimavariabilität scheinen folgende züchterische Aktivitäten von Bedeutung:

- die Anpassung der Entwicklungsrate der Pflanzen an die geänderten Tem-

- peratur- und Niederschlagsbedingungen;
- die Verbesserung der Hitze- und Trockenstresstoleranz¹⁰⁷ traditioneller Kulturpflanzen, insbesondere während sensibler Entwicklungsphasen, sowie die Bereitstellung von Saatgut von (neuen) Wärme liebenden Kulturpflanzen;
 - die Erhöhung des Wachstums- und Ertragspotentials der Kulturpflanzen zur optimalen Ausnutzung des CO₂-Effekts auf die Photosyntheserate; und
 - die Gewährleistung hoher stofflicher Qualität unter veränderten Wachstumsbedingungen;
 - auch die erwartete Zunahme von Schädlingen und Krankheiten und u.U. zunehmende troposphärische O₃-Konzentrationen stellen neue Herausforderungen an die Resistenzzüchtung.

Bei einer detaillierten Betrachtung der regionalen Auswirkungen der Klimaveränderungen nehmen die Anforderungen an die Pflanzenzüchtung zu. Gleichzeitig steigen auch die Anforderungen an den Landwirt, in dem zunehmend spezifischeren Sortenangebot die für seinen Standort optimale Sorte auszuwählen (Koch, 2007). Ein Kernproblem besteht allerdings darin, dass einige Zuchtziele nur schwer miteinander vereinbar sind, wie v.a. Ertragsleistung, Resistenzeigenschaften und Qualität.

¹⁰⁷ U.U. auch Salzstresstoleranz, da in einigen Regionen, in denen bereits heute bewässert wird, wie z.B. in Unterfranken, zukünftige Versalzungsprobleme erwartet werden (mündliche Mitteilung Fr. Dr. Schneider Uni Würzburg).

Über die Klimaerwärmung hinaus stellt auch die Neuausrichtung der Verwertung, wie v.a. im Rahmen der Nutzung erneuerbarer Energien, neue Herausforderungen an die Pflanzenzüchtung.

Von der Entwicklung einer Sorte bis zu ihrer Markteinführung vergehen in Abhängigkeit von Züchtungsverfahren und Fruchtart ca. 10 bis 15 Jahre. Bei einer allmählichen Klimaerwärmung könnte man also davon ausgehen, dass die Züchtung im Laufe dieser Zeit mehr oder weniger automatisch daran angepasste Sorten selektiert bzw. noch Zeit hat, sich auf die wandelnden Umweltbedingungen einzustellen (Porter und Steffen, 2004). Andererseits müssen für eine kompetitive Landwirtschaft rechtzeitig die Weichen gestellt werden (Richards, 2002; Koch, 2007; Lütke-Entrup, BDP-GFP, mündliche Mitteilung).

Eine größere Herausforderung und ein aktives Zuchtziel stellt dagegen die Anpassung des Sortenspektrums an die zunehmenden Klimaextreme, wie Dürreperioden und Starkniederschläge dar. Als problematisch könnte sich dabei erweisen, dass während der Domestizierung der Kulturarten bereits ein Großteil der genetischen Vielfalt verloren ging (Araus *et al.*, 2002) und insbesondere zwischen Hochleistungssorten sehr enge Verwandtschaftsbeziehungen bestehen (Groth und Krupa, 2000). Eine weitere Einschränkung liegt darin, dass heute die Welternährung größtenteils nur noch von zehn Arten abhängt (NABU, 2006). Um den Genpool zu erweitern und damit die Adaptionsfähigkeit zu erhöhen, erfolgt deshalb häufig eine Einkreuzung von gewünschten

Merkmale, wie z.B. verschiedenen Resistenzen, aus Wildformen. So wurden z.B. durch die Einkreuzung von *Rizomania*-Resistenzgenen aus *Beta maritima*-Wildrüben in Kulturrüben innerhalb kürzester Zeit Hochleistungssorten mit universeller Anbaueignung entwickelt (Koch, 2007). Allerdings führen die hohen Kosten dazu, dass nur die wichtigsten Anbaukulturen züchterisch bearbeitet werden.

Die Verwendung biotechnologischer und gentechnischer Methoden – v.a. von Markermethoden – kann dabei den klassischen Züchtungsprozess beschleunigen (EPSO, 2005). Die erheblichen Anstrengungen zur Charakterisierung von Genpools, wie z.B. in einem EU-weiten Forschungsprojekt zur Zuckerrübe, helfen dabei, Stresstoleranzgene zu identifizieren und Selektionsmöglichkeiten für die praktische Züchtung zu erschließen (Koch, 2007). Weltweit nimmt auch der Anteil gentechnisch veränderter Kulturpflanzen zu, wobei in Europa allerdings insbesondere von Seiten der Konsumenten Vorbehalte gegenüber der Freisetzung gentechnisch veränderter Organismen bestehen. Während die grüne Gentechnik bisher überwiegend eingesetzt wurde, um Resistenzen gegen spezifische Insekten und Herbizide zu erzeugen, wie im Falle des Bt-Maises oder des „Roundup¹⁰⁸-ready“ Soja, werden in Zukunft zunehmend kombinierte Eigenschaften, wie Virus-, Pilz- und Bakterienresistenzen, Produktqualität und Salztoleranz im Visier der Züchtung stehen (EPSO, 2005). So befindet sich z.B. eine gentechnisch veränderte Maissorte kurz vor der Markteinführung, die über eine um fast 100% ge-

steigerte Wassereffizienz verfügt (mündliche Mitteilung Voegler, Monsanto, DLG-Pflanzenbautagung 2007). Auch zu Reis existiert ein groß angelegtes Projekt zur Entwicklung einer trockenstress-toleranten Sorte, dem so genannten „green super rice“, der durch Hinzufügen einzelner Gene ein deutlich umfangreicheres Feinwurzelsystem entwickelt (Koch, 2007).

Dabei stehen für die Entwicklung transgener stresstoleranter Pflanzen eine ganze Reihe verschiedener Ansätze zur Verfügung, wie z.B. die Übertragung der Eigenschaft der Produktion von so genannten *Osmoprotektoren*, die bewirken, dass Wasser verstärkt in der Zelle zurückgehalten wird; der Einbau eines Gens, das die Produktion von *Trehalose* kodiert, das bestimmte Zellstrukturen bei Austrocknung erhält; oder die Transformation eines *Transkriptionsfaktors*, der multiple Stresstoleranzgene reguliert (Teufel, 2005; Öko-Institut, 2004). Neben der Trockenstresstoleranz sind weltweit auch enorme Fortschritte in Bezug auf eine deutlich verbesserte Nährstoffeffizienz und eine sprunghaft gesteigerte Biomasse einzelner Ernteorgane gemacht worden, die zusammen mit der exponentiell anwachsenden Patentanmeldung das Potential verdeutlichen, dass diese Techniken für die Pflanzenzüchtung der Zukunft bringen könnten (Koch, 2007).

Da die meisten Kulturarten bereits heute über weite Klimabereiche angebaut werden, ist aber auch mit klassischen Züchtungsmethoden die Selektion besser adaptierter Sorten unter Ausnutzung der Vielfalt des kultureigenen Pflanzengenoms möglich. Hilfreich ist in diesem Zusam-

¹⁰⁸ Totalherbizid auf der Basis von Glyphosphat.

menhang, dass die meisten Züchter international operieren und auch Kontakte zu internationalen Genbanken und Forschungszentren, wie z.B. dem CIMMYT im Falle des Weizens und des Mais in Mexiko, bestehen oder auch zu Forschergruppen aus anderen Klimabereichen, wie z.B. Australien. Letzteren gelang es jüngst mit *Drysdale* eine besonders wassereffiziente Weizensorte zu züchten (Richards, 2002; EPSO, 2005). Das weltweit akkumulierte züchterische Know-how könnte auch für künftige mitteleuropäische Klimabedingungen interessant werden.

Allerdings erfordert die Verwendung *allochthonen*, d.h. gebietsfremden Zuchtmaterials Anpassungen an die regionalen Standortbedingungen, da sich neben dem spezifischen Temperatur- und Niederschlagsregime auch Bodeneigenschaften, Managementbedingungen und andere Umweltfaktoren, wie z.B. Strahlungsverhältnisse und die Photoperiode verändern. So bleibt für mitteleuropäische Anbaubedingungen eine ausreichende Winterhärte ein wichtiges Zuchtziel (z.B. Gudleifson, 2005). Bei zunehmend wärmeren Herbst- und Wintertemperaturen muss die Härtung voraussichtlich verstärkt über die Photoperiode gesteuert werden, um Ertragsverluste durch Auswintern zu vermeiden. Hier sind regionale Anpassungen erforderlich: während in atlantisch beeinflusstem Klima die Ausnutzung von milden Wintertemperaturen für die Biomasseproduktion genutzt werden kann, erhöht dies in stärker kontinental geprägten Klimaten die Frostgefahr¹⁰⁹ (Humphreys *et al.*, 2006).

Auch an die sich verändernden Vegetationszeiten wird voraussichtlich eine züchterische Anpassung notwendig werden (Kobiljski und Denčić, 2001). Hierbei eröffnet der sehr unterschiedliche Wärmesummenbedarf unterschiedlicher Genotypen einen erheblichen Spielraum (Arbol und Ingram, 1996; Rosenzweig und Hillel, 1998a): für Weizen z.B. benötigen frühreife Sorten nur 750, spätreife Sorten bis zu 1300°C d und die Optimumtemperaturen variieren von 17 bis 23°C, mit einem oberem Limit zwischen 30 und 35°C nach verschiedenen in Rötter und van der Geijn (1999) zitierten Arbeiten. Da entscheidende phänologische Phasen, wie z.B. Blühbeginn, jedoch im Allgemeinen über die Photoperiode gesteuert werden (Körner, 2006), sind u.U. auch Anpassungen der Photoperiodizität notwendig.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Züchtung resistenter Kulturpflanzen liegt darin, dass es sich bei Stressfaktoren im Allgemeinen um komplexe Merkmale handelt (Wang *et al.*, 2003). Außerdem dämpfen in einigen Fällen geringe genotypische Sortenunterschiede die Hoffnung auf züchterische Anpassung, wie z.B. bei der Reaktion von Zuckerrübe auf Trockenstress (Bloch und Hoffmann, 2004). Zudem existiert für den Ertrag eine geringe Vererbbarkeit und eine starke Interaktion zwischen dem Genotyp und der Umwelt (Jackson *et al.*, 1996). Hinzu kommt, dass robuste Arten auf Grund der in der Regel negativen Korrelation zwischen den Merkmalen Qualität, Resistenzniveau und Ertragsleistung im Allgemeinen nicht im stark nachgefragten Hochleistungssortiment angesiedelt sind. Dies liegt z.B. auch daran, dass Biomasse, die in ein intensiv

¹⁰⁹ So besagt z.B. eine alte Bauernregel: wenn im Januar die Frucht auf dem Felde wächst, wird sie teuer.

ausgeprägtes Wurzelsystem investiert wird, nicht primär dem Ertragsindex (HI) zu gute kommt. Bei der Zuckerrübe kommt hinzu, dass ein umfangreiches Feinwurzelsystem den Erdanhang vergrößert, was sich für die Ernte als nachteilig erweist (Koch, 2007). Weiter reichern diese Pflanzen unter ungünstigen osmotischen Verhältnissen quantitativ Pflanzeninhaltsstoffe an, die die Ausbeuteverluste zum Teil deutlich erhöhen. Auch die Resistenz hat ihren Preis: zur Abwehr pilzlicher Blatt- und Wurzelereger bilden die Pflanzen Proteine, die ebenfalls die Energie- und Stoffbilanz der Pflanze belasten und so zu Ertragsverlusten führen können. Allerdings ist davon auszugehen, dass mit zunehmendem Wissen um die physiologischen und morphologischen Voraussetzungen der Pflanzen und der dafür verantwortlichen Gene auch so komplexe Eigenschaften wie Stresstoleranzen für die Züchtung realisierbar werden.

Auf weniger günstigen Standorten können sich jedoch bereits heute geringere Ertragserwartungen im Jahresverlauf auszahlen, da Stress tolerante Sorten weniger im Ertrag streuen. Besonders gute Erfahrungen werden hier mit Hybridsorten gemacht, die bei insgesamt sehenswerter Ertragsleistung u.a. auf Grund ihres gut ausgebildeten Wurzelsystems auch unter Stressbedingungen relativ ertragsstabil sind. Ein weiterer Vorteil von Hybridsorten, wie z.B. Hybridweizen, ist die gleichmäßig hohe Produktqualität, die für die verarbeitende Industrie, wie z.B. Mühlen etc., interessant ist (Saatenunion, 08.2002). Ein Nachteil besteht in den deutlich höheren Saatgutkosten, die durch geringe Saatstärken jedoch reduziert werden

können. Die so genannten „*Escape*“-Strategie verfolgt einen anderen Ansatz: hier wird keine Stresstoleranz, sondern Stressvermeidung angestrebt. Bei ausgeprägter Frühsommertrockenheit kann diese eine sinnvolle Alternative darstellen, wobei allerdings auch in diesem Fall die Ertragssicherheit auf Kosten der Ertragsleistung geht.

Um den CO₂-Düngeeffekt optimal ausnutzen zu können, ist die Erhöhung des Wachstums- und Ertragspotentials der bisher an geringere atmosphärische Kohlendioxidkonzentrationen angepassten Kulturpflanzen (Richards, 2002) notwendig. Kritisch ist in diesem Zusammenhang, dass neuere Sorten offensichtlich deutlich weniger auf den CO₂-Düngeeffekt reagieren als ältere Sorten, wie z.B. von Manderscheid (1996) für Sommerweizen beobachtet. Generell kann eine höhere Assimilatnutzung durch eine verbesserte Senkenstärke und Translokation von Assimilaten im Phloem erfolgen (Allen *et al.*, 1996). Hier empfiehlt sich speziell die Selektion von Sorten, die eine geringe Akklimatisation auf die Photosynthesestimulierung (s. Kapitel 4.1.2) aufweisen. Zusätzlich kann die Effizienz der Photosynthese durch die Züchtung von Pflanzen erhöht werden, die engere und aufrechtere Blätter besitzen mit optimierter Ausrichtung und Reflektion sowie einer langen Lebenszeit (Kobiljski und Denčić, 2001). Bei Getreidepflanzen weist ein hoher Ernteindex auf eine gute Assimilatausnutzung hin. Allerdings können sich die damit verbundenen kürzeren Halme unter Trockenstress auch negativ auswirken, da dann die in den Internodien gespeicherten Assimila-

te die Versorgung der Körner übernehmen (Loss und Siddique, 1994).

Der Ernteindex kann weiter durch die Erhöhung der Kornzahl pro Ähre oder auch eine stärkere Bildung von Seitentrieben verbessert werden (Lawlor und Mitchell, 2000), was allerdings wiederum eine ausreichende Wasserversorgung voraussetzt. Letzteres – wie auch verstärktes Wurzelwachstum – könnte ohnehin eine Reaktion auf erhöhte CO₂-Gehalte in der Atmosphäre darstellen (Hall und Ziska, 2000). Bei zunehmendem Trockenstress müsste diese demzufolge eher züchterisch eingeschränkt werden (Richards, 2002). Auch die genetische Festlegung der Korngröße stellt noch eine Herausforderung an die Züchtung. Weitere Maßnahmen stellen die Verlängerung der Kornfüllungszeit und Verkürzung der vegetativen Periode dar, sofern die Klimabedingungen dies zulassen. Um unter veränderten Wachstumsbedingungen weiterhin eine hohe stoffliche Qualität zu gewährleisten, muss voraussichtlich der Gehalt an Inhaltsstoffen, wie insbesondere Proteinen und sekundären Pflanzenstoffen erhöht werden (Hall und Ziska, 2000; Richards, 2002) bzw. mit Hilfe von temperaturtoleranten Sorten Veränderungen durch Hitzeeinwirkung vermieden werden. Auch um schädliche Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Ertragsbildung zu reduzieren, ist die Auswahl von Sorten anzustreben, die eine möglichst geringe Sensitivität gegenüber Hitzeeinwirkung aufweisen (Allen *et al.*, 1996).

Neben der Züchtung spielen auch Anpassungsmaßnahmen durch die Modernisierung der Produktionsverfahren, d.h. die

Entwicklung hocheffizienter Be- und Entwässerungstechnik und standortangepasster Bearbeitungssysteme eine große Rolle (Kurukulasuriya und Rosenthal, 2003). Beispiele sind hier u.a. die Weiterentwicklung des ressourcensparenden CULTAN-Verfahrens oder auch *Precision Farming* sowie wassersparender Tröpfchenbewässerung. Auch die Förderung der Mykorrhizierung der Pflanzenwurzeln kann die Nährstoff- und Wasserversorgung der Kulturen verbessern. Das gleiche wurde bei Inokulieren mit endophytischen Pilzen festgestellt (Hahn *et al.*, 2004). Dieses Verfahren wird in Australien bereits schon seit einigen Jahren erfolgreich eingesetzt, um die Nährstoffverfügbarkeit bei gleichzeitig reduzierter Düngung und Auswaschungsgefahr zu verbessern; erste Versuche dazu laufen auch in Großbritannien (DLG-Mitteilungen 7/2007).

In Deutschland bereits in der Umsetzung befindliche Züchtungsziele

Wie bereits erwähnt existieren bereits heute eine Reihe von robusten Hybridsorten für Trockenstandorte und zahlreiche Programme zur Erhöhung der Stresstoleranz von Kulturpflanzen (s. dazu auch Kap. 6.1).

5.2 Anpassung der Nutztierhaltung an Klimaveränderungen

In Anlehnung an Beede und Collier (1986) können drei Strategien verfolgt werden, um Auswirkungen von Hitzestress auf Nutztiere zu reduzieren:

1. die physikalische Veränderung der Umgebung;
2. die genetische Entwicklung hitzeteraler Rassen; und
3. die Verbesserung des Nährstoffmanagements.

Dabei sollten – ebenso wie im Pflanzenbau – mittel- und langfristige Anpassungsmaßnahmen, wie insbesondere die Züchtung und die geplante Anpassung an veränderte Umweltbedingungen einschließlich Auswirkungen auf Krankheiten und Schädlinge durch staatliche Förder- und Forschungsprogramme unterstützt werden (Abildtrup und Gylling, 2001).

Die physikalische Veränderung der Umgebung

Vor allem für intensive Tierzuchtbetriebe, wie Geflügel- und Schweinezucht, werden Investitionen in Kühlungssysteme notwendig werden (Turnpenny *et al.*, 2001), sofern sie noch nicht bereits vorhanden sind. Andernfalls ist eine deutliche Reduzierung der Stallbelegung notwendig. In der britischen Studie ECCLIPS (Effect of Climate Change on Livestock Production Systems; DEFRA, 2000) nahm z.B. der Hitzestress bei Geflügel trotz eines 10%igen Anstiegs des Energieverbrauchs für Lüftung zu. Andernfalls müsste die Belegung um 12% reduziert werden, um den Hitzestress auf dem aktuellen Niveau zu halten. Für intensive Schweinezucht nahm der Stresspegel trotz zunehmender Energiekosten in der Modellstudie sogar noch mehr zu.

In der Rinderzucht wird die Gebäudekonstruktion zunehmend an Bedeutung ge-

winnen: neben speziellen Systemen zur Dachabkühlung durch die Anpflanzung stark transpirierender Vegetation¹¹⁰ (mündliche Mitteilung Georg, 2007) ist hier v.a. bei Material und Ausrichtung darauf zu achten, dass der Stall möglichst wenig aufheizt. Auch die Oberflächenabkühlung durch Zweiflächenbuchten könnte Abhilfe schaffen (Rath *et al.*, 1994). International setzt sich immer mehr eine Stallkonstruktion aus Planen durch, die bei Bedarf zur Belüftung aufgerollt werden können. Zusätzlich wird bei zunehmender Erwärmung und häufiger auftretenden Hitzeperioden die aktive Ventilation von Ställen notwendig werden. Allerdings reduziert nach Hillman *et al.*, (2005) Ventilierung nur zusammen mit Sprinkleranlagen für Milchkühe den Hitzestress und bewirkt eine deutliche Erhöhung der Milchleistung (Broucek *et al.*, 2006). Auch die Beregnung direkt vor dem Melken erhöht das Wohlbefinden der Kühe und die Milchausbeute (Gallardo *et al.*, 2005).

Bei Weidesystemen könnte z.B. durch Agroforstsysteme (Fischer *et al.*, 2005) dem zunehmenden Bedarf nach Schatten und Schutz vor zu intensiver Strahlung Rechnung getragen werden. Auch offene Wasserstellen helfen bei der Thermoregulation der Tiere. Befürchtungen, dass die Befeuchtung von Weiderindern zu einem erhöhten Besatz mit Pathogenen führen könnte, konnten von Morrow *et al.* für Beregnung (2005) verneint werden. Dagegen könnte bei Extensivhaltung verstärkter Niederschlag im Winter die Notwendigkeit der Stallhaltung und Fütterung erhöhen. Bei geringerer Produktivität von

¹¹⁰ Hierdurch konnte eine Temperaturreduktion im Stall von 5°C erreicht werden.

Weiden und Wiesen muss außerdem die Bestockungsrate und das Weidemanagement angepasst werden (Abildtrup und Gylling, 2001). Bei extremer Sommertrockenheit und geringer Futterproduktivität können z.B. Futterbänke, wie in Agroforstsystemen verbreitet, oder die Konservierung von Futter Alternativen darstellen. Die entsprechende Stressvermeidungsstrategie wäre die Verlagerung der Tierzucht in kühlere Regionen (NFU, 2005); allerdings sind die Dislokationskosten als sehr hoch einzuschätzen (OECD, 2002).

Die mit der Klimaerwärmung zunehmende Notwendigkeit der Installation von kostenintensiven Kühlsystemen gilt auch für den Transport von Tieren (NFU, 2005) und von Tierprodukten, wie z.B. Milch. Ohnehin ist mit der Klimaerwärmung generell ein Anstieg von Infektionen über Nahrungsmittel zu befürchten (Hall *et al.*, 2002). Da die passive Ventilation bei Stillstand der Transporter ausfällt, gibt es z.B. in den südlichen Bundesstaaten der USA bereits Lüftungsboxen für Kühlstopps (DEFRA, 2000).

Die genetische Entwicklung hitzetoleranter Rassen

Die Adaptionsfähigkeit großer Wiederkäuer ist generell sehr hoch (DEFRA, 2000). Darüber hinaus kann die Züchtung die Hitzeresistenz über die Dichte und das Verteilungsmuster der Schweißdrüsen beeinflussen. Ähnlich wie in der Pflanzenzüchtung stellt sich allerdings das generelle Problem dar, dass im Allgemeinen eine Korrelation zwischen Hitzestress-Toleranz und niedrigerer Produktionscharakteristika bei Nutztieren herrscht (Bindi und How-

den, 2004). Diese zeigt sich neben der höheren Hitzeanfälligkeit von Hochleistungsmilchkühen (West, 2003) u.a. auch bei mediterranen Milchschaften (Finocchiaro *et al.*, 2005). Das stellt besondere Herausforderungen an das Einkreuzen hitze- und trockenstresstoleranterer Rassen arider Gebiete, wie dem mittleren Osten, Afrika oder Australien (NFU, 2005). Andererseits erbringen z.B. Holstein Frisian-Kühe, die sich genetisch nur geringfügig von den in Deutschland genutzten Rassen unterscheiden, unter extremen Wärmebedingungen in Kalifornien oder Israel enorme Milchleistungen (s.o.; Rath *et al.*, 1994).

Die Verbesserung des Nährstoffmanagements

Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Strategien zur Kompensation der verringerten Futteraufnahme unter Hitzestress durch die Erhöhung der Energiekonzentration sowie der Reaktion auf hierbei veränderte Nährstoffbedürfnisse, wie z.B. auch von West (2003) und Fuquai (1981) beschrieben. Diese werden von Savoini und Moretti (2006) ausführlich für Milchkühe zusammengestellt: um die Futteraufnahme möglichst hoch zu halten, sollte danach die Nährstoffdichte der Ration erhöht werden. Gallardo *et al.* (2005) berichten z.B. von einer um 10% erhöhten Milchausbeute durch konzentratreichere Futterzusammensetzung. Dabei darf allerdings ein gewisser Rohfaseranteil für Verdauung und Milchfettanteil nicht unterschritten bzw. das Limit für im Pansen von Wiederkäuern verdauliches Eiweiß nicht überschritten werden. Ein wichtiger weiterer

Gesichtspunkt ist die Verdaubarkeit des Futters: besonders günstig ist z.B. Spätheu und Ganzpflanzensilage, deren Anteil entsprechend erhöht werden kann.

Weitere unterstützende Maßnahmen sind z.B.:

- das Splitten von Rationen und eine ausreichende Zufuhr von möglichst kaltem Wasser;
- Futter, das während der Verdauung zu einer stärkeren Wärmeentwicklung führt, wie z.B. Grünschnitte mit einem hohen Anteil an nicht-strukturbildenden Kohlenhydraten oder auch hohen Ballaststoffgehalten, sollte bevorzugt abends gefüttert werden, wie überhaupt die Futteraufnahme in die kühleren Abendstunden verlegt werden sollte; dagegen führt Fett bei der Verdauung zu einer geringeren Wärmeentwicklung, so dass sein Anteil in der Ration heraufgesetzt werden kann;
- die Beeinflussung der Qualität des Grünfutters, die sich im Jahresverlauf verändert, durch die Schnitt- bzw. Weidefrequenz (Fuquai, 1981);
- eine ausreichende Versorgung mit Mineralstoffen, da beim Schwitzen vermehrt Salze ausgeschieden werden und der Bedarf unter Hitzestress erhöht ist; dabei sollte insbesondere auf eine ausreichende Versorgung mit Antioxidantien geachtet werden.

Auch bei Schweinen empfiehlt sich eine Verlagerung der Fütterungszeiten in die Abendstunden (Holt *et al.*, 2004); darüber hinaus ist eine Reduktion der Futtermenge angebracht. Bei Masthähnchen unterstützt

eine frühzeitige Abhärtung gegen Hitze sowie ebenso verringerte Futtermengen die kurzfristige Akklimatisation. Darüber hinaus unterstützen zusätzliche Vitamin- und Mineralstoffgaben den Elektrolyt- und Wasserhaushalt (Lin *et al.*, 2006).

5.3 Anpassungsmaßnahmen der landwirtschaftlichen Beratung

Die Durchführung von Anpassungsmaßnahmen ist oft nicht selbstverständlich sondern hängt von Investitionen in Forschung, Infrastruktur und Beratung ab (Rosenzweig und Hillel, 1998c; IPCC, 2007b). Eine wichtige Rolle spielen dabei Einrichtungen der landwirtschaftlichen Beratung (Reilly und Schimmelpfennig, 1999), wie z.B. Landwirtschaftsämter und Kammern, Behörden oder auch Verbände, wie die Deutsche Landwirtschaftliche Gesellschaft (DLG), der Deutsche Bauernverband, das Deutsche Maiskomitee, etc. Neben der Durchführung eigener Feldversuche zur landwirtschaftlichen Praxis mit regionalem Bezug sind auch die Sortenprüfungen eine wichtige Funktion der Landesversuchsanstalten. Auf Grund der Abhängigkeit des Ertrags von Interaktionen zwischen Genotyp und Umwelt sind diese Untersuchungen eine Voraussetzung für regionale Anbauempfehlungen.

Während in speziellen Veranstaltungen in der Regel bereits auf die Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Landwirtschaft und mögliche Anpassungsmaßnahmen eingegangen wird und auch zahlreiche Informationen in den jeweiligen Internetauftritten zur Verfügung stehen,

stellt die Aufnahme dieses Themenkomplexes in laufende und neue Versuche in der Regel noch ein wichtiges Ziel dar. Denn nur so können wichtige „best-practise“-Empfehlungen zur Handhabung, Wirtschaftlichkeit und Effizienz der verschiedenen Anpassungsstrategien an die Landwirte weitergegeben werden. Dies ist notwendig, da durch die Klimaveränderungen alt bekanntes Wissen zu Witterungsverhältnissen und betriebsinternem Management seine Bedeutung verlieren könnte (Quiggin und Horowitz, 2003). Ein Monitoring der eintretenden Klimaveränderungen kann darüber hinaus das Verständnis für die Notwendigkeit von und eine Basis für Anpassungsmaßnahmen schaffen (DEFRA, 2000).

In Deutschland bereits existierende Maßnahmen

Spezielle Programme zur Anpassung an den Klimawandel existieren bisher nur in wenigen Bundesländern (s. Interviews im Anhang; Zebisch *et al.*, 2005): so werden z.B. in *Mecklenburg-Vorpommern* von der LfA konservierende Bodenbearbeitungsmaßnahmen entwickelt und die Ausdehnung wassersparender Anbaumethoden und die Einführung wärmeliebender Kulturpflanzen, wie z.B. Soja, gefördert. In *Sachsen* betreibt die LfL einen Feldversuch, in dem verschiedene Maßnahmen der Anpassung an den Klimawandel getestet werden: hierzu gehören neben Bodenbewirtschaftungsvergleichen auch der Einsatz von Bewässerung, Versuche zur Fruchtfolge und zum Krankheitsaufkommen. In *Brandenburg* werden Bewässerungs- und Drainagemaßnahmen sowie die

Schaffung von Kulturlandschaften gefördert und in der zweiten Phase des Glowa-Elbe-Projektes wird untersucht, wie Ertragsverluste durch den Anbau von alternativen Kulturen oder besser an Trockenheit angepassten Sorten vermieden werden können.

5.4 Weitere Anpassungsmaßnahmen

Neben den bereits beschriebenen Anpassungsstrategien, die darauf ausgerichtet sind, sich durch den Klimawandel eröffnende Potentiale zu nutzen bzw. Ertragsverluste durch Klimaauswirkungen möglichst gering zu halten, gibt es auch die Möglichkeit, Einbußen hinzunehmen oder Verluste zu teilen, z.B. über private oder auch staatlich subventionierte Versicherungen. Weitere Anpassungsmaßnahmen betreffen vor- und nachgelagerte Betriebe bis hin zum Verbraucher, der sein Konsumverhalten an ein sich änderndes Angebot bzw. Preise anpassen wird (und *vice versa*). Im weitesten Sinne könnte man auch Wetterdienste hierunter fassen, da genauere und langfristige Wetterprognosen vorausplanende Anpassungsmaßnahmen durch die Landwirtschaft häufig erst ermöglichen.

Versicherungen

In Deutschland existiert für die Landwirtschaft bisher nur die klassische Hagelversicherung zur Absicherung von Ertragsausfällen durch Extremwetterereignisse. Diese Versicherung deckt nur ca. 20% der tatsächlichen Schäden (Gehrke,

2007) und wird von ca. 70% der Ackerbauern abgeschlossen (Thies, 2007). Die Vereinigte Hagelversicherung plant in Zukunft diese Versicherung auch auf Schäden durch Sturm, Frost, Auswinterung und Starkregen auszuweiten (Gehrke, 2007). Die Erweiterung der Versicherungsfälle auf die wichtigsten Extremereignisse, wie insbesondere Hitze- und Dürreschäden, in Form einer Mehrgefahrenversicherung, wie sie in einigen europäischen Ländern¹¹¹ und in den USA unter Beteiligung des Staates angeboten wird, ist zurzeit in der Diskussion (z.B. Vereinigte Hagel, 2002), die unter dem Eindruck des Dürremonats April 2007 nochmals intensiviert wurde (Thies, 2007). Ohne staatliche Beteiligung ist diese für Versicherer und Verbraucher wahrscheinlich uninteressant, da die Policen in vulnerablen Regionen sehr hoch ausfallen müssten. Auch eine EU-weite Harmonisierung ist angedacht; auf Grund der Vielfalt der landwirtschaftlichen, klimatischen, wirtschaftlichen und politischen Bedingungen in den Mitgliedsländern erscheint allerdings ein Rahmenkonzept mit einzelstaatlichen Anpassungen sinnvoll (Schweizer Rück, 1998).

Bei dem Abschluss von Versicherungen handelt es sich allerdings nicht um eine Anpassungsmaßnahme im engeren Sinne. Ganz im Gegenteil, die Schadenserstattungen können wesentliche Anpassungsmaßnahmen an zunehmenden Trockenstress verhindern (Rosenzweig und Hillel, 1998c; Abildtrup und Gylling, 2001). Eine weitere Form der Risikominderung durch Extremereignisse stellt der Erwerb von Wetterderivaten dar, für die sich in den

USA bereits ein florierender Markt entwickelt hat. Wetterderivate sind derivative Finanzinstrumente, denen als Basiswert keine handelbaren Güter oder Finanztitel, sondern stattdessen Witterungskennwerte wie Temperatur oder Niederschlag zugrunde liegen. Sie zielen auf eine Ausgleichszahlung bei ungünstiger Entwicklung des betrachteten Wetterindex ab. Da ihre Wirksamkeit jedoch noch weitgehend unbekannt ist (Mußhoff und Appel, 2007), besteht hier noch ein beachtlicher Forschungsbedarf¹¹².

Vor- bzw. nachgelagerte Betriebe

Veränderungen in der landwirtschaftlichen Praxis haben eine Reihe von Auswirkungen auf vor- und nachgelagerte Betriebe. So müssen sich zum einen Düng- und Pflanzenschutzmittelbetriebe auf die sich verändernden Anforderungen einstellen. Zum anderen können sich auch andere Ansprüche an die Betriebstechnik ergeben. Zur Absicherung der Ernte könnten z.B. ausreichende Druschkapazitäten noch wichtiger werden (Dölger und Heubach, 2007). Auch die verarbeitende Industrie bzw. Logistikbetriebe, wie Häfen und Speicher, werden von Verschiebungen der Anbaugürtel betroffen sein, da sich Transportwege verändern und Standorte, die zu weit von der Produktion entfernt liegen, unrentabel werden können (IGER, 2003). Bei zunehmendem Ertragsrisiko muss zudem u.U. die Lagerhaltung ausgebaut werden (Eitzinger, 2007). Dies kann letztendlich auch Auswirkungen auf Infra-

¹¹¹ Z.B. in Spanien, Portugal, Österreich, Griechenland, Luxemburg und in Kürze auch in Polen.

¹¹² Zur Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von Wetterderivaten im Agribusiness laufen z.B. an der Uni Bonn Forschungsarbeiten.

wirtschaft, die nach Wall und Smit (2005) eine inhärente Anpassung an den Klimawandel impliziert. Sollte in einigen Regionen die landwirtschaftliche Produktion unrentabel werden, muss die Schaffung alternativer Einkommensquellen ins Auge gefasst werden (IPCC, 2007b). Auch die Flexibilisierung der Agrarpolitik in Hinblick auf innovationshemmende Subventionen (Olesen und Bindi, 2002) und die Öffnung zum Weltmarkt sind notwendige Anpassungsmaßnahmen (Rosenzweig und Hillel, 1998c). Denn so lange sich Landwirte z.B. bereits vor Beginn der Vegetationsperiode auf eine Feldfrucht festlegen müssen, bleibt für witterungsbedingte Anpassungen kein Spielraum mehr.

Global gesehen, ist davon auszugehen, dass die landwirtschaftliche Produktion in tropischen und subtropischen Regionen in Folge der Klimaerwärmung eher zurückgehen wird (Fischer *et al.*, 2005; Parry *et al.*, 2005; IPCC, 2007b). Auf Grund der bereits heute vorherrschenden hohen Temperaturen wird dort schneller das Optimum für das Pflanzenwachstum überschritten. Zunehmende Dürreperioden und z.T. begrenzte Wasser-, technologische und finanzielle Ressourcen begrenzen zusätzlich die Anpassungsfähigkeit (Mendelsohn, 2000), wenn auch zahlreiche Maßnahmen der bilateralen und internationalen Kooperation (z.B. FAO, 2007) darauf ausgerichtet sind, dem entgegen zu wirken. Außerdem ist mit einer weiteren Degradierung sowie Ausdehnung von Trockengebieten¹¹⁴ durch zu intensive Landnutzung einschließlich Bewässerung zu rechnen. Für die globale Ernährungssicherheit wird

deshalb voraussichtlich eine höhere Nahrungsmittelproduktion in den klimatischen Gunstregionen, wie u.a. Europa (Olesen und Bindi, 2002) – notwendig werden, was nach bisherigen Modellsimulationen auch möglich sein sollte (Parry *et al.*, 2005). Dies könnte es allerdings sinnvoll erscheinen lassen, die bisherige Tendenz zu Flächenstilllegungen und Produktionsbegrenzung innerhalb der EU umzukehren, zumal sich bereits heute eine zunehmende Flächenkonkurrenz zur Biomasserzeugung abzeichnet. Preisveränderungen, d.h. voraussichtlich weiter steigende Preise von landwirtschaftlichen Produkten auf Grund von Veränderungen im Verhältnis zwischen Nachfrage (steigend) und Angebot (sinkend) könnten auch eine Anpassung der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU erfordern.

In Deutschland (EU) bereits existierende Initiativen

Im Oktober 2006 wurde vom Bundesumweltamt die Erstellung einer nationalen Anpassungsstrategie initiiert (s. auch Workshopliste im Anhang), in der die Landwirtschaft bisher allerdings eher eine untergeordnete Rolle spielt. Darüber hinaus existiert eine Vielzahl von Forschungsvorhaben zur Klimafolgenanpassung, wie z.B. das Klimazwei-Projekt oder KLIMZUG des BMBF, sowie Initiativen auf den verschiedenen Verwaltungsebenen der Länder, um Fragen der Anpassung an die Klimaänderung stärker institutionell zu verankern. Auch auf europäischer Ebene existieren Initiativen zur Koordinierung der gemeinsamen Anpassungsstrategie und zur Integration der Anpassung in die

¹¹⁴ Bereits heute sind über 40% der Erdoberfläche Trockengebiete.

Europäische Klimaschutzpolitik – wie z.B. im Rahmen des Europäischen Klimaschutzprogrammes. Richtungsweisend ist in diesen Fragen u.a. das Grünbuch, das regelmäßig überarbeitet wird und dessen neueste Fassung Mitte 2007 vorgelegt wurde (KOM(2007) 354). Einzelne Regelwerke wurden bereits an die veränderten Anbaubedingungen angepasst: so ist z.B. mittlerweile bereits die Bewässerung im Weinanbau erlaubt.

6 Nationale und Internationale Forschung und Programme bzw. Maßnahmen zum Thema Klimawandel und Landwirtschaft

6.1 Deutschland

Neben den Forschungsaktivitäten innerhalb der BMELV-Ressortforschung zu zentralen Fragen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft und möglichen Maßnahmen zur Anpassung (SAG, 2006) beschäftigen sich zahlreiche weitere Einrichtungen mit dieser Thematik. Dabei handelt es sich zum einen um die Landesanstalten der Länder – überwiegend für Landwirtschaft, einschließlich Pflanzenbau, Wein- und Obstbau sowie Umweltschutz und Geologie. Aber auch Universitäten bzw. Fachhochschulen, Institute der Helmholtz-Gemeinschaft, Max-Planck- sowie verschiedene WGL-Institute (z.B. ZALF, PIK, ATB) und von Seiten der privaten Wirtschaft, Pflanzenzüchter und Versicherungsunternehmen etc. forschen und arbeiten zu diesem Thema. Im Folgenden werden einige Aktivitä-

ten ohne Anspruch auf Vollständigkeit vorgestellt; eine Zusammenstellung der in diesem Zusammenhang durchgeführten Interviews findet sich in Anhang 1 (s. auch Kapitel 1.2).

An der LfL Sachsen werden z.B. seit 2005 in dem länderübergreifenden Verbundprojekt „Entwicklung und Erprobung standortangepasster Anbausysteme unter besonderer Berücksichtigung der Klimaänderung“ Fruchtfolgen mit trockenoleranten Sorten an für Sachsen typischen Standorten erprobt. Darüber hinaus wird in Sachsen seit 1993 im Rahmen des Agrarumweltprogramms „Umweltgerechte Landwirtschaft (UL)“ konservierende Bodenbearbeitung und Mulchsaat gefördert. Boden(wasser-)schonende, im allgemeinen nicht-wendende Anbauverfahren sind auch in anderen Bundesländern – z.B. in Sachsen-Anhalt und Thüringen – auf Grund der geringeren Kosten verbreitet und sind auch für die Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) ein Thema. Des Weiteren fallen in den Bereich der Landesanstalten phänologische Erhebungen zusammen mit Wetteraufzeichnungen an landesweiten Versuchsstationen – z. B. für Getreide an der LLH Hessen und im Wein- und Obstanbau an der LVWO Baden-Württemberg. Dabei erfolgt auch eine indirekte Erfassung von Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Pflanzenbau und die Pflanzenzüchtung durch Landessortenprüfungen. Im Rahmen des Klimawandelprojektes BayFORKLIM wurden an der LfL Bayern Untersuchungen zu Auswirkungen der UV-Strahlung auf Gerste durchgeführt; ein weiteres Projekt zur Trockenresistenz befindet sich noch in der Durchführung.

Für eine beträchtliche Anzahl an Bundesländern sowie Gesamt-Deutschland wurden bereits regionale Studien zu den Auswirkungen künftiger Klimaveränderungen auf einzelne sozioökonomische Sektoren – u.a. die Landwirtschaft – und Anpassungsmaßnahmen durchgeführt (s. Kap. 4.6.1.1): so z.B. für Bayern (BayFORKLIM; Bayerischer Klimaverbund, 1999), Baden-Württemberg (KLARA; PIK, 2005), Hessen (INKLIM 2012; HLUG, 2005); Sachsen (Klimawandel in Sachsen. Sachstand und Ausblick; SMUL, 2005), Brandenburg (PIK Report No 83; Gerstengarbe *et al.*, 2003), sowie einzelne Regionen (Elbe, Weser, Märkisch-Oderland). Federführend waren bei den Studien entweder regionale Projektverbände unter Einbeziehung der Landesanstalten, Universitäten und sonstiger Einrichtungen oder das PIK und z.T. das ZALF.

Aktuell hat das BMBF das so genannte „Klimazwei“ Programm aufgelegt, das mit Forschungsprojekten zum Klimaschutz und zum Schutz vor Klimawirkungen sowohl der Mitigation als auch der Adaptation an Klimaveränderungen Rechnung trägt. Für den landwirtschaftlichen Bereich sind z.B. die Projekte „LandCare 2020 – Vorsorge und Gestaltungspotentiale in ländlichen Räumen unter regionalen Wetter- und Klimaänderungen“ und „Klio – Klimawandel und Obstbau in Deutschland¹¹⁵“ – interessant neben regionalen

Projektverbänden, wie z.B. der Metropolregion Hannover, Braunschweig und Göttingen, die im Rahmen des regionalen Managements von Klimafolgen auch den landwirtschaftlichen Sektor betrachten. Der weiteren Verankerung von Klimaveränderungen und Anpassungsmaßnahmen in die regionale Raumplanung und Entwicklung wird das neu aufgelegte, ebenfalls BMBF-finanzierte Forschungsprogramm „KLIMZUG“ dienen. In diesem Zusammenhang sind auch die Aktivitäten des UBA zu erwähnen, das mit der Einrichtung des Kompetenzzentrums Klimafolgen und Anpassung „KomPass“ einen wesentlichen Beitrag zur Vernetzung der nationalen Akteure und der Erarbeitung einer nationalen Anpassungsstrategie leistet.

Darüber hinaus existieren zahlreiche Forschungsaktivitäten an den Universitäten im landwirtschaftlichen Bereich, die sich sowohl direkt als auch indirekt mit Auswirkungen von Klimaveränderungen befassen: hierunter fallen z.B. Forschungsprojekte:

- zur Verbesserung der Stresstoleranz von Nutzpflanzen¹¹⁶, wie z.B. zur Verbesserung der Trockenstressresistenz von Weizen durch traditionelle und/oder gentechnische Pflanzenzüchtung an der TU München oder von Triticale an der Uni Hohenheim;
- zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Pflanzenkrankheiten u.a. an der Uni Göttingen;

¹¹⁵ Dieses Projekt widmet sich der besonderen Bedeutung der Schaderregerentwicklung im Obstbau; aufbauend auf den Untersuchungen in Süddeutschland wird das Gefährdungspotential im Obstbau durch veränderte Phänologie und Schaderregerdynamik untersucht und Möglichkeiten zur Anpassung aufgezeigt.

¹¹⁶ Einen Überblick gibt z.B. die homepage: <http://www.plantstress.de>.

- zur Bestimmung der Verdunstungsvariabilität verschiedener Kulturpflanzen unter sich ändernden klimatologischen Einflüssen und Modellierung der zukünftigen Verdunstung und der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt an der Uni Rostock;
- zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Ertragsentwicklung der wichtigsten Feld- und Gemüsekulturen an der Uni Hohenheim;
- zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Weinbau (Wasserverfügbarkeit und Bodenbearbeitung, Sortenverschiebung, Pathogene, UV-Strahlung) an der FH Geisenheim – um nur einige zu nennen.

Dabei werden einzelne Forschungsarbeiten zum Klimawandel zunehmend gebündelt und Klimaforschungsprogramme eingerichtet (z.B. an der Uni Hohenheim). Seitens der privaten Züchter liegt zunehmend ein Schwerpunkt auf Trockenstressresistenz von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, wobei neben Grundlagenforschung der Austausch mit internationalen Zentren erfolgt, wie z.B. CIMMYT, dem internationalen Zentrum für Mais- und Weizenforschung in Mexiko. Zu den Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Veredelungswirtschaft liegen noch recht wenig Erkenntnisse in Deutschland vor. Diese Lücke für die Rinderzucht zu schließen, hat z.B. das noch in der Planungsphase befindliche Forschungsverbundprojekt „ANIMACLIM“ unter Federführung des ZALF und Mitwirkung des Forschungsinstituts für die Biologie landwirtschaftlicher Nutztiere (FBN Dummerstorf) zum Ziel.

6.2 Europa und sonstiges Ausland

Innerhalb der EU bzw. Europas existieren eine Reihe von Initiativen und Programmen zur Förderung und Koordinierung der Klimafolgenforschung. Während in früheren Jahren neben der Mitigation der Schwerpunkt auf der Erforschung der Klimaveränderungen und ihrer möglichen Auswirkungen lag – z.B. in Projekten wie ESPACE¹¹⁷, CHIP¹¹⁸, ATEAM¹¹⁹, PRUDENCE¹²⁰ oder, speziell auf die Landwirtschaft ausgerichtet, das COST Action Projekt Nr. 734 „CLIVAGRI“¹²¹ – konzentriert sich die Forschung in jüngster Zeit zunehmend auf die Unterstützung und Planung nationaler sowie internationaler Anpassungsmaßnahmen an Klimaveränderungen (EEA, 2005). Entsprechend änderte sich in der zweiten Programmphase des Europäischen Klimawandelprogrammes (ECCP, European Climate Change Programme), die 2005 begann, der Fokus von der Mitigation auf Auswirkungen und An-

¹¹⁷ European Stress Physiology and Climate Experiment: EU-weit durchgeführtes Projekt zur Erforschung der Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen und sonstiger Stressfaktoren (Trockenheit, Ozon) auf die Weizenproduktion (z.B. Bender *et al.*, 1999a).

¹¹⁸ CHanging Climate and Potential Impacts on Potato Yield and Quality (De Temmerman *et al.*, 2002).

¹¹⁹ Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling: unter Federführung des PIK durchgeführte Modellstudie zur Abschätzung der Vulnerabilität verschiedener von Ökosystem-Serviceleistungen abhängiger sozioökonomischer Sektoren in Bezug auf den globalen Wandel (z.B. Schröter *et al.*, 2004).

¹²⁰ Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects: Europa-weit durchgeführtes Forschungsprojekt zur Verbesserung der regionalen Klimamodellierung in Hinblick auf ihre Verwendung für die Klimaanpassung und –mitigation.

¹²¹ „Impacts of CLimate change and Variability on European AGRiculture“ der Europäischen Kooperation im Bereich der wissenschaftlichen und technischen Forschung.

passung. Auch im Siebten Forschungsrahmenprogramm der EU (FP7; 2007-2013) bleibt Klimawandel weiterhin eine Priorität (KOM(2007) 354). Neben einer Reihe von Projekten zur Klimaveränderung wird hier mit dem Project „ADAM¹²²“ über die Mitigation hinaus die Adaption zur Politikberatung unterstützt (European Commission, 2005a).

Die ERA-NET¹²³ basierte Klimaforschungskoordination „CIRCLE“ (Climate Impact Research Coordination for a Larger Europe) liefert in ihrem Länderbericht von 2006 einen aktuellen und umfassenden Überblick über den Stand der Klimaforschung und der Entwicklung von nationalen Anpassungsstrategien für die meisten Länder Europas (CIRCLE, 2006). Zum Zeitpunkt der Berichterstellung (15.05.2006) hatte Finnland als einziges europäisches Land eine ausgearbeitete nationale Anpassungsstrategie; Frankreich, Großbritannien und Norwegen waren bei der Entwicklung bereits recht fortgeschritten, und eine Vielzahl weiterer Länder, einschließlich Deutschlands, wies erste Ansätze auf.

In Großbritannien profitiert das bereits 1997 unter Federführung des Department of Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) eingerichtete nationale Klima-Impakt-Programm (UKCIP, United Kingdom Climate Impacts Programm) von dem dort angesiedelten renommierten Klimarechenzentrum, dem Hadley Center und sei-

nem globalen Klimamodell HadCM (4). Das Ministerium hat eine Reihe von Berichten zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die britische Landwirtschaft und mögliche Anpassungsmaßnahmen erarbeitet (z.B. DEFRA, 2000) und bindet bei der Erstellung einer nationalen Anpassungsstrategie eine Vielzahl von nationalen und regionalen Stakeholdern ein (z.B. DEFRA, 2006). Tendenziell wird die britische Landwirtschaft, wie generell für Nordeuropa vorhergesagt, bei Ergreifen der sich bietenden Chancen und entsprechender Realisierung von Anpassungsmaßnahmen eher von der Klimaerwärmung profitieren: diese wird u.a. den Anbau neuer Kulturen (z.B. Wein) ermöglichen und auch die Erträge bisher unterhalb ihres physiologischen Temperaturoptimums angebaute Kulturen wahrscheinlich steigern.

In dem CIRCLE-Bericht außen vor bleibt die Forschungslandschaft zum Klimawandel in der Schweiz. Neben dem Forum für Klima- und globalen Wandel (Proclim), werden hier Forschungsaktivitäten im Rahmen des nationalen Forschungsschwerpunktes Klima (NFS Klima) und des Nationalen Klimakompetenzzentrums (NCCR) durchgeführt. Ebenso finden sich keine Informationen zu Spanien, dessen Landwirtschaft schon heute großflächig von künstlicher Beregnung abhängt und in Zukunft zunehmend mit Problemen der Verknappung von Wasserressourcen konfrontiert sein dürfte. Spanien ist z.B. auch neben Österreich und Bulgarien als Vertreter der am nachteiligsten vom Klimawandel betroffenen Länder Teilnehmer des EU-finanzierten Projektes „AGRIDEMA“ (Modelling tools and

¹²² ADaptation And Mitigation Strategies: Supporting European Climate Policy.

¹²³ „European Research Area Networks“ zur Unterstützung der Zusammenarbeit und Koordinierung von nationalen und/oder regionalen Forschungsprogrammen in Europa.

AGRIcultural DEcision MAKing), das ein Netzwerk schaffen will, um die Ergebnisse von Modellentwicklern zu Auswirkungen von Klimaveränderung auf die Landwirtschaft mit den potentiellen Nutzern besser zusammenzuführen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der für die Landwirtschaft besonders wichtigen Abschätzung der Auswirkungen extremer Wetterereignisse.

Im *außereuropäischen* Raum verfügen insbesondere die USA, Kanada und Australien über bedeutende Klimarechenzentren (siehe dazu auch Kap. 2.2.2) und nationale Programme zum Klimawandel. Kanada wird im Allgemeinen ebenso wie Russland und Nordeuropa auf Grund der sich verlängernden Vegetationsperiode und wärmerer Temperaturen zu den potentiellen Gewinnern der Klimaerwärmung gezählt (IPCC, 2007b). Allerdings beeinträchtigt auch hier die zunehmende Klimavariabilität einschließlich einer höheren Erosionsgefährdung und Hitzestress etc. die positive Tendenz, so dass letztendlich entsprechende Anpassungsmaßnahmen darüber entscheiden werden, ob sich die Klimaveränderungen positiv auf die kanadische Landwirtschaft auswirken werden. Entsprechende Ansätze werden von dem „Climate Change Impacts and Adaptation Directorate“ des Kanadischen Ministeriums für Natürliche Ressourcen koordiniert (Natural Resources Canada, 2004). In den USA werden sich die Anbaugürtel für Mais, Weizen und Soja in Richtung Norden verschieben bzw. erweitern. Überwiegend positiven Auswirkungen erhöhter Temperaturen und CO₂-Konzentrationen stehen zunehmende Probleme durch Erosion und Wasserverknappung entgegen, u.a. durch den Verlust von Schmelzwasser

aus den Rocky Mountains zu Beginn der Vegetationsperiode. Bereits 2003 wurde ein strategischer Plan für das Klimawandel-Wissenschaftsprogramm¹²⁴ entwickelt (CCSP and Subcommittee on Global Change Research, 2003), der die Anstrengungen der US Wissenschaft in dem Bereich Klimawandel und Globaler Wandel koordiniert und steuert.

Dagegen wird die Landwirtschaft in Australien unter den steigenden Temperaturen und insbesondere unter der Verknappung der Wasserversorgung und der zunehmenden Gefahr von Dürreperioden leiden. Deshalb misst die Australische Regierung dem so genannten CO₂-Düngeeffekt der ansteigenden atmosphärischen CO₂-Konzentration eine entscheidende Bedeutung zu. Arbeiten zur Erforschung der Wirkung ansteigender Kohlendioxid-Konzentrationen v.a. auf Weizen, Australiens *cash crop* Nummer eins, werden durch das Australische „Greenhouse Office“ koordiniert (Australian Greenhouse Office, 2005).

7 Offene Fragen und Forschungsbedarf

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden z.T. erhebliche Kenntnisdefizite für die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Landwirtschaft identifiziert. Aktueller Forschungsbedarf ergibt sich daraus vor allem in folgenden Bereichen (siehe dazu z.B. auch SAG, 2007; IPCC, 2007b; KOM(2007) 354; Monjon und Soumagnac, 2007):

¹²⁴ CCSP (Climate Change Science Programm) Strategic Plan

- Regionalisierung von Klimamodellen
- Verbesserung des Prozessverständnisses zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft
- Verbesserung des Verständnisses der Sozioökonomischen Auswirkungen des Klimawandels und von Anpassungsmaßnahmen
- Weiterentwicklung und Harmonisierung der verschiedenen Modelle (Wirkungs-, Ertrags-, Sektor-, Regional-, Global-)
- Durchführung flächendeckender regionaler Studien unter Berücksichtigung der regionalen Vulnerabilität gegenüber Klimaveränderungen und der regionalen Anpassungskapazität der Landwirtschaft (wichtig: Verwendung gleicher Grundlagen)
- Sektorübergreifende Integration der einzelnen Studien unter Berücksichtigung von Synergieeffekten bzw. Konflikten mit anderen Faktoren bzw. Politiken, die die Agrarwirtschaft beeinflussen.

Regionalisierung von Klimamodellen (Agrometeorologie)

Bisher liegen für das Bundesgebiet regionale Klimamodelle mit einer Auflösung von 10 x 10 km vor. Da die Höhe von Niederschlägen generell und insbesondere von sommerlichen konvektiven Niederschlagsereignissen in Abhängigkeit von der Topographie kleinräumig stark variieren kann, ist eine höhere Auflösung anzustreben, möglichst auf Betriebs- bzw. Schlagebene. Auch für die Vorhersage der

zukünftigen Häufigkeit des Auftretens von z.B. Frostereignissen sind kleinräumige Projektionen essentiell.

Verbesserung des Prozessverständnisses zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft

Basis aller Klimafolgenabschätzungen ist ein fundiertes Prozessverständnis im System Atmosphäre-Bestand-Boden. Bisher liegen jedoch keine umfassenden experimentellen Untersuchungen zur Abschätzung der Wechselwirkungen sich gleichzeitig ändernder Klimavariablen auf die verschiedenen Agrarökosysteme, einschließlich veränderter Dynamik von Schadorganismen und von im Boden ablaufenden Prozessen vor. Zum Teil bestehen auch noch Kenntnisdefizite in Bezug auf einzelne Kulturen und Klimaparameter, wie z.B. die sortenspezifische Reaktion auf Extremtemperaturen, abnehmende Winterhärte oder das Ausmaß des CO₂-Düngeeffektes einschließlich des Wasserspareffektes in Abhängigkeit der Nährstoffversorgung der jeweiligen Kultur und die Ausdehnung der Experimente auf bisher nicht untersuchte Sorten bzw. Kulturen, wie insbesondere C₄-Pflanzen für die Biomasseproduktion¹²⁵. Weitere gravierende Lücken bestehen im Hinblick auf die Folgen des Klimawandels für die Produktqualität sowie die Folgen einer zunehmenden Klimavariabilität. Die experimentellen Beiträge zur Klimafolgenabschätzung liefern Grundlagen zur Entwicklung, Optimierung und Validierung von Prognosemodellen (s.u.).

¹²⁵ Eine detaillierte Auflistung wesentlicher Forschungsfragen findet sich u.a. in SAG, 2007.

Verbesserung des Verständnisses der sozioökonomischen Auswirkungen des Klimawandels und von Anpassungsmaßnahmen

Die bisher vorliegenden ökonomischen Abschätzungen zu den Folgen des Klimawandels bleiben meist auf einem hohen Abstraktionsniveau stehen und basieren im Wesentlichen auf Annahmen darüber, wie sich die Landwirtschaft an veränderte Klimabedingungen und Weltagrarpreise anpasst (Brockmeier *et al.*, 2007). Um aber aus dem breit gefächerten Katalog an theoretischen Anpassungsmöglichkeiten (s. Kap. 5) die regional bzw. für den jeweiligen Betrieb(-styp) sinnvollsten Optionen auswählen zu können, fehlt bisher eine Kosten-Nutzen-Analyse der verschiedenen Anpassungsmaßnahmen unter den spezifischen Anbaubedingungen; besonders wichtig ist hierbei die Identifikation so genannter „no-regret“-Maßnahmen. Hierzu wären u.a. langfristig angelegte Untersuchungsprojekte, wie z.B. Beispielsbetriebe inklusive Freilandtierhaltung in klimatisch bzw. naturräumlich unterschiedlichen Regionen erforderlich. Wichtige Herausforderungen und mögliche Strategien für die Pflanzenzüchtung wurden bereits unter 5.1.2 aufgezeigt. Ein besonderer Forschungsbedarf könnte sich aus der züchterischen Anpassung an multiple Stressfaktoren einschließlich biotischer und abiotischer Komponenten ergeben. Darüber hinaus muss das Verständnis verbessert werden, wie Anpassung abläuft, um diese gegebenenfalls z.B. institutionell unterstützen zu können.

Weiterentwicklung und Harmonisierung der verschiedenen Modelle

In den letzten Jahren haben die verschiedenen Modelle (Wirkungs-, Ertrags-, Sektor-, Regional-, Global-) beachtliche Fortschritte gemacht. Dennoch besteht weiterhin die Herausforderung, möglichst sämtliche Faktoren der Klimaveränderungen einschließlich Rückkopplungsmechanismen in den Modellen abbilden zu können und über die Integration regional bzw. sektoral limitierter Modelle schließlich den gesamten (nationalen bis internationalen) Agrarsektor betrachten zu können. Trotz der Notwendigkeit, regionale Modelle an die jeweiligen Untersuchungsbedingungen anzupassen, muss dabei eine Harmonisierung der verwandten Modelle erfolgen, da sonst erhebliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen bestehen (z.B. Olesen *et al.*, 2007).

Durchführung flächendeckender regionaler Studien unter Berücksichtigung der regionalen Vulnerabilität gegenüber Klimaveränderungen und der regionalen Anpassungskapazität der Landwirtschaft

Bisher existieren nur für eine begrenzte Anzahl an Bundesländern bzw. Naturräumen (s. Tab. 3) regionale Studien zur Auswirkung des Klimawandels auf die regionale Agrarproduktion, die bestenfalls nur theoretische Anpassungsmaßnahmen aufzeigen, ohne eine realistische Kosten-Nutzen-Analyse von Anpassungsoptionen einzubeziehen. Darüber hinaus erschweren unterschiedliche Modellannahmen (zu Emissionsszenarien, etc.) die Vergleichbarkeit der einzelnen Studien. Auch im Rahmen der bundesweit durchgeführten

Diskussion zur nationalen Anpassungsstrategie wäre die Erstellung flächendeckender regionaler Klimastudien zu Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Landwirtschaft unter Verwendung der gleichen Grundlagen erstrebenswert.

Sektorübergreifende Integration der einzelnen Studien unter Berücksichtigung von Synergieeffekten bzw. Konflikten mit anderen Faktoren und Politiken, die die Agrarwirtschaft beeinflussen

Darüber hinaus müssen Interaktionen mit benachbarten Sektoren, die Auswirkungen auf die Landnutzung haben, analysiert werden (s. dazu auch Kap. 4.7.2). Gleichzeitig müssen sowohl Synergieeffekte als auch Konflikte mit weiteren Faktoren und Politiken, die die Agrarwirtschaft beeinflussen, wie z.B. die Förderung des Biomasseanbaus, berücksichtigt werden.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die möglichen Auswirkungen der mittleren Veränderungen einzelner Klimaelemente auf die landwirtschaftliche Produktion im Allgemeinen sind weitgehend bekannt. Allerdings liegen insbesondere für die Tierproduktion nur wenige für Deutschland spezifische Untersuchungen bzw. Erfahrungen vor. Darüber hinaus bestehen noch erhebliche Kenntnisdefizite in Hinblick auf die Interaktionen verschiedener kombinierter Faktoren sowie bezüglich der Auswirkungen der zunehmenden Klimavariabilität. Nur mit dieser Kenntnis lassen sich realistische Prognosen der

Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die lokale, regionale und letztlich globale Agrarproduktion treffen.

Auch zu möglichen Anpassungsmaßnahmen liegt heutzutage bereits ein umfangreiches theoretisches Wissen vor; um diese tatsächlich umzusetzen und eine effiziente Anpassung zu gewährleisten, fehlen allerdings häufig konkrete Kosten-Nutzen-Analysen der einzelnen Maßnahmen auf regionaler bzw. lokaler Ebene. Dabei sollte die Identifikation weitgehend kostenneutraler, so genannter „no-regret“-Strategien Priorität haben, um auf dieser Basis schrittweise den Anpassungsprozess einzuleiten, der in Abhängigkeit von der Realisierung der fortschreitenden Klimaveränderungen gesteuert und korrigiert werden kann. Darüber hinaus sind Entscheidungsgrundlagen für kostenintensive längerfristige Anpassungsmaßnahmen zu erarbeiten.

Generell ist davon auszugehen, dass die Landwirtschaft in Deutschland bei insgesamt überwiegend mäßiger Vulnerabilität und auf Grund ökonomischer und sonstiger Ressourcen relativ hohen Anpassungskapazität in der Lage sein sollte, sich an moderate Klimaveränderungen anzupassen und sich eröffnende Chancen zu nutzen. Das schließt allerdings nicht aus, dass die landwirtschaftliche Nutzung einzelner Regionen bzw. bestimmte landwirtschaftliche Betriebszweige in Zukunft unrentabel werden könnten. Dagegen könnte sich die landwirtschaftliche Flächennutzung in begünstigten Regionen intensivieren, zumal es in Zukunft zur Sicherung der globalen Versorgung mit Nahrung und Rohstoffen voraussichtlich notwendig werden wird,

die Agrarproduktion in klimatischen Gunstregionen zu steigern. Mögliche Auswirkungen auf die Servicefunktionen von Agrarökosystemen, wie z.B. Regelungsfunktionen für Wasser- und Stoffhaushalt sowie ihre Bedeutung als Lebensraum für Mensch, Fauna und Flora, sind dabei ebenso wie Interaktionen mit anderen Sektoren zu berücksichtigen, um Synergien zu nutzen und Konflikte zu vermeiden.

9 Zusammenfassung

Einführung

Innerhalb der letzten Jahre hat sich ein Wandel in der Diskussion zum Klimawandel vollzogen: während bisher überwiegend die Reduktion von Treibhausgasemissionen, d.h. die Mitigation, im Mittelpunkt der Agenda stand, tritt mittlerweile auch die Anpassung an die nicht mehr aufzuhaltenden Folgen des Klimawandels in den Fokus. Dabei ist die Landwirtschaft neben der Forstwirtschaft wie kaum ein anderer Wirtschaftszweig vom Wetter und vom Klima abhängig und damit unmittelbar vom Klimawandel betroffen. Der Extremsommer 2003 und z.T. auch 2006 gilt gemeinhin als Indiz, wie das zukünftige Klima aussehen könnte und worauf die Landwirtschaft sich wird einstellen müssen.

Zielsetzung dieser Studie war, den aktuellen Sachstand über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Landwirtschaft sowie über mögliche Anpassungsmaßnahmen zusammenzustellen und zu analysieren. Dazu wurden neben einer ausgiebigen Literaturrecherche auch

eigene Arbeiten zum Thema und Interviews mit landwirtschaftlichen Einrichtungen in ganz Deutschland zu laufenden bzw. geplanten und abgeschlossenen Forschungsarbeiten, Projekten und Erfahrungen ausgewertet.

Der anthropogene Klimawandel

Auf Grund der anthropogen bedingten Zunahme von CO₂ und anderen Treibhausgasen (Methan, Lachgas, Ozon, etc.) in der Atmosphäre hat die globale Durchschnittstemperatur im letzten Jahrhundert um ca. 0,6-0,7°C zugenommen. Gleichzeitig haben weltweit u.a. auch die Niederschläge zugenommen, wobei die Veränderungen der Niederschläge große regionale Unterschiede aufweisen. Bis Ende dieses Jahrhunderts wird die mittlere Temperatur in Abhängigkeit von dem Anstieg der Treibhausgasemissionen global um weitere 1,4 bis 5,8°C ansteigen, wobei die wahrscheinlichste Temperaturzunahme bei 3°C liegt. Gleichzeitig werden voraussichtlich Klimaextreme, wie Dürreperioden oder Starkregenereignisse zunehmen. Für Deutschland wird bis Ende des 21. Jahrhunderts ein mittlerer Temperaturanstieg von ca. 2,5-3,5°C erwartet. Dem bisherigen Trend folgend, wird die Erwärmung regional und saisonal unterschiedlich stark ausgeprägt sein: die stärkste Erwärmung wird im Winter erwartet; je nach dem verwandten regionalen Klimamodell – WETTREG bzw. REMO – wird eine stärkere Erwärmung für Norddeutschland bzw. den Alpenraum und Süddeutschland prognostiziert. Ferner nehmen die Niederschläge insgesamt zwar überwiegend zu, während der Vegetationsperiode allerdings

z.T. deutlich ab, wie v.a. im Nordosten Deutschlands.

Produktionsbedingungen für die Landwirtschaft in Deutschland

Im Jahr 2005 betrug die landwirtschaftlich genutzte Fläche in Deutschland mit 17 Millionen Hektar ca. 54% der Gesamtfläche. Der größte Anteil entfällt auf Ackerland (11,9 Mio ha), gefolgt von Dauergrünland (4,9 Mio ha); Sonderkulturen wie Obst-, Zierpflanzen- und Gemüseanbau fallen flächenmäßig wenig ins Gewicht, tragen allerdings – ebenso wie die Veredelungswirtschaft – überproportional zur Wertschöpfung bei. Bayern ist flächenmäßig das bedeutendste Agrarlandesland (3,3 Mio ha); es folgen Niedersachsen (2,6 Mio ha) und Nordrhein-Westfalen (1,6 Mio ha). Neben der nationalen Nachfrage bestimmt vor allem die Gemeinsame Europäische Agrarpolitik (GAP) und zunehmend auch der globale Agrarhandel die Markt- und damit auch die Anbaubedingungen für die deutsche Landwirtschaft.

Darüber hinaus entscheiden die Standortansprüche der einzelnen Kulturen und die naturräumlichen Gegebenheiten, einschließlich der Infrastruktur bzw. Marktnähe, über regionale Anbaumöglichkeiten und Ertragsleistung. Während fruchtbare Böden sowohl im oberen Rheintal als auch entlang der lössreichen Börden in der Mitte Deutschlands und den jungen Marschen an der Küste angetroffen werden, limitieren im Norden bzw. in höheren Lagen häufig geringe Temperatursummen, v.a. im Nordosten dagegen mangelnder Niederschlag bzw. limitierte Wasserversorgung die Ertragsleistung bzw. die Anbau-

eignung landwirtschaftlicher Kulturen. Entsprechend dieser unterschiedlichen Voraussetzungen sind die einzelnen Bundesländer bzw. Naturräume auch unterschiedlich vulnerabel gegenüber Klimaveränderungen. So fanden sich die stärksten Ertragseinbrüche im Dürresommer 2003 bzw. 2006 charakteristischer Weise v.a. im Nordosten (insbesondere Brandenburg) und z.T. auch im Süden, wo u.a. hohe Sommertemperaturen und die zunehmende Frühsommertrockenheit bereits heute den Ertragszuwachs z.B. von Winterweizen limitieren.

Allerdings ist die Landwirtschaft nicht nur den Klimaveränderungen ausgesetzt. Durch die Emission von Treibhausgasen trägt sie selber einerseits zum Klimawandel bei, kann andererseits aber durch den Anbau nachwachsender Rohstoffe zum Klimaschutz beitragen. Auch extensive Bewirtschaftungsweisen, wie z.B. der ökologische Landbau können zur Emissionsminderung aus der Landwirtschaft bzw. zum Klimaschutz beitragen.

Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft

Auswirkungen einer Temperaturerhöhung

Eine Temperaturerhöhung betrifft die gesamte pflanzliche und tierische Produktion, da alle biologischen und chemischen Reaktionen in Organismen und Ökosystemen von der Temperatur beeinflusst werden. Allerdings sind Pflanzen auf Grund ihrer Immobilität und fehlender Temperaturregulation stärker als Tiere den klimatischen Einflüssen ihres Wuchsortes ausgesetzt. Dabei sind (pflanzen-) physiologi-

sche Prozesse in der Regel durch Kardinaltemperaturen gekennzeichnet, wobei neben dem Temperaturoptimum das Temperaturminimum die Kältengrenze und das Temperaturmaximum die Hitzegrenze darstellt. Diese Kardinaltemperaturen sind artenspezifisch und darüber hinaus je nach Standort und Herkunft sehr unterschiedlich ausgeprägt. Bei Überschreiten des optimalen Temperaturbereiches erfolgt häufig ein abrupter Rückgang in Wachstum und Ertrag.

Demnach sollte eine moderate gleichmäßige Erwärmung und die damit einhergehende Verlängerung der Vegetationsperiode auf Grund der gesteigerten metabolischen Aktivität überall dort positive Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion haben, wo die gegenwärtige Temperatur limitierend ist. Dagegen führt selbst eine geringe Temperaturerhöhung bei landwirtschaftlichen Kulturen, die bereits im Bereich ihres Temperaturoptimums wachsen, zu Wachstums- bzw. Ertragseinbußen, da viele Stoffwechselprozesse zunehmend gestört werden. Außerdem nimmt bei höheren Temperaturen im Allgemeinen die Atmung zu und verringert die durch eine erhöhte Photosyntheserate gesteigerte Wuchs- und Ertragsleistung. Darüber hinaus beschleunigen wärmere Temperaturen die Entwicklung und reduzieren damit bei determinierten Kulturen, d.h. Kulturen deren Entwicklungsverlauf über Wärmesummen gesteuert wird, wie z.B. Getreide durch die Verkürzung der Kornfüllungsphase in der Regel das Ertragspotential. Des Weiteren könnten Schäden in Folge einer erhöhten Spätfrostgefährdung (v.a. im Obstbau) und verringerten Winterhärte zunehmen. In der

Tierproduktion senken steigende Durchschnittstemperaturen Heizkosten im Stallbetrieb und die Sterblichkeit während der Wintermonate; allerdings könnten höhere Sommertemperaturen die Nahrungsaufnahme und die Produktivität verringern und dadurch deutliche Produktionseinbußen verursachen.

Kritischer als der mittlere Temperaturanstieg wird jedoch die Zunahme der Klimavariabilität bewertet. Zunehmender Hitzestress kann dabei in Abhängigkeit von seinem zeitlichen Auftreten massive Schäden verursachen. Besonders hitzesensitiv sind generative Stadien, wie v.a. die Blüte bzw. die Reproduktion. Hier können hohe Temperaturen zu Problemen bei der Befruchtung bis hin zur Sterilität führen. Außerdem kann sich Hitzestress negativ – aber u.U. auch positiv – auf die Produktqualität und damit die menschliche Ernährung auswirken.

Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen

CO₂ in der Atmosphäre ist als Substrat der Photosynthese für das Pflanzenwachstum und damit für die gesamte landwirtschaftliche Produktion von fundamentaler Bedeutung. Während zunehmende CO₂-Konzentrationen durch den Treibhauseffekt zur Klimaerwärmung beitragen, ist die gegenwärtige CO₂-Konzentration für C₃-Pflanzen suboptimal. Zu diesen gehören fast alle hier angebaute landwirtschaftlichen Kulturen mit Ausnahme von Mais als wichtigstem Vertreter der C₄-Pflanzen. Bei ausreichender Nährstoff- und Wasserversorgung fördern steigende atmosphärische CO₂-Gehalte daher die

Photosynthese und das Wachstum, was auch als so genannter CO₂-Düngeeffekt bezeichnet wird. Außerdem verringern höhere CO₂-Konzentrationen die Blatttranspiration sowohl von C₃- als auch C₄-Pflanzen. Durch die gesteigerte Wassernutzungseffizienz werden die Bodenwasservorräte geschont, was negativen Auswirkungen der Klimaerwärmung entgegenwirken könnte. Allerdings erwärmen sich die Bestände in Folge der geringeren Verdunstungskühlung auch stärker.

Hinsichtlich der Höhe der Ertragssteigerung durch den CO₂-Düngeeffekt besteht noch ein beachtlicher Forschungsbedarf: zum einen liegen Ergebnisse älterer Kammerversuche mit Ertragssteigerungen von durchschnittlich ca. 33% für C₃-Pflanzen und ca. 10% für C₄-Pflanzen zum Teil erheblich über den Ergebnissen neuerer Freilanduntersuchungen mit Ertragssteigerungen z.B. für Weizen zwischen 8 und 16%. Zum anderen existieren nicht nur beachtliche Unterschiede in der Reaktion verschiedener Pflanzentypen sondern auch zwischen verschiedenen Sorten. Besonders sensitiv sollten Kulturen mit einer ausgeprägten Senkenstärke reagieren, wie z.B. junge Bäume und insbesondere Obstbäume sowie Knollen- und Wurzelkulturen. Auch Leguminosen profitieren in der Regel deutlich von einer CO₂-Anreicherung.

Darüber hinaus kommt es häufig zu Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung des pflanzlichen Gewebes durch den so genannten CO₂-Verdünnungseffekt, bei dem v.a. erhöhte Kohlenhydratgehalte zu einer relativ niedrigeren Konzentration an anderen Nähr-

und Inhaltsstoffen, wie v.a. Stickstoff, führen. Neben dem Proteingehalt sind auch sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe betroffen.

Auswirkungen von Niederschlagsveränderungen

Wasser ist neben der Temperatur der entscheidende Wachstums- und Ertragsparameter. Bei Wassermangel kommen Stoffwechselprozesse und damit auch das Wachstum zum Erliegen. Damit bestimmt letztendlich der Niederschlag bzw. der Wasserhaushalt, welche Kulturpflanzen innerhalb einer relativ weiten Temperaturspanne erfolgreich angebaut werden können. Sofern keine Beeinflussung durch Grundwasser vorliegt, setzt sich dieser v.a. aus der Niederschlagsmenge und -verteilung, dem Abfluss und der Verdunstung zusammen. Auf Grund der bei wärmeren Temperaturen höheren potentiellen Verdunstung und zunehmender sommerlicher Trockenheit muss in Zukunft voraussichtlich verstärkt mit Ertragseinbußen in der Landwirtschaft gerechnet werden. Dabei dürfte die Wasserversorgung besonders kritisch für landwirtschaftliche Kulturen in Regionen werden, deren Böden über eine geringe Wasserspeicherkapazität verfügen, wie z.B. grundwasserferne Sandböden und bzw. oder in Regionen, die bereits heute unter Wasserknappheit leiden, wie z.B. in Brandenburg oder Sachsen-Anhalt. Regional kann eine veränderte Wasserführung der Flüsse die Situation verschärfen, da u.a. in Zukunft die Schneeschmelze im Frühjahr zeitiger einsetzen wird und auch weniger Niederschlag als Schnee fallen wird. Außerdem könnte die Grundwasserneubildung bei einer längeren Vegetati-

onsperiode und einer geringeren Infiltration von Starkregenniederschlägen nach Trockenperioden verringert sein.

Darüber hinaus sind Nährstoffe bei geringer Bodenfeuchte schlechter verfügbar und die Anfälligkeit gegenüber Winderosion nimmt zu. Herrschen bereits zu Vegetationsbeginn trockene Bedingungen vor, kann sich auch in Abhängigkeit vom Bodentyp das Keimen bzw. Aufgehen von Ackerkulturen verringern. Im Gegensatz dazu kann die Zunahme winterlicher Niederschläge insbesondere auf schweren Böden oder bei hoch anstehendem Grundwasser die Bodenbewirtschaftung erschweren. Bei zukünftig erhöhter Hochwassergefahr – v.a. im Winter und Frühjahr – muss voraussichtlich verstärkt mit der Überflutung von landwirtschaftlichen Flächen und Schäden durch Staunässe gerechnet werden; gleichzeitig nimmt die Erosionsgefahr und die Auswaschung von Nähr- und Schadstoffen zu. Außerdem könnten bei zunehmender Stärke und Häufigkeit von Stürmen vermehrt Lagerschäden auftreten.

Auswirkungen der gleichzeitigen Änderungen verschiedener Klimaelemente

Bisher bestehen noch weit reichende Unsicherheiten bezüglich der komplexen Auswirkungen der sich gleichzeitig ändernden Klimaelemente Temperatur und Niederschlag einerseits und der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre andererseits. Wird bei einem Temperaturanstieg zunehmend die Wasserversorgung zum limitierenden Faktor, könnte der so genannte CO₂-Düngeeffekt eine entscheidende Rolle für das Ergebnis der Wech-

selwirkungen spielen, zumal zusätzlich zu der Verbesserung der Wassernutzungseffizienz das Photosynthese-Optimum hin zu höheren Temperaturen verschoben wird. Kritisch sind in diesem Zusammenhang allerdings die steigenden Konzentrationen an troposphärischem Ozon und anderen Schadgasen in wichtigen Agrarregionen weltweit zu sehen, die einer positiven Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen entgegenwirken.

Auswirkungen der Klimaveränderungen auf den Boden und die Bodenbearbeitung

Auch die Auswirkungen der Klimaveränderung auf die im Boden stattfindenden Prozesse sind komplexer Natur: während die Erwärmung bei ausreichender Bodenfeuchte im allgemeinen zu einem Abbau der organischen Substanz führt, wirkt die unter erhöhten CO₂-Konzentrationen gesteigerte Pflanzenproduktivität und die veränderte Zusammensetzung des pflanzlichen Materials diesem entgegen. Diesen Veränderungen, ebenso wie Veränderungen im Pflanzenbestand und dem Niederschlagsverhalten muss durch eine angepasste Bodenbearbeitung (z.B. konservierend) Rechnung getragen werden.

Auswirkungen der Klimaveränderungen auf Schädlinge und andere Schadorganismen

Während im Allgemeinen mit einer Zunahme der Schädlingsproblematik im Zuge der Klimaerwärmung für Deutschland gerechnet wird, sind die Folgen für den Pflanzenschutz im Einzelnen bisher schwer abschätzbar. Für Unkräuter gilt,

dass sie ebenso wie landwirtschaftliche Kulturpflanzen durch steigende atmosphärische CO₂-Konzentrationen gefördert werden; durch ansteigende Temperaturen und eine längere Vegetationsperiode werden sich bisher wärmelimitierte Arten voraussichtlich weiter ausbreiten. Da einige der am meisten gefürchteten Unkräuter dem C₄-Typ angehören, die meisten Ackerkulturen dagegen C₃-Pflanzen sind, könnten letztere jedoch auch relativ begünstigt werden.

Schädlinge, d.h. in erster Linie Schadinsekten, werden durch die Klimaänderungen sowohl indirekt beeinflusst, wie z.B. durch Auswirkungen auf die Qualität der Wirtspflanzen und auf weitere Glieder in der Nahrungskette bzw. im Ökosystem, wie insbesondere Räuber oder Nützlinge, als auch direkt auf Grund zunehmender Temperaturen und veränderter Niederschlags- und Windverhältnisse. Da die meisten Insekten relativ hohe Temperatur-optima haben, ermöglichen ihnen steigende Temperaturen eine höhere Vitalität und eine höhere Fortzupflanzungsrate. Durch mildere Winter werden dabei insbesondere frostempfindliche Schädlinge und Wurzelparasiten begünstigt. Auch die zukünftig häufiger auftretenden Extremereignisse könnten die Massenvermehrung von Schädlingen fördern.

Da saugende Insekten Krankheiten übertragen können, steigt gleichzeitig das Infektionspotential mit fortschreitender Klimaerwärmung. Allerdings entscheidet erst das Zusammenwirken von Krankheitserregern, Prädisposition des Wirtes und von Umweltfaktoren, ob es tatsächlich zum Krankheitsausbruch kommt. Während bei

Tieren Infektionen überwiegend durch Bakterien und Viren ausgelöst werden, verursachen Pilze die meisten Pflanzenkrankheiten. Dabei fördern ein üppiger Bestand und die damit verbundene höhere Luftfeuchte sowie erhöhte Kohlenhydratgehalte im Blatt in der Regel einen Pilzbefall; steigende Temperaturen verbunden mit einer geringeren Luftfeuchte während der Vegetationsperiode wirken einem Befall eher entgegen.

Auswirkungen auf die Agrarproduktion in Deutschland

Bereits heute lässt sich absehen bzw. mit Hilfe von Modellen berechnen, dass sich der Klimawandel regional sehr unterschiedlich auf die Landwirtschaft in Deutschland auswirken wird. Das liegt zum einen daran, dass sich das Klima unterschiedlich stark in den verschiedenen Regionen verändern wird. Zum anderen ist die Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel von der jeweiligen regionalen naturräumlichen und sozioökonomischen Ausgangssituation einschließlich der regionalen Anbausituation sowie der jeweiligen Anpassungskapazität abhängig. Die unterschiedliche Vulnerabilität einzelner Naturräume bzw. Bundesländer gegenüber Klimaveränderungen spiegelt sich auch in der Durchführung regionaler Klimastudien wider, die bisher überwiegend aus dem wärmeren Süden und Trockenstress gefährdeten Nordosten vorliegen, nicht dagegen aus den nördlichen Bundesländern, die von einer moderaten Klimaänderung zunächst profitieren könnten. Damit ist zurzeit auch keine detaillierte Abschätzung der Auswirkungen der Klimaverän-

derungen auf die gesamte Agrarproduktion Deutschlands möglich. Des Weiteren wird die Vergleichbarkeit der einzelnen Studien durch unterschiedliche Modellannahmen, wie v.a. zum Emissionsszenarium, der Berücksichtigung des CO₂-Effektes, etc. sowie die Beschränkung auf wenige Aspekte der landwirtschaftlichen Produktion beeinträchtigt.

Für Bayern wurde z.B. bereits 1999 eine regionale Klimastudie durchgeführt, bei der die möglicherweise negativen Auswirkungen erhöhter UV-B-Belastung im Mittelpunkt standen. Deutlich mehr Aspekte untersuchten die baden-württembergische, brandenburgische und hessische Klimastudie, die für die Hauptkulturen (Weizen, Mais) Ertragssimulationen durchführten, allerdings überwiegend ohne Berücksichtigung des CO₂-Effektes. In der hessischen und baden-württembergischen Studie wurde darüber hinaus ebenso wie in der sächsischen Studie die zukünftige Schaderreger- oder auch Spätfrostgefährdung im Obstbau z.T. genauer untersucht.

Dabei ergaben die Ertragssimulationen bis ca. 2050 Ertragsänderungen für Weizen zwischen -5 bis -17% ohne und zwischen +0,5 bis -10% mit Berücksichtigung des CO₂-Effektes. Allerdings wurden die höchsten Ertragseinbußen für das Bundesland Brandenburg berechnet, auf das – bei relativ hoher Vulnerabilität gegenüber Klimaveränderungen – nur ca. 5% der nationalen Weizenproduktion entfallen. Im Gegensatz zu den Weizenenerträgen nahmen die Maiserträge in den bisher durchgeführten regionalen Simulationen bereits ohne Berücksichtigung des CO₂-Effektes allein bei höheren Temperaturen und veränder-

tem Niederschlag überwiegend geringfügig und bei Berücksichtigung des CO₂-Effektes um einige Prozent zu. Für die Grünlandwirtschaft wirkt sich der frühere Beginn der Vegetationsperiode im Allgemeinen positiv, die zunehmende Sommer-trockenheit dagegen deutlich negativ aus. Allerdings wird der CO₂-Düngeeffekt für Grünlandpflanzen mit ca. 20% Ertragszuwachs relativ hoch eingeschätzt. Bei den Sonderkulturen eröffnet die Klimaerwärmung voraussichtlich neue Produktionspotentiale durch den Anbau bisher Wärme limitierter Kulturen; in der Veredelungswirtschaft ist mit einer stärkeren Hitzebelastung der Nutztiere und u.U. einer geringeren Produktivität zu rechnen.

Auswirkungen auf den ländlichen Raum

Die Klimaveränderungen wirken sich in mehrfacher Hinsicht auf ländliche Räume aus: zum einen, indem sie die Wirtschaftlichkeit von Einzelbetrieben, bestimmten Betriebszweigen oder von Betrieben in bestimmten Regionen beeinflussen. Dies kann zu Strukturänderungen bis hin zu Betriebsaufgaben mit unmittelbaren sozialen und ökologischen Auswirkungen für den ländlichen Raum führen. Zum anderen übt die Landwirtschaft über die primäre Erzeugung von landwirtschaftlichen Produkten hinaus auch wichtige Servicefunktionen für Agrarökosysteme aus. Diese reichen von Regelungsfunktionen z.B. für den Wasser- und Stoffhaushalt bis hin zur Gestaltung von Kulturlandschaften als Lebens- bzw. Erholungsraum für Mensch, Fauna und Flora. Damit ergeben sich zahlreiche Interaktionen mit benachbarten Sektoren, wie z.B. der Wasserwirtschaft,

dem Naturschutz, der Forstwirtschaft oder dem Tourismus.

Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft

Die einheimische Landwirtschaft kann sich an mittlere Klimaänderungen, d.h. höhere mittlere Temperaturen und geringere Sommer- bei gleichzeitig erhöhten Winterniederschlägen, mit einer Reihe von kurz- bis mittelfristigen – für holzige Sonderkulturen und Infrastrukturmaßnahmen auch längerfristigen – Maßnahmen anpassen. Während einige Anpassungen selbständig und weitgehend kostenneutral von den Landwirten durchgeführt werden können, benötigen längerfristige, insbesondere strukturelle Maßnahmen häufig Vorgaben seitens der Wissenschaft, Politik und Verwaltung, um die Anpassungskapazität des Agrarsektors gezielt zu fördern. Anpassungsmaßnahmen an die zunehmende Klimavariabilität sind voraussichtlich schwieriger zu realisieren. Hier könnten in Zukunft eventuell staatlich subventionierte Mehrgefahrenversicherungen für die Landwirtschaft gefordert sein wie sie bereits in einigen europäischen Ländern existieren. Sollte in einigen Regionen die landwirtschaftliche Produktion klimabedingt unrentabel werden, muss die Schaffung alternativer Einkommensquellen ins Auge gefasst werden.

Zu den Möglichkeiten der Betriebe, sich an diese Änderungen anzupassen und so klimabedingte Ertrags- und Qualitätseinbußen zu reduzieren bzw. sich neu eröffnende Potentiale zu nutzen, zählen neben einem gezielten Humusaufbau z.B. die Änderung von Aussaatterminen, Saatchich-

te, Reihenabstand und Fruchtfolge; der Anbau von anderen Sorten oder sogar anderen Kulturen; die Anpassung des Düng- und Pflanzenschutzregimes und der Bodenbearbeitung und der Ausbau von Be- und u.U. Entwässerungssystemen. Ferner ist die Diversifizierung der landwirtschaftlichen Produktion eine Möglichkeit, das Betriebsrisiko zu senken. Dabei müssen die Einzelmaßnahmen aufeinander abgestimmt werden, um einen gesamtbetrieblichen Ablauf zu gewährleisten.

Auch auf die Pflanzenzüchtung kommen neue Herausforderungen hinsichtlich der Entwicklung robuster und unter wechselnden Witterungsbedingungen ertragsstabiler Kulturen hinzu. Im Fokus steht dabei die Verbesserung der Hitze- und Trockenstresstoleranz traditioneller Kulturpflanzen sowie die Bereitstellung von Saatgut neuer, Wärme liebender Kulturen. Weitere Zuchtziele sind die Anpassung der Entwicklungsrate der Pflanzen an die geänderten Temperatur- und Niederschlagsbedingungen, die Erhöhung des Wachstums- und Ertragspotentials der Kulturpflanzen zur optimalen Ausnutzung des CO₂-Effektes auf die Photosynthese und die Gewährleistung einer hohen stofflichen Qualität unter veränderten Wuchsbedingungen. Auch die erwartete Zunahme von Schädlingen und Krankheiten und u.U. zunehmende troposphärische Ozonkonzentrationen stellen neue Herausforderungen an die Resistenzzüchtung.

Bei der Anpassung der Nutztierhaltung an Klimaveränderungen können weitgehend drei Strategien verfolgt werden: die Anpassung der physikalischen Umgebung, z.B. durch entsprechende Kühlsysteme bei

Stallhaltung bzw. Schatten- und ausreichendes Wasserangebot bei Weidehaltung; die Züchtung hitzetoleranter Rassen mit hohen Leistungsmerkmalen; und schließlich die Verbesserung des Nährstoffmanagements, z.B. durch Splitten von Rationen, Verlagerung der Nahrungsaufnahme in die kühleren Nachtstunden und Angebot energie- und mineralstoffreicher, leichtverdaulicher Kost.

Forschungsbedarf und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden z.T. erhebliche Kenntnisdefizite für die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Landwirtschaft identifiziert. Aktueller Forschungsbedarf ergibt sich daraus vor allem in folgenden Bereichen: der weiteren Verbesserung des Prozessverständnisses zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft; der Verbesserung des Verständnisses der sozioökonomischen Auswirkungen des Klimawandels und von Anpassungsmaßnahmen, wobei insbesondere Kosten-Nutzen-Analysen für die jeweiligen Anpassungsoptionen zu erstellen sind; und der Durchführung flächendeckender regionaler Studien unter Berücksichtigung der regionalen Vulnerabilität gegenüber Klimaveränderungen und der regionalen Anpassungskapazität der Landwirtschaft sowie der sektorübergreifenden Integration der einzelnen Studien unter Berücksichtigung von Synergieeffekten bzw. Konflikten mit anderen Faktoren bzw. Politiken, die die Agrarwirtschaft beeinflussen.

Generell ist davon auszugehen, dass die Landwirtschaft in Deutschland bei insge-

samt überwiegend mäßiger Vulnerabilität und der auf Grund ökonomischer und sonstiger Ressourcen relativ hohen Anpassungskapazität in der Lage sein sollte, sich an moderate Klimaveränderungen anzupassen und sich eröffnende Chancen zu nutzen. Dabei wird sich voraussichtlich jedoch die Produktivität und damit die Wirtschaftlichkeit einzelner Betriebe, Betriebszweige oder Agrarregionen verändern, was Auswirkungen auf den ländlichen Raum nach sich ziehen wird.

Literaturverzeichnis

- Abildtrup, J., Gylling, M. (2001) Climate change and regulation of agricultural land use, A literature survey on adaptation options and policy measures. Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics. SJFI, 52 S.
- Adam, N.R., Wall, G.W., Kimball, B.A., Idso, S.B., Webber, A.N. (2004) Photosynthetic down-regulation over long-term CO₂ enrichment in leaves of sour orange (*Citrus aurantium*) trees. *New Phytol.* 163, 341-347.
- Ågren, G.I., Hansson, A.-C. (2000) Crop Ecosystem Responses to Climatic Changes, Soil Organic Matter Dynamics. In: *Climate Change and Global Crop Productivity*. Reddy, K.R., Hodges, H.F. (Hrsg.) CABI Publishing, New York, USA. 375-385.
- Ahlgrimm, H.-J., Dämmgen, U. (1994) Beitrag der Landwirtschaft zur Emission von klimarelevanten Spurengasen. In: *Klimaveränderung und Landbewirtschaftung Teil II. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 148*, 75-106.
- Aiking, H., Boer, J. de, Vereijken, J.M. (Hrsg.) (2006) *Towards sustainable protein production and consumption, Pigs or peas?* Dordrecht, Springer Verlag.
- Ainsworth, E. A., Long, S. P. (2005) What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the

- responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytol.* 165, 351-372.
- Aksouh, N. M., Jacobs, B. C., Stoddard, F. L., Mailer, R. J. (2001) Response of canola to different heat stresses. *Aust. J. Agr. Res.* 52, 817-824.
- Alberton, O., Kuyper, T.W., Gorissen, A. (2005) Taking mycocentrism seriously, mycorrhizal fungal and plant responses to elevated CO₂. *New Phytol.* 167, 859-868.
- ALE (Agentur für LandEntwicklung und LandErlebnis) (2006) Strohm-Lömpcke R. Recherche zu Forschungs-, Entwicklungs- und Modellvorhaben mit Beiträgen zur innovativen Nutzung und Erhaltung von Agrarbioidiversität. S. 97.
- Alexandrov, V., Eitzinger, J., Cajic, V., Oberforster, M. (2002) Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. *Glob. Change Biol.* 8, 372-389.
- Allard, V., Newton, P.C.D., Loeffering, M., Clark, H., Matthew, C., Soussana, J.-F., Gray, Y.S. (2003). Nitrogen cycling in grazed pastures at elevated CO₂, N returns by ruminants. *Glob. Change Biol.* 9, 1731-1742.
- Allen Jr., L.H., Baker, J.T., Boote, K.J. (1996) The CO₂ fertilization effect, higher carbohydrate production and retention as biomass and seed yield. In: *Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant processes.* FAO, Rome, Italy.
- Amthor, J.S. (1998) Perspective on the relative insignificance of increasing atmospheric CO₂ concentrations to crop yield. *Field Crops Res.* 58, 109-127.
- Amthor, J.S. (2001) Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield, review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. *Field Crops Res.* 73, 1-34.
- Antle, J.M., Capalbo, S.M., Elliott, E. T., Paustian, K.H. (2004). Adaptation, Spatial Heterogeneity, and the Vulnerability of Agricultural Systems to Climate Change and CO₂ Fertilization, An Integrated Assessment Approach. *Climatic Change* 64, 289-315.
- Araus, J.L., Slafer, G.A., Reynolds, M.P., Royo, C. (2002) Plant Breeding and Drought in C₃ Cereals, What should we breed for? *Ann. Bot.-London* 89, 925-940.
- Arbol, Y.P., Ingram K.T. (1996) Effects of higher day and night temperatures on growth and yields of some crop plants. In: *Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant processes.* FAO, Rome, Italy.
- Ashmore, M.R. (2005) Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. *Plant, Cell Environ.* 28, 949-964.
- Ashmore, M.R., Ainsworth N. (1995) The Effects of Ozone and Cutting on the Species Composition of Artificial Grassland Communities. *Funct. Ecol.* 9 (5) 708-712.
- ASTRA (2007) Developing Policies & Adaptation Strategies to Climate Change in the Baltic Sea Region. ASTRA newsletter No 4 – July 2007.
- Australian Greenhouse Office (2005) Carbon Dioxide and Fertilisation and Climate Change Policy. 33 S.
- Bahrenberg, G., König, G. (2005) Sozialräumliche Wirkungen eines Klimawandels im Unterwesergebiet. In: Schuchart, B., Schirmer, M. (Hrsg.) *Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion.* Springer Verlag, 189-208.
- Baker, B.B., Hanson, J.D., Bourdon, R.M., Eckert, J.B. (1993) The potential effects of climate change on ecosystem processes and cattle production on U.S. Rangelands. *Climatic Change* 25, 97-117.
- Baker, J.T., Allen Jr., L.H. (1993) Contrasting crop species responses to CO₂ and temperature – rice, soybean and citrus. *Vegetatio* 104, 239-260.
- Baldocchi, D. (2005) The carbon cycle under stress. *Nature* 437, 483-484.

- Bale, J.S., Masters, G.J., Hodkinson, I.D., Awmack, C., Bezemer, T.M., Brown, V.K., Butterfield, J. Buse, A., Coulson, J.C., Farrar, J., Good, J.E.G., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T.H., Lindroth, R.L., Press, M.C., Symmioudis, I., Watt, A.D., Whittaker, J.B. (2002) Herbivory in global climate change research, direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Glob. Change Biol.* 8, 1-16.
- Barash, H., Silkanikove, N., Shamay, A., Ezra, E. (2001) Interrelationships among ambient temperature, day length, and milk yield in dairy cows under a Mediterranean climate. *J. Dairy Sci.* 84 (10), 2314-2320
- BassiriRad, H. (2000) Kinetics of nutrient uptake by roots, responses to global change. *New Phytol.* 147, 155-169.
- Bayerischer Klimaforschungsverbund (Hrsg.) (1999) Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen. Abschlußbericht des Bayerischen Klimaforschungsverbundes. November 1999. 90 S.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007) Klimawandel und Boden. Referat 108 Vorsorger Bodenschutz. Stand: 16.03.2007 Zugriff: http://www.lfu.bayern.de/boden/forschung_und_projekte/klimawandel_und_boden/doc/klimawandel_und_boden.pdf.
- BBSRC (2006) Coping with Climate Change (in the UK countryside). Zugriff 05/2007, http://www.bbsrc.ac.uk/about/pub/business/07/climate_change.pdf.
- Becker, F.A., Wetzell, M. (1986) Wintergerste (*Hordeum vulgare*). In: Oehmichen (Hrsg.) Pflanzenproduktion. Band 2. Produktionstechnik. Parey Verlag, 280-299.
- Beede, D.K., Collier R.J. (1986) Potential Nutritional Strategies for Intensively Managed Cattle during thermal Stress. *J. Anim. Sci.* 62, 543-554.
- Bellamy, P.H., Loveland, P.J., Bradley, R.I., Lark, R.M., & Kirk, G.J.D. (2005). Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature* 437, 245-248.
- Bender, J., Bramm, A., Weigel, H.-J. (1999b) On the importance of cultivar, growth duration, sink capacity and yield quality for the sensitivity of sugar beet to ozone. In: Fuhrer, J., Achermann, B. (Hrsg.) Critical Levels for Ozone – Level II. Environmental Documentation No. 115. Swiss Agency for Environment, Forest and Landscape, Bern, Switzerland, 215-218.
- Bender, J., Hertstein, U., Black, C.R. (1999a) Growth and yield responses of spring wheat to increasing carbon dioxide, ozone and physiological stresses, a statistical analysis of “ESPACE-wheat” results. *Eur. J. Agron.* 10, 185-195.
- Bender, J., Muntiferung R.B., Lin, J.C., Weigel, H.J. (2006) Growth and nutritive value of *Poa pratensis* as influenced by ozone and competition. *Environ. Pollut.* 142, 109-115.
- Bender, J., Weigel, H.-J. (2002) Ozone Stress Impacts on Plant Life. In: Ambast, N.K., Ambast, R.S. (Hrsg.) Modern Trends in Applied Terrestrial Ecology, Kluwer Academic / Plenum Publisher, New York, 165-182.
- Berz, G., Kron, W. (2005) Überschwemmungskatastrophen und Klimaänderung, Trends und Handlungsoptionen aus (Rück-)Versicherungssicht. In: Lozán, J.L., Graßl, H., Hupfer, P., Menzel, L., Schönwiese, C.-D. Buchreihe Warnsignale, „Warnsignal Klima, Genug Wasser für alle?“.
- Betzholz, T. (2006) Geflügelhaltung in Baden-Württemberg, ein exotischer Betriebszweig. Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 9, 27-28.
- BFN (Bundesamt für Naturschutz) (2004) Klimawandel und Biologische Vielfalt. In: Daten zur Natur 2004. Bonn, 378-389.
- BFN (Bundesamt für Naturschutz) (2006) Biologische Vielfalt und Klimawandel – Gefahren, Chancen, Handlungsoptionen. BfN-Skripten 148, 27 S.
- Bickert, C. (2007) Agrarregionen der Zukunft. DLG-Mitteilungen 7/2007, 17-19.
- Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S., Miglietta, F. (1995) Mini Free Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) Experiment on

- Grapevine. In: Harrison, P.A., Butterfield, R.E., Downing, T.E. (Hrsg.) *Climate Change and Agriculture in Europe. Assessment of Impacts and Adaptations*, 125-137.
- Bindi, M., Fibbi, L., Miglietta, F. (2001) Free Air CO₂ Enrichment (FACE) of grapevine (*Vitis vinifera* L.) II. Growth and quality of grape and wine in response to elevated CO₂ concentrations. *Eur. J. Agron.* 14 (2), 145-155.
- Bindi, M., Howden, M. (2004) "Challenges and Opportunities for Cropping Systems in a Changing Climate". 4th International Crop Science Congress Brisbane, Australia, www.cropscience.org.au.
- Bindi, M., Miglietta, F., Vaccari, F., Magliulo, E., Giuntoli, A. (2006) Growth and Quality Responses of Potato to Elevated [CO₂]. In: Nösberger, J., Long, S.P., Norby, R.J., Stitt, M., Hendrey, G.R., Blum, H. (Hrsg.) *Managed Ecosystems and CO₂*. *Ecol. Stud.* 187, 105-119.
- Blankinship J.C., Hungate, B.A. (2007) Below-ground Food Webs in a Changing Climate. In: Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Hrsg.) *Agroecosystems in a Changing Climate*. CRC Press, Florida, 117-150.
- Bloch, D., Hoffmann, C. (2004) Wachstum von Zuckerrüben in Abhängigkeit von Genotyp und Wasserversorgung. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaft* 15, 89-92.
- Blum, W.E.H. (2005) Soils and Climate Change. *J Soil Sediment* 5 (2), 67-68.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2006a) Agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2006. 168 S.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2006b) Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2005. Landwirtschaftsverlag GMBH Münster-Hiltrup. 563 S.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2007a) Agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2007. 133 S.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2007b) Bericht über den Zustand des Waldes 2006. Ergebnisse des forstlichen Umweltmonitorings. Erschienen am 19.01.2007. Zugriff: http://www.bmelv.de/cln_045/nn_753668/DE/06-Forstwirtschaft/Waldberichte/waldberichte_node.html_nnn=true
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) (2005) Bericht zum Klimaschutz im Bereich Land- und Forstwirtschaft. 18.01.2005. Zugriff: http://www.bmelv.de/cln_044/nn_750586/DE/04-Landwirtschaft/Agrarumweltmassnahmen/BerichtKlimaschutz.html_nnn=true.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2005) Erste vorläufige Abschätzungen zur Entwicklung erneuerbarer Energieträger im Jahr 2004. Stand Februar 2005. Zugriff 11/2006: http://www.bee-ev.de/uploads/erste_abschaetzung_2004.pdf
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2003) Hydrologischer Atlas von Deutschland.
- Bobbink, R., Hornung, M., Roelofs, J.G.M. (1998) The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation. *J. Ecol.* 86 (5), 717-738.
- Bojanowski, A. (2006) Satelliten zeigen heißeste Orte der Welt. Zugriff unter: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,450476,00.html>.
- Bornscheuer, E. (1986) Zucker- und Futterrübe, In: Oehmichen, J. (Hrsg.) *Pflanzenproduktion*. Band 2. Produktionstechnik. Parey Verlag, 385-431.
- Böse, S. (2003) Ertrag und Gewinn! Zugriff am 11.01.2006 unter folgender Verlinkung: <http://www.saaten->

- [uni-on.de/printview.cfm/id/1645/print/yes/cfid/3389191/cftoken/42](http://www.uni-on.de/printview.cfm/id/1645/print/yes/cfid/3389191/cftoken/42).
- Böse, S. (2004a) Biomasse-Produktion, Nachwachsende Hoffnung (13.10.2004). Zugriff: <http://www.saaten-union.de/index.cfm/nav/404/article/2045.html>.
- Böse, S. (2004b) Weizensorten für Trockenheit und Hitze. Zugriff am 01.02.2007, verlinkt unter: <http://www.saaten-union.de/printview.cfm/id/1938/print/yes/cfid/3389191/cftoken/42...>
- Böse, S. (2006) Gute Aussichten für Weizen 2006/2007, Höhere Preise + Mehr Ertrag. In: Saaten-Union News Nr. 40 (07/2006) Bioenergie und mehr. Zugriff 11/2006: <http://www.saaten-union.de/index.cfm/startid/330/doc/2613/nl/58/contact/1533.html>
- Böse, S. (2006b) Der richtige Mais für Biogas. 2.01.2006. Zugriff unter: <http://www.saaten-union.de/index.cfm/nav/404/article/2488.html>.
- Boye, P., Klingenstein, F. (2006) Biodiversity and Climate Change, What do we Know, What can we Do? In: Migratory Species and Climate Change, Impacts of a Changing Environment on Wild Animals. UNEP/CMS Secretariat, Bonn, Germany, 12-17.
- Bradshaw, B., Holly, D., Smit, B. (2004) Farm-level adaptation to climatic variability and change, crop diversification in the Canadian Prairies. *Climatic Change* 67, 119-141.
- Brockmeier, M., Isermeyer, F., Weingarten, P. (2007) Forschungsbedarf zu den ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels auf Agrarwirtschaft und ländliche Räume. Stellungnahme im Auftrag des BMELV. FAL. Braunschweig.
- Broucek, J., Mihina, S., Ryba, S., Tongel, P., Kísac, P., Uhrincat, M., Hanus, A. (2006) Effects of high air temperatures on milk efficiency in dairy cows. *Czech J. Anim. Sci.*, 51 (3), 93-101.
- Bruinsma, J.E. (2003) World agriculture, Towards 2015/2030. An FAO perspective. Earthscan Publications Ltd., London.
- Brunnert, H. (1994) Einflüsse einer erhöhten Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre auf Pflanzen. In: Klimaveränderung und Landbewirtschaftung Teil II. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 148, 141-186.
- Buchgraber, K. (2007) Probleme und Perspektiven der Grünlandwirtschaft im Klimawandel. ADAGIO-Workshop „Landwirtschaft und Klimawandel“, BOKU Wien, 3. Juli 2007.
- Buchner W. (2000) Fruchtfolge. In: Oehmichen J., Lüttge Entrup N. (Hrsg.) Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 1, Grundlagen, 357-405.
- Buchner, W., Müller, J., Sourell, H. (2000) 10. Grundlagen und Anwendung der Agrarmeteorologie im Pflanzenbau. In: Oehmichen J., Lüttge Entrup N. (Hrsg.) Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 1, Grundlagen, 601-677.
- Buhrmann, S., Powitz, H., Will, H. (2004) The 2003 sugar beet campaign in North Germany – VDZ, Zweigverein Nord. *Zuckerindustrie* 129 (5), 313-318.
- Bunce, J.A. (1992). Stomatal conductance, photosynthesis and respiration of temperate deciduous tree seedlings grown outdoors at an elevated concentration of carbon dioxide. *Plant Cell Environ.* 15, 541-549.
- Cardy-Brown E. (2007) Bioenergie bringt billiges Eiweiß. *DLG-Mitteilungen* 7, 20-22.
- Cassman, K.G. (2007) Climate change, biofuels and global food security. *Environ. Res. Lett.* 2. doi,10.1088/1748-9326/2/1/01 1002.
- Cavestany, D., El Wishy, A.B., Foot, R.H. (1985) Effect of season and high environmental temperature on fertility of Holstein cattle. *J. Dairy Sci.* 68, 1471-1478.
- CCSP (Climate Change Science Program) and Subcommittee on Global Change Research (2003) Strategic Plan for the U.S. Climate Change Science Program. 364 S. Zugriff 12/2005: <http://www.climate-science.gov/Library/stratplan2003/final/ccspstratplan2003-all.pdf>

- CEC (Commission of the European Communities, Ed.) (1993) Executive Summary. In: The European Open-Top Chamber Project, Assessment of the Effects of Air Pollutants on Agricultural Crops. Air Pollution Research Report 48, 207 S.
- Chakraborty, S., von Tiedemann, A., Teng, P.S. (2000) Climate Change, potential impact on plant diseases. *Environ. Pollut.* 108, 317-326.
- Chameides, W.L., Kasibhatla, P.S., Yienger, J., Levy H. (1994) Growth of Continental-Scale Metro-Agro-Plexes, Regional Ozone Pollution, and World Food-Production. *Science* 264 (5155), 74-77.
- Chen, C.C., McCarl, B.A. (2001) An investigation of the relationship between pesticide usage and climate change. *Climatic Change* 50, 475-487.
- Chmielewski, F.M. (2004) Erste Anzeichen des Klimawandels in der Landwirtschaft. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 16, 87-88.
- Chmielewski, F.-M., Köhn, W. (1999) Impact of weather on yield components of spring cereals over 30 years. *Agr. Forest Meteorol.* 96, 49-58.
- Chmielewski, F.-M., Köhn, W. (2000) Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years. *Agr. Forest Meteorol.* 102, 253-261.
- Chmielewski, F.M., Müller, A., Küchler, W. (2004) Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen. HU Berlin, 106 S.
- Christen, O. (2007) Sorten für Morgen – Herausforderungen für die Pflanzenzüchtung. Herausforderung Klimawandel. Auswirkungen auf die Landwirtschaft in Mitteleuropa – Lösungsansätze. DLG Wintertagung 2007. Zugriff: 25.01.2007: http://download.dlg.org/pdf/wita2007/KF_Christen.pdf.
- CIRCLE (Climate Impact Research Coordination for a Larger Europe) (2006) Extended Country Report. 260 S. Zugriff 03/2007: http://www.circle-e.net/uploads/media/CIRCLE_Del_Ia1_Extended_Country_Report_1stISSUE_Final_DRAFT.pdf.
- Claussen, M., Fohlmeister, J., Ganopolski, A., Brovkin V. (2006) Vegetation dynamics amplifies precessional forcing. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L09709, doi,10.1029/2006GL026111.
- Cleland, E.E., Chiariello, N.R., Loarie, S.R., Mooney, H.A., Field, C.B. (2006) Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem. *PNAS* 103 (37)13740-13744.
- Coakley, S.M., Scherm, H., Chakraborty, S. (1999) Climate change and plant disease management. *Annu. Rev. Phytopathol.* 37, 399-426.
- Collatz, G.J., Berry, J.A., Clark, J.S. (1998) Effects of climate and atmospheric CO₂ partial pressure on the global distribution of C-4 grasses, present, past, and future. *Oecologia* 114 (4), 441-454.
- Colls, J.J., Sanders, G.E., Geissler, P.A., Bonte, J., Galaup, S., Weigel, H.-J., Brown V.C., Jones, M. (1993) The Responses of Beans Exposed to Air Pollution in Open-Top Chambers. In: CEC (Hrsg.). The European Open-Top Chamber Project, Assessment of the Effects of Air Pollutants on Agricultural Crops. Air Pollution Research Report 48, 65-83.
- Conroy, J.P., Seneweera, S., Basra, A.S., Rogers, G., Nissen-Wooller B. (1994) Influence of rising atmospheric CO₂ concentrations and temperature on growth, yield and grain quality of cereal crops. *Austr J Plant Physiol* 21, 741-758.
- COPA-COGECA (2003) Bewertung der Auswirkungen der Hitzewelle und Dürre des Sommers 2003. für Land- und Forstwirtschaft. Zugriff 01/2007: <http://www.copa-cogeca.be/de/dossiers.asp>
- Cotrufo, M.F., Ineson, P., Scott, A. (1998) Elevated CO₂ reduces the nitrogen concentration of plant tissue. *Glob. Change Biol.* 4, 43-54.
- Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A., Totterdell, I.J. (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408, 184-187.

- Crafts-Brandner, S.J., Salvucci M.E. (2004) Analyzing the impact of high temperature and CO₂ on net photosynthesis, biochemical mechanisms, models and genomics. *Field Crop Res.* 90, 75-85.
- Craigon, J., Fangmeier, A., Jones, M., Donnelly, A., Bindi, M., De Temmerman, L., Persson, K., Ojanpera, K. (2002) Growth and marketable-yield responses of potato to increased CO₂ and ozone. *Eur. J. Agron.* 17 (4), 273-289.
- Cure, J.D., Acock, B. (1986) Crop responses to carbon dioxide doubling, A literature survey. *Agr. Forest Meteorol.* 38, 127-145.
- Daepf, M., Nösberger, J., Lüscher, A. (2001) Nitrogen fertilization and developmental stage alter the response of *Lolium perenne* to elevated CO₂. *New Phytol.* 150, 347-358.
- Dämmgen, U., Weigel, H.J. (1998) Trends in atmospheric composition (nutrients and pollutants) and their interaction with agroecosystems. In: El Bassam, N., Behl, R.K., Prochnow, B. (Hrsg.) *Sustainable Agriculture for Food, Energy and Industry: Strategies Towards Achievement*, Proc. Int. Conf. in Braunschweig, June 1997, James & James Science Publishers Ltd., 85-93.
- Davies, W.J. (2006) Responses of plant growth and functioning to changes in water supply in a changing climate. In: Morison, J.I.L., Morecroft, M.D. (Hrsg.) *Plant Growth and Climate Change*. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 96-117.
- De Temmerman, L., Hacour, A., Guns, M. (2002) Changing climate and potential impacts on potato yield and quality "CHIP", introduction, aims and methodology. *Eur. J. Agron.* 17, 233-242.
- DEFRA (Department of Environment, Food and Rural Affairs) (2000) *Climate Change and Agriculture in the United Kingdom*. 71 S. Zugriff: 12/2005 unter: <http://www.defra.gov.uk/farm/environment/climate-change/impact/climate.pdf>.
- DEFRA (Department of Environment, Food and Rural Affairs) (2006) *Climate Change. The UK Programme 2006. Tomorrow's Climate, Today's Challenge*. TSO 193 S. Zugriff 03/2007: <http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/uk/ukccp/pdf/ukccp06-all.pdf>.
- Delgado, E., Rosegrant, M.W., Steinfeld, H., Ehui, S., Courbais, C. (1999) *Livestock to 2020, The Next Food Revolution*. Food, Agriculture and the Environment Discussion Paper 28. IFPRI, Washington, USA, 72 S.
- Demmers-Derk, H., Mitchell, R.A.C., Mitchell, V.J., Lawlor, D.W. (1998) Response of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield and biochemical composition to elevated CO₂ and temperature at two nitrogen applications. *Plant Cell Environ.* 21, 829-836.
- DGE (Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V.) (2004) *Ernährungssituation in Deutschland*. In: *Ernährungsbericht 2004*, 21-116.
- Dieterich, B. (2003) *Land- und forstwissenschaftliche Bodennutzung im nördlichen Alpenvorland*. Zugriff: <http://www.fh-bin-gen.de/home/fbu/benedikt/pdf/Burkart%20Dieterich.pdf>.
- Dissemond A. (2000) Grundlagen des Pflanzenschutzes. In: Oehmichen, J., Lüttge Entrup, N. (Hrsg.) *Lehrbuch des Pflanzenbaues*. Band 2, Kulturpflanzen. 194-257.
- DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft) (2000) *Landwirtschaft im Agribusiness*. Posterbeilage, DLG-Mitteilungen 10/2000.
- Doleschel, P. (2007) *Klimawandel und Landwirtschaft, Anpassungsmöglichkeiten in Ackerbau und Tierhaltung*. Bayerisches Symposium zu den Folgen des Klimawandels am 12. April 2007 in Nürnberg.
- Dölger, D., Heubach, M. (2007) So können Sie reagieren. DLG-Mitteilungen 09/2007, 13-16.
- Drake B.G., Gonzáles-Meler, M.A., Long, S.P. (1997) More efficient plants, A Consequence of Rising Atmospheric CO₂? *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 48, 609-639.
- DWA (Deutscher Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) (2006) *De-*

- zentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. DWA-Themen, April 2006, 109 S.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2004) Mitteilung vom 27.07.2004. Umweltdaten Deutschland Online: <http://www.env-it.de/umweltdaten>, Umweltbundesamt, Berlin.
- Edwards, E.J., McCaffery, S., Evans, J.R. (2005) Phosphorus availability and elevated CO₂ affect biological nitrogen fixation and nutrient fluxes in a clover-dominated sward. *New Phytol.* 169, 157-167.
- Edwards, R.L., Omveldt, I.T., Turman, E.J., Stephens, D.F., Mahoney, G.W.A. (1968) Reproductive performance in gilts following heat stress prior to breeding and early gestation. *J. Anim. Sci.* 27, 1634-1637.
- EEA (2004) EEA Technical Report No 2. Impacts of Europe's changing climate. European Environment Agency, 101 S.
- EEA (2005) EEA Technical Report No 7. Vulnerability and adaptation to climate change in Europe. European Environment Agency, 79 S.
- EEA (2007) EEA Briefing 01/2007. Climate Change and Water Adaptation Issues. European Environmental Agency, 4 S.
- Eitzinger, J. (2007) Klimaszenarien für Österreich und bisherige Ergebnisse aus Studien über Auswirkungen/Anpassungsoptionen im Pflanzenbau. ADAGIO-Workshop „Landwirtschaft und Klimawandel“, BOKU Wien, 3. Juli 2007.
- Ellenberg, H. (1996) Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. 1095 S.
- Elsner J.B. (2006) Evidence in support of the climate change–Atlantic hurricane hypothesis. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16705, doi, 10.1029/2006GL026869.
- Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (1994) Schutz der Grünen Erde, Klimaschutz durch umweltgerechte Landwirtschaft und Erhalt der Wälder. Economica Verlag, Bonn, 702 S.
- Entrup, N.L., Oehmichen J. (2000) Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2, Kulturpflanzen, 856 S.
- EPSO (European Plant Science Organization) (2005) European plant science, a field of opportunities. *J. Exp. Bot.* 56 (417), 1699-1709.
- Ernährungsdienst (2007) Chancen im Biomarkt jetzt nutzen. Zugriff 9.02.2007: <http://www.ernaehrungsdienst.de/nachrichten/aktu-ell/pages/show.prl?params=%26recent%3D1%26type%3D1&id=22079&currPage=>.
- Esser, J. (1994) Direkte Wirkungen erhöhter UV-B-Strahlung auf Pflanzen. In: Klimaveränderung und Landwirtschaft Teil II. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 148, 187-202.
- Eulenstein, F., Augustin, J., Wiggering, H. (2005) Zusammenfassung. In: Wiggering, H., Eulenstein, F., Augustin, J. (Hrsg.) Entwicklung eines integrierten Klimaschutzmanagements für Brandenburg. Handlungsfeld Landwirtschaft. Zugriff 04/2006: http://z2.zalf.de/content/1787_Zusammenfassung_Eulenstein.pdf.
- Europa (2006) Überblick über die Tätigkeitsbereiche der Europäischen Union. Landwirtschaft. Zugriff 04/2007: http://europa.eu/pol/agr/print_overview_de.htm.
- European Commission (2005) Area under sugarbeet yield and production of sugar. Agriculture in the European Union – Statistical and economic information 2005. Zugriff 04/2007: http://ec.europa.eu/agriculture/agrista/2005/table_en/4311.pdf
- European Commission (2005a) European Research on Climate Change. Catalogue of FP6 Projects. Volume 1. Sustainable Development, Global Change and Ecosystems, 87 S.
- European Commission (2007) Foresighting food, rural and agri-futures. Report of high level independent expert group, appointed by the European Commission, February 2007. European Commission, Directorate-General for Research, 80 S.
- Eurostat-Pressestelle (Hrsg.) (2005) Zahlenmaterial über den Einfluss der Landwirtschaft auf die Treibhausgasemissionen. In: EU press release

- STAT/05/113, September 9, 2005. Zugriff: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=STAT/05/113&format=HTML&aged=0&language=DE&guiLanguage=en>
- Evans, L.T. (Hrsg.) (1993) Crop evolution, adaptation and yield. Cambridge University Press. 512. S.
- Ewert F., Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Metzger, M.J., Leemans, R. (2005). Future scenarios of European agricultural land use I. Estimating changes in crop productivity. *Agr. Ecosyst. Environ.* 107, 101-116.
- Fangmeier, A., Bender, J. (2002) Air Pollutant Combinations – Significance for Future Impact Assessments on Vegetation. *Phyton (Austria) Special issue, "Global Change"* Vol 42 (3) 65-71.
- Fangmeier, A., De Temmerman, L., Black, C., Persson, K., Vorne, V. (2002). Effects of elevated CO₂ and/or ozone on nutrient concentrations and nutrient uptake of potatoes. *Eur. J. Agron.* 17, 353-368.
- Fangmeier, A., Franzaring, J. (2006) Klimaänderungen und die Folgen für die Landwirtschaft. In: Hütter, C.P., Link, F.-G. (Hrsg.) *Warnsignal Klimawandel, Wird Wasser knapper? Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart. Beiträge der Akademie für Natur- und Umweltschutz Baden-Württemberg* 42, 86-99.
- FAO (Food and Agriculture Organization) (1996) Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes. Wiley J. & Sons Ltd, Rome, Italy.
- FAO (Food and Agriculture Organization) (2005) Special Event on Impact of Climate Change, Pest and Diseases on Food Security and Poverty Reduction. Background Document. 31st Session of the Committee on World Food Security, 23-26 May 2005, 9 S.
- FAO (Food and Agriculture Organization) (2007) Adaptation to climate change in agriculture, forestry and fisheries, Perspective, framework and priorities. Food and Agriculture Organization, Rome, 24 S. Zugriff 04/2007: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/j9271e/j9271e.pdf>.
- Felzer, B., Reilly, J., Melillo, J., Kicklighter, D., Sarofim, M., Wang, C., Prinn, R., Zhunang, Q. (2005) Future effects of ozone on carbon sequestration and climate change policy using a global biogeochemical model. *Climatic Change* 73, 345-373.
- Finnan, J.M., Donnelly, A., Jones, M.B., Burke, J.I. (2005). The Effect of Elevated Levels of Carbon Dioxide on Potato Crops, A Review. *J. Crop Improvement* 13, 91-112.
- Finocchiaro, R., van Kaam, J.B.C.H., Portolano, B., Misztal, I. (2005) Effect of heat stress on production of Mediterranean dairy sheep. *J. Dairy Sci.* 88 (5), 1855-1864.
- Fischer, A. (2001) Vergleichende Untersuchungen zum Verhalten von Wiederkäuern (Rind und Schaf) auf extensivierten Niedermoorweiden. Habilitationsschrift, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät der Humboldt-Universität Berlin.
- Fischer, A., Geschke, C. (2000) UV-B-Belastung bei verschiedenen Rassen von Weiderindern im Rahmen der Landschaftspflege. *ZALF-Jahresbericht 1998/99*, S. 134-136.
- Fischer, G., Shah, M., Tubiello F.N., van Velhuizen, H. (2005) Socio-economic and climate change impacts on agriculture, an integrated assessment, 1990-2080. *Philos. T. R. Soc. B* 360, 2067-2083.
- Fischler, F. (2006) Die EU-Agrarpolitik im Wandel. In: *ZMI arte* http://www.bpb.de/themen/BU0W07,0,0,Die_EU_Agrarpolitik_im_Wandel.html.
- Fiscus, E.L., Booker, F.L., Burkey K.O. (2005) Crop responses to ozone, uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. *Plant Cell Environ.* 28, 997-1011.
- Fitter A.H., Hay, R.K.M (1987) *Environmental Physiology of Plants*. Second Edition. Academic Press. London. 423 S.

- Flachowsky, G., Lebzien, P. (2005) Weniger Spurengase durch gezielte Ernährung der Nutztierre. Forschungsreport Verbraucherschutz – Ernährung – Landwirtschaft. 1/2005. Senat der Bundesforschungsanstalten im Geschäftsbe-
reich des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.) 7-9.
- Flannery T. (2006) Wir Wettermacher. Wie die Menschen das Klima verändern und was das für unser Leben auf der Erde bedeutet. Fischer-Verlag, Frankfurt, 397 S.
- Foeroid, B., Hogh-Jensen, H. (2004) Carbon sequestration potential of organic agriculture in northern Europe – a modelling approach. *Nutr.Cycl. Agroecosys.* 68 (1),13-24.
- Follett, R.F. (2001) Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Till. Res.* 61 (1-2), 77-92.
- Forkel, R., Knoche, R (2006) Regionale Klimaveränderung und ihr Einfluss auf das bodennahe Ozon in Süddeutschland. 7. Deutsche Klimatagung. Klimatrends, Vergangenheit und Zukunft. 09-11. Oktober 2006 München. Zugriff 02/2007: [http://www.meteo.physik.uni-muen-
chen.de/dkt/abstracts/atmosphaerenchemie/Forkel_v.pdf](http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/dkt/abstracts/atmosphaerenchemie/Forkel_v.pdf).
- Franzaring, J., Henning-Müller, I., Funk, R., Hermann, W., Wulfmeyer, V., Claupein, W., Fangmeier, A. (2007) Effects of solar, climatic and atmospheric components on historical crop yields. *Gefahrst. Reinhalt. L.* 67 (6) 251-258.
- Freier, B. (2004) Pflanzenschutz, Welche Risiken liegen vor uns, und wie bekommen wir sie in den Griff? In: Isermeyer, F. (Hrsg.) Ackerbau 2025. *Landbauforschung Völkenrode. Sonderheft 274*, 99-102.
- Friedrich, S. (1994) Wirkung veränderter klimatischer Faktoren auf Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschädlinge. In: *Klimaveränderung und Landbewirtschaftung Teil II. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 148*, 295-301.
- Friedt, W. (2007) Visionen der Pflanzenzüchtung aus der Sicht der Züchtungsforschung. In: *Sor-
ten für Morgen – Herausforderungen für die Pflanzenzüchtung*, Ausschuss für Pflanzenzüchtung und Saatgut der DLG-Wintertagung, 09-11.01.2007. Zugriff 01/2007: http://download.dlg.org/pdf/wita2007/PR_Friedt.
- Fuhrer J. (2007) Sustainability of Crop Production Systems under Climate Change. In: Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Hrsg.) *Agroecosystems in a Changing Climate*, CRC Press, Florida, 167-185.
- Fuhrer, J. (2003) Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone and global climate change. *Agr. Ecosyst. Environ.* 97, 1-20.
- Fuhrer, J. (Hrsg.) (1997) *Klimaänderung und Grünland*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau. Zürich, 311 S.
- Fuhrer, J., Skärby L., Ashmore, M.R. (1997) Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environ. Pollut.* (1-2) 91-106.
- Fumagalli, I., Gimeno, B.S., Velissariou, D., De Temmerman, L., Mills, G. (2001) Evidence of ozone-induced adverse effects on crops in the Mediterranean region. *Atmos. Environ.* 35 (14), 2583-2587.
- Fuquai, J.W. (1981) Heat Stress as it affects animal production. *J. Anim. Sci.* 52 (1), 164-174.
- Gallardo, M.R., Valtorta, S.E., Leva, P.E., Gaggiotti, M.C., Conti, G.A., Gregoret, R.F. (2005) Diet and cooling interactions on physiological responses of grazing dairy cows, milk production and composition. *Int. J. Biometeorol.* 50 (2), 90-95.
- Gehrke, T. (2007) Wie ändern sich die Risiken für meinen Betrieb? DLG-Pflanzenbautagung „Klimawandel – Strategien für den deutschen Pflanzenbau“, 20.06.2007 in Bernburg. Zugriff 08/2007: <http://download.dlg.org/pdf/pb2007/gehrke.pdf>
- Geijn van de, S.C., Goudriaan J. (1996) The effects of elevated CO₂ and temperature change on transpiration and crop water use. In: *Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydro-*

- logical, pedological and plant processes. FAO, Rome, Italy.
- Gerhard, M. (2007) Trends und Möglichkeiten der Landtechnik für Anpassungsoptionen an den Klimawandel. ADAGIO-Workshop „Landwirtschaft und Klimawandel“, BOKU Wien, 3. Juli 2007.
- Gerstengarbe, F.W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, W., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P.C. (2003) PIK-Report No. 83. Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., 78 S.
- Ghannoum, O., Searson, M.J., Conroy, J.P. (2007) Nutrient and Water Demands of Plants under Global Climate Change. In: Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Hrsg.) *Agroecosystems in a Changing Climate*, CRC Press, Florida, 53-84.
- Gillet, N.P., Graf, H.F., Osborn, T.J. (2003) Climate change and the NAO. *American Geophysical Union*. Washington DC. USA.
- Gömann, H., Kreins, P. (2006) Deutschland – der künftige Maisgürtel Europas? *Wissenschaft erleben* 1, 12-13.
- Gregory, P.J., Ingram, J.S.I., Brklacich, M. (2005) Climate change and food security. *Philos. T. R. Soc. B* 360, 2139-2148.
- Groenigen van, K.-J., Graaff de, M.-A., Six, J., Harris, D., Kuikman, P., Kessel van, C. (2006) The Impact of Elevated Atmospheric [CO₂] on Soil C and N Dynamics, A Meta-Analysis. In: Nösberger J., Long S.P., Norby R.J., Stitt M., Hendrey G.R., Blum H. (Hrsg.) *Managed Ecosystems and CO₂*. *Ecol. Stud.* 187. Springer Verlag, 373-391.
- Groth, J.V., Krupa, S.V. (2000) Crop Ecosystem Responses to Climatic Change, Interactive Effects of Ozone, Ultraviolet-B Radiation, Sulphur Dioxide and Carbon Dioxide on Crops. In: Reddy K.R., Hodges, H.F. (Hrsg.) *Climate Change and Global Crop Productivity*. CABI Publishing, New York, USA, 387-405.
- Gudleifson, B.E. (2005) Winter stresses to crops and native plants during climate change. In: NJF-Seminar 380. *Adaptation of Crops and Cropping Systems to Climate Change*. NJF Report 1(3) 39
- Günther, T. (2004) Langzeitverhalten hydrometeorologischer Größen. In: Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.) *Klimaveränderung und Konsequenz für die Wasserwirtschaft – 2. KLIWA-Symposium*. Bayerisches Amt für Wasserwirtschaft, München.
- Haas, G., Geier, U., Schulz, D.G., Köpke, U. (1995) Vergleich Konventioneller und Organischer Landbau – Teil I, Klimarelevante Kohlendioxid-Emission durch den Verbrauch fossiler Energie. *Ber. Landwirtsch.* 73, 401-415.
- Hadley Centre (2003) *Climate Change, Observations and Predictions*. Hadley Centre Report 2003. Met Office, UK.
- Hahlen, J. (2006) „Erzeugung und Verbrauch von Nahrungsmitteln“ Pressekonferenz am 16.01.06 auf der Grünen Woche in Berlin. Zugriff: www.destatis.de/presse/deutsch/pk/2006/lawi_statement_hahlen.pdf.
- Hahn, H., McManus, M.A., Scott, D.B. (2004) Können endophytische Pilze die Trockenstress-Toleranz von Deutschem Weidelgras (*Lolium perenne* L.) verbessern? *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*. 16, 23-24.
- Hall, A.E., Ziska, L.H. (2000) Crop Breeding Strategies for the 21st Century. In: *Climate Change and Global Crop Productivity*. Reddy K.R., Hodges, H.F. (Hrsg.) CABI Publishing, New York, USA, 407-423.
- Hall, G.V., D'Souza, R.M., Kirk, M.D. (2002) Foodborne disease in the new millennium, out of the frying pan and into the fire? *Med. J. Australia* 177 (2/16), 614-618.
- Hare W. (2003) Assessment of Knowledge on Impacts of Climate Change, Contributions to the Specification of Art. 2 of the UNFCCC.

- WBGU Materialien Berlin. Zugriff 10/2006: http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003_ex01.pdf.
- Harmens, H., Mills, G., Emberson, L.D., Ashmore, M.R. (2007) Implications of climate change for the stomatal flux of ozone, A case study for winter wheat. *Environ. Pollut.* 146 (3), 763-770.
- Harrison, P.A., Butterfield, R.E., Downing, T.E. (Hrsg.) *Climate Change and Agriculture in Europe. Assessment of Impacts and Adaptations*, 411 S.
- Hartwig, U.A., Sadowsky M.J. (2006) Biological Nitrogen Fixation, A key Process for the Response of Grassland Ecosystems. In: Nösberger J., Long S.P., Norby R.J., Stitt M., Hendrey G.R., Blum H. (Hrsg.) *Managed Ecosystems and CO₂*. *Ecological Studies* 187. Springer Verlag, 325-336.
- Hasselmann, L., Fischer, A., Schalit, G. (2003) Untersuchungen zur Verdaulichkeit und zum Energiegehalt von Futterpflanzen auf Niedermoorstandweiden in Abhängigkeit vom Vegetationsverlauf. *Arch. Acker Pfl. Boden* 50, 201-210.
- Hattermann, F.F., Krysanova, V., Wechsung, F. (2005) Folgen von Klimawandel und Landnutzungsänderungen für den Landschaftswasserhaushalt und die landwirtschaftlichen Erträge im Gebiet der deutschen Elbe. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe P. (Hrsg.) *Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft*. Band 6, 151-164.
- Haumann, G., Dietzsch, H. (2000) Winter- und Sommerweizen. In: Oehmichen J., Lüttge Entrup N. (Hrsg.) *Lehrbuch des Pflanzenbauwes.* Band 2, Kulturpflanzen. 258-324.
- Heagle, A.S., Miller, J.E., Sherrill, D.E., Rawlings, J.O. (1993) Effects of Ozone and Carbon Dioxide Mixtures on 2 Clones of White Clover. *New Phytol.* 123 (4), 751-762.
- Hebeisen, T., Lüscher, A., Zanetti, S., Fischer, B.U., Hartwig, U.A., Frehner, M., Hendrey, G.R., Blum, H., Nösberger, J. (1997) Growth response of *Trifolium repens* L and *Lolium perenne* L as monocultures and bi-species mixture to free air CO₂ enrichment and management. *Glob. Change Biol.* 3 (2), 149-160.
- Hendrey, G.R., Miglietta, F. (2006) FACE Technology, Past, Present, and Future. In: Nösberger J., Long S.P., Norby R.J., Stitt M., Hendrey G.R., Blum H. (Hrsg.) *Managed Ecosystems and CO₂*. *Ecol. Stud.* 187. Springer Verlag, 15-43.
- Henniges Y., Danzeisen, H., Zimmermann, R.-D. (2005) Regionale Klimatrends mit Hilfe der phänologischen Uhr, dargestellt am Beispiel Rheinland-Pfalz. *UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox.* 17(1), 28-24.
- Hepperly, P., Douds, D., Seidel, R. (2006) The Rodale Institute Farming Systems Trial 1981 to 2005, long-term analysis of organic and conventional maize and soybean cropping systems. In: *Long-term field experiments in organic farming*. Koster-Verlag Berlin, 15-31.
- Herrmann, A., Kornher, A., Taube, F. (2004) Ertragsentwicklung von Silomais und Deutschem Weidelgras – Zuchtfortschritt oder Klimawandel? *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaft* 16, 99-100.
- Hertstein, U., Dämmgen, U., Jäger, H.-J., Mirschel, G., Obenauf, S., Rogasik J. (1994) Wirkungen eines veränderten Klimas auf die landwirtschaftliche Primärproduktion. In: *Klimaveränderung und Landbewirtschaftung Teil II. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 148, 237-294.
- Hilbert, M. (1986) Mais. In: Oehmichen (Hrsg.) *Pflanzenproduktion*. Band 2. Produktionstechnik. Parey Verlag, 343-375.
- Hill, P.W. (2006) Carbon Partitioning and Respiration – Their Control and Role in Plants at high CO₂. In: Nösberger J., Long S.P., Norby R.J., Stitt M., Hendrey G.R., Blum H. (Hrsg.) *Managed Ecosystems and CO₂*. *Ecol. Stud.* 187. Springer Verlag, 271-292.
- Hillman, P.E., Lee, C.N., Willard, S.T. (2005) Thermo regulatory responses associated with lying and standing in heat-stressed dairy cows. *T. ASAE* 48 (2), 795-801.

- HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Hrsg.) (2005) Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen INKLIM 2012. Projektbaustein II, Klimawandel und Klimafolgen in Hessen. Abschlussbericht. 67 S.
- Holland, M., Mills, G., Hayes F., Buse, A., Emberson, L., Cambridge, H. Cinderby S., Terry, A., Ahsmore, M. (2002) Economic Assessment of Crop Yield Losses from Ozone Exposure. Report to U.K. Department of Environment Food and Rural Affairs under Contract 1/3/170. Center for Ecology and Hydrology. The UNECE International Cooperative Programme on Vegetation. Zugriff 03/2007: <http://www.airquality.co.uk/archive/reports/>.
- Holopainen, J.K. (1996) Ozone levels and plant growth. Trends in plant science. Research news, S. 368-369.
- Holt, S.M., Gaughan, J.B., Mader, T.L. (2004) Feeding strategies for grain-fed cattle in a hot environment. Aust. J. Agr. Res. 55 (7), 719-725.
- Holz, J. (2007) Aufs falsche Pferd gesetzt? Saatgut-Magazin, DLG-Mitteilungen, 29-31.
- Honermeier B. (2000) Winterrogen und Triticale. In: Oehmichen J und Lütke Entrup N (Hrsg.). Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2, 362-386.
- Houghton R.A. (1999) The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. Tellus B 51, 298-313.
- Hübner, W., Metz, R. (1996) Lokale rezente Klimaschwankungen und Landwirtschaft. In: Obenauf, S., Rogasik, J. (Hrsg.) 1. Workshop Klimaveränderungen und Landbewirtschaftung – Landwirtschaft als Verursacherin und Betroffene. 22.-24. Mai in Müncheberg. Tagungsbericht. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 165, 53-58.
- Hugger, H. (2005a) Bleibt Mais am Standort Deutschland zukünftig wettbewerbsfähig? Pflanzenbautagung 2005 der DLG (Deutsche Landwirtschaftliche Gesellschaft). Zugriff 04/2006: <http://www.dlg.org/de/landwirtschaft/veranstaltungen/pflanzenbautagung/hugger.html>
- Hugger, H. (2005b) Bleibt der Körnermaisbau wettbewerbsfähig? Zugriff 04/2006: <http://www.dsv-saaten.de/content/php?f.10075/o.article.74/>.
- Hulme M, Barrow EM, Arnell NW, Harrison PA, Johns TC, Downing TE (1999) Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability. Nature 397, 688-691
- Hülsbergen (2006) Klimaverändernde Faktoren vermeiden, Auswirkungen des Klimawandels abmildern, Welchen Beitrag leistet das System Biolandbau. Fachbeitrag Biolandtagung „Klimawandel und Biolandbau“, 16.03.06, Freising, 2006.
- Humphreys, M.W., Yadav, R.S., Cairns, A.J., Turner, L.B., Humphreys, J., Skøt, L. (2006) A changing climate for grassland research. Tansley review. New Phytol. 169, 9-26.
- ICP Vegetation (2002) Air Pollution and Vegetation. Annual Report 2001/2002. The United Nations Economic Commission for Europe International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops, 55 S.
- ICP Vegetation (2006) Air Pollution and Vegetation. Annual Report 2005/2006. The United Nations Economic Commission for Europe International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops. 46 S. Zugriff 03/2007 unter: <http://icpvegetation.ceh.ac.uk/ICP%20Vegetation%20annual%20report%202005-2006%20web.pdf>.
- Idso, S.B., Idso, K.E. (2001) Effects of atmospheric CO₂ enrichment on plant constituents related to animal and human health. Environ. Exp. Bot. 45, 179-199.
- Idso, S.B., Kimball, B.A., Mauney, J.R. (1987) Atmospheric Carbon Dioxide Enrichment Effects on Cotton Midday Foliage Temperature, Implications for Plant Water Use and Crop Yield. Agron. J. 79, 667-672.
- Idso, S.B., Kimball, B.A.. (1997). Effects of long-term atmospheric CO₂ enrichment on the

- growth and fruit production of sour orange trees. *Glob. Change Biol.* 3, 89–96.
- IFOK (Institut für Organisationskommunikation GmbH) (2007) LandCaRe 2020. Akteursinterviews – Anforderungen an ein DSS. Projektbericht. 49 S.
- IGER (Institute of Grassland and Environmental Research) (2003) The Impacts of Climate Change on UK Agriculture. Zugriff 04/2007 unter:
<http://www.iger.bbsrc.ac.uk/Practice/The%20Impacts%20of%20Climate%20Change%20on%20UK%20Agriculture.pdf>.
- Igono, M.O., Bjotvedt, G., Sanfordcrane H.T. (1992) Environmental Profile and Critical-Temperature Effects on Milk-Production of Holstein Cows in Desert Climate. *Int. J. Biometeorol.* 36 (2), 77-87.
- IPCC (1996) IPCC Second Assessment Report, Climate Change 1995.
- IPCC (2001a) Climate Change 2001. Working Group I, The Scientific Basis. Cambridge University Press, Port Chester (New York).
- IPCC (2001b) Climate Change 2001. Working Group II, Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press, Port Chester (New York).
- IPCC (2002) Climate Change and Biodiversity. IPCC Technical Paper V. IPCC, 86 p.
- IPCC (2007a) Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Zugriff 04/2007: <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>.
- IPCC (2007b) Climate Change 2007, Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the IPCC Forth Assessment Report. Zugriff 08/2007: <http://www.ipcc-wg2.org/>.
- Isermeyer, F. (Hrsg.) (2004) Ackerbau 2025. Landbauforschung Völkenrode. Sonderheft 274, 180 S.
- Isopp, H., Frehner, M., Almeida, J.P.F., Blum, H., Daepf, M., Hartwig, U.A., Lüscher, A., Suter, S., Nösberger J. (2000) Nitrogen plays a major role in leaves when source-sink relations change, C and N metabolism in *Lolium perenne* growing under free air CO₂ enrichment. *Aust. J. Plant Physiol.* 27 (8-9), 851-858.
- Jackson, P., Robertson, M., Cooper, M., Hammer, G. (1996) The role of physiological understanding in plant breeding, from a breeding perspective. *Field Crop Res.* 49, 11-39.
- Jacob, D. (2006) Von der globalen zur regionalen Klimaprojektion, Was steckt dahinter? Tagungsbeitrag des Workshops „Klimawandel in Deutschland, regionale Klimaänderungen bis 2100“. UBA, Dessau, 25.04.2006.
- Jacob, D., Podzun, R. (1997) Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorol. Atmos. Phys.* 63, 119-129.
- Jacob, H.B., Koch, M. (2005) Folgen, Maßnahmen und Kosten des Klimawandels für den Obstbau in Hessen. Im Rahmen des Integrierten Klimaschutzprogramms Hessen 2012. Baustein II Klimawandel und Klimafolgen in Hessen – Bereich Landwirtschaft, Sonderkultur Obstbau, 143 S. Zugriff 07/2006: <http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/dokumente/endberichte/obstbau.pdf>
- Janssens I.A., Mousseau M., Ceulemans R. (2000) Crop Ecosystem Responses to Climatic Change, Tree Crops. In: Reddy K.R., Hodges, H.F. (Hrsg.) *Climate Change and Global Crop Productivity*. CABI Publishing, New York, USA, 245-270.
- Jarecki, M.K., Lal, R. (2005) Soil organic carbon sequestration rates in two long-term no-till experiments in Ohio. *Soil Sci.* 170 (4), 280-291.
- Jarvis, P.G. (1976) The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 273, 593-610.
- Jaskowski, J.M., Olechnowicz, J., Urbaniak, K. (2005). Summer subfertility in cows. *Med. Weter.* 61, 1323-1327.
- Jetz, W., Wilcove, D.S., Dobson, A.P. (2007) Projected Impacts of Climate and Land-Use Change on the Global Diversity of Birds PLoS

- Biology 5 (6), e157
doi,10.1371/journal.pbio.0050157.
- Johnston, T., Chiotti, Q. (2000). Climate Change and the Adaptability of Agriculture, A Review. *J. Air & Waste Manag. Assoc.* 50, 563-569.
- Jonas, M., Staeger, T., Schönwiese, C.-D. (2005) Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland, UBA-Forschungsvorhaben 201 41 254. Institut für Atmosphäre und Umwelt, Universität Frankfurt/Main. Zugriff 05/2006: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpd-f-1/2946.pdf>.
- Jones P.D., Lister, D.H., Jaggard, K.W., Pidgeon, J.D. (2003) Future climate impact on the productivity of sugar beet (*Beta vulgaris L.*) in Europe. *Climatic Change* 58, 93-108.
- Jones, C., McConnell, C., Coleman, K., Cox, P., Falloon, P., Jenkinson, D., Powlson, D. (2005) Global climate change and soil carbon stocks, predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon from soil. *Glob. Change Biol.* 11, 154-166.
- Kakani, V.G., Reddy, K.R., Zhao, D., Sailaja, K. (2003) Field crop responses to ultraviolet-B radiation, a review. *Agr. Forest Meteorol.* 120 (1-4), 191-218.
- Kammann, C., Grünhage, L., Gruters, U., Janze, S., Jäger, H.J. (2005) Response of aboveground grassland biomass and soil moisture to moderate long-term CO₂ enrichment. *Basic Appl. Ecol.* 6(4), 351-365.
- Kartschall, T., Wolff, M., Wodinski, M und Stock, M. (2005) Weinbau. In: PIK (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.) Verbundvorhaben Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung (KLARA). Analyse spezifischer Verwundbarkeiten und Handlungsoptionen. Abschluss zum Werkvertrag B-Nr., 50047467/23, 81-87.
- Kempf, C. (2007) Klimawandel kostet die deutsche Volkswirtschaft Milliarden. *Wochenbericht DIW Nr. 11/2007*, 165-167.
- Kenny, G.J., Harrison, P.A., Parry, M.L. (Hrsg.) (1993) *The Effect of Climate Change on Agricultural and Horticultural Potential in Europe*. University of Oxford. 224 S.
- Kim, H.-Y. (2003) Seasonal changes in the effects of elevated CO₂ on rice at three levels of nitrogen supply, a free air CO₂ enrichment (FACE) experiment. *Glob. Change Biol.* 9 (6), 826-837.
- Kimball, B.A. (1983) Carbon Dioxide and Agricultural Yield, an Assemblage and Analyses of 430 Prior Observations. *Agron. J.* 75, 779-788.
- Kimball, B.A., Idso, S.B. (1983) Increasing Atmospheric CO₂ – Effects on Crop Yield, Water-Use and Climate. *Agr. Water Manage.* 7 (1-3), 55-72.
- Kimball, B.A., Kobayashi, K., Bindi, M. (2002) Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Adv. Agron.* 77, 293-368.
- Kimball, B.A., Pinter, P.J., Garcia, R.L., Lamorte, R.L., Wall, G.W., Hunsaker, D.J., Wechsung, G., Wechsung, F., Kartschall, T. (1995) Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. *Glob. Change Biol.* 1, 429-442.
- King A.W., Gunderson, A.C., Post, W.M., Weston, D.J., Wullschlegel S.D. (2006) Plant Respiration in a Warmer World. *Science* 312, 536-537.
- Kirk-Davidoff, D.B., Hints, E.J., Anderson, J.G., Keith, D.W. (1999) The effect of climate change on ozone depletion through changes in stratospheric water vapour. *Nature* 402 (6760) 399-401.
- KLARA-Net (Netzwerk zur KLimaAdaption in der Region StArkenburg) (2006) Themengruppen-sitzung Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Weinbau. Protokoll vom 19.12.2006 in 64646 Heppenheim, 17 S.
- Klein, H.G.F., Weniger, J.H. (1986) Auswirkungen einer Temperaturbelastung während der Dauer der ersten Laktation auf Leistung und Thermoregulation bei Kühen der Rasse Deutsche Schwarzbunte. *Z. Tierz. Züchtungsbio.* 103, 279-296.

- Klein, R.J.T. (2004) Approaches, Methods and Tools for Climate Change Impact, Vulnerability and Adaptation Assessment. Keynote lecture to the In-Session Workshop on Impacts of, and Vulnerability and Adaptation to Climate Change, Twenty-First Session of the UNFCCC Subsidiary Body for Scientific and Technical Advice, Buenos Aires, Argentina, 8 December 2004.
- Klimazwei (2007) Anpassung an den Klimawandel durch pflanzenzüchterische Maßnahmen in der Weizenproduktion in Deutschland. Zugriff am 14.02.2007 unter: <http://www.klimazwei.de/ProjektezumSchutzvonKlimawirkungen/Projektübersicht/Weizen/tabid/109/Default.aspx>.
- KLIWA (2004) Klimaänderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. KLIWA Berichte. Heft 4. Zugriff 04/2006 unter: <http://www.kliwa.de/download/heft4-1.pdf> und <http://www.kliwa.de/download/heft4-2.pdf>.
- KLIWA (2005) Vergleich und Bewertung der regionalen Klimaszenarien. Kurzbericht. KLIWA. Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Kooperationsvorhaben der Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie des Deutschen Wetterdienstes. 8 S.
- Knopf, H.E. (1986) Sommergerste. In: Oehmichen (Hrsg.) Pflanzenproduktion. Band 2. Produktionstechnik. Parey Verlag, 300-307.
- Knorr, W., Gobron, N., Scholze, M., Kaminski, T., Schnur, R., Pinty, B. (2007). Impact of terrestrial biosphere carbon exchanges on the anomalous CO₂ increase in 2002-2003. *Geophys. Res. Lett.* 34, doi, 10.1029/2006GL029019, 2007.
- Knorr, W., Prentice, I.C., House, J.I., Holland, E.A. (2005) Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature* 433, 298-301.
- Kobilski, B., Denčić, S. (2001) Review Paper. Global climate change, challenge for breeding and seed production of major field crops. *J. Genet. & Breed.* 55, 83-90.
- Koch, G. (2007) Neues Klima, neue Sorten. DLG-Mitteilungen. Saatgut-Magazin 07, 10-14.
- Kölling, C., Zimmermann, L. (2007) Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. *Gefahrst. Reinhalt. L.* 67 (6), 259-268.
- KOM (2007) Kommission der Europäischen Gemeinschaften. Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU. SEK(2007) 849, 31 S.
- Köpke, U. (2000) Ökologischer Landbau. In: Lütke Entrup, N., Oehmichen J. (Hrsg.) Lehrbuch des Pflanzenbaues Band 2. Kulturpflanzen, Thomas Mann Verlag, Gelsenkirchen-Buer, 772-819.
- Körner, C. (2006) Significance of temperature in plant life. In: Morison, J.I.L., Morecroft, M.D. (Hrsg.) *Plant Growth and Climate Change*. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 48-69.
- Körner, C.H. (2000) Biosphere responses to CO₂ enrichment. *Ecol. Appl.* 10 (6), 1590-1619.
- Kotska-Rick, R., Bender, J., Weigel, H.-J., Gündel, L. (2002) Sichtbare Ozonschäden bei Gemüsepflanzen. Schriftenreihe Landesanstalt für Pflanzenbau und Pflanzenschutz, Mainz, Heft Nr. 12, 53 S.
- Kraus, W. (2004) The 2003 sugar beet campaign in South Germany – VDZ, Zweigverein Süd. *Zuckerindustrie* 129 (5), 349-360.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., Enke, W. (2007) Klimawandel in Deutschland und seine regionalen Auswirkungen. *Gefahrst. Reinhalt. L.* 67 (6), 246-250.
- Kriebitzsch W.-U., Scholz, F., Anders, S., Möller J. (2005) Anpassung von Wäldern an Klimaänderungen. *ForschungsReport* 1/2005, 22-25.
- Krug, H. (2002a) Ökologische Voraussetzungen. In: Krug, H., Liebig, H.-P., Stützel, H. (Hrsg.) *Gemüseproduktion. Ein Lehr- und Nachschlagewerk für Studium und Praxis*. 2002. Eugen Ulmer Verlag. Stuttgart. 30-56.

- Krug, H. (2002b) Die Produktion von Pflanzen. In: Krug, H., Liebig, H.-P., Stützel, H. (Hrsg.) Gemüseproduktion. Ein Lehr- und Nachschlagewerk für Studium und Praxis. 2002. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart. 11-29.
- Krupa S.V., Kickert, R.N. (1989) The Greenhouse-Effect – Impacts of Ultraviolet-B (UV-B) Radiation, Carbon-Dioxide (CO₂) and Ozone (O₃) on Vegetation. *Environ. Pollut.* 61 (4), 263-393.
- Krupa, S.V., Jäger, H.-J. (1996) Adverse effects of elevated levels of ultraviolet (UV)-B radiation and ozone (O₃) on crop growth and productivity. In: *Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant processes.* FAO, Rome, Italy.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (2005) Faustzahlen für die Landwirtschaft. 1095 S.
- Kurukulasuriya P., Rosenthal, S. (2003) Climate Change and Agriculture. A Review of Impacts and Adaptations. Paper No 91. The World Bank Environment Department. Climate Change Series, 96 S.
- KWS Saat AG (2006). Standortansprüche des Mais. Zugriff: <http://www.kws.de/ca/bu/eqp/> am 23.01.2006.
- Lacroix, E.L. de (Hrsg.) (2005) GAP – Die Gemeinsame Agrarpolitik erklärt. Europäische Kommission. Zugriff 03/2007: http://ec.europa.eu/agriculture/publi/capexplained/cap_de.pdf.
- Landwirtschaftskammer Rheinland-Pfalz (2006) Rebsortenspiegel der rheinland-pfälzischen Anbauggebiete 1997-2006. Zugriff am 14.02.2007 unter: <http://www.lwk-rlp.de/bilder/Rebsortenspiegel.pdf>.
- Lange, K. (2006) Borkum unter Palmen. *Fairkehr* 4, 22-23.
- LAP (Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim) (2003) Pflanzenbauliche und wirtschaftliche Auswirkungen verschiedener Verfahren der Bodenbearbeitung. Versuchsbericht „Systemvergleich Bodenbearbeitung“ 1995-2002. Im Rahmen des Forschungsprojektes, „Ökologische Auswirkungen von verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren“. Informationen für die Pflanzenproduktion, Sonderheft 1/2003, 153 S.
- Larson, J.L., Zak, D.R., Sinsabaugh, R.L. (2002) Extracellular enzyme activity beneath temperate trees growing under elevated carbon dioxide and ozone. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66 (6), 1848-1856.
- Latif, M. (2005a) Verändert der Mensch das Klima? UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox. 17 (4), 193-196.
- Latif, M. (2005b) Klimawandel und Wetterextreme. 1. Extremwetterkongress. Hamburg, 16-17.02.2006.
- Lawlor D.W., Mitchell, R.A.C. (2000) Crop Ecosystem Responses to Climatic Change, Wheat. In: Reddy K.R., Hodges, H.F. (Hrsg.) *Climate Change and Global Crop Productivity.* CABI Publishing, New York, USA, 57-80.
- Legel, S. (1989) Nutztiere der Tropen und Subtropen. Band 1, Rinder. Hirzel Verlag Leipzig. 467 S.
- LEL (Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der Ländlichen Räume) (Hrsg.) (2005) G. Getreide. In: *Agrarmärkte 2005.* Zugriff 05/2006: http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1192531/Getreide_1.pdf.
- Lemmen, D.S., Warren, F.J. (Hrsg.) (2004) Climate Change Impacts and Adaptation, A Canadian Perspective. Climate Change Impacts and Adaptation Directorate. Natural Resources Canada, Ontario. Zugriff 10/2006: http://adaptation.nrcan.gc.ca/perspective/pdf/report_e.pdf.
- Leuschner, C., Schipka, F. (2004) Vorstudie Klimawandel und Naturschutz in Deutschland. BfN-Skripten 155. BfN, Bonn, 35 S.
- Lfl (2006) Wirtschaftliche Situation des Marktfruchtbaues im Oktober 2006. <http://www.lfl.bayern.de/ilb/pflanze/03371/index.php>. Zugang, 01.02.2007.

- Li C., Frolking S., Butterbach-Bahl, K. (2005) Carbon Sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing. *Climatic Change* 72, 321-338.
- Lilienthal, H., Haneklaus, S., Schnug, E. (2004) Immer mehr Daten für jeden Quadratmeter – was machen wir daraus? In: Isermeyer, F. (Hrsg.) *Ackerbau 2025. Landbauforschung Völknerode. Sonderheft 274*, 133-146.
- Lin, H., Jiao, H.C., Buyse, J., Decuyper, E. (2006) Strategies for preventing heat stress in poultry. *World. Poultry Sci. J.* 62 (1), 71-85.
- Lipps, H.-P. (2006) Holzerstörende Krankheiten – eine Gefahr für den Weinbau?. DLR-RNH Bad Kreuznach. Veröffentlicht am 04.02.2006. Zugriff 04/2006 unter: <http://www.dlr.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/97bea9dec346348dc12570150036455b/3e9b2e1313e4ac3ec1257139002840c4?OpenDocument>.
- LKP (Landeskuratorium für pflanzliche Erzeugung in Bayern e.V., Hrsg.) (2007) *Aus der Arbeit des LKP und seiner Erzeugerringe 2006*. München. 112 S.
- Loladze, I. (2002) Rising atmospheric CO₂ and human nutrition, towards globally imbalanced plant stoichiometry? *TREE* 17,457-461.
- Long, S.P., Ainsworth, E.A., Rogers, A., Ort D.R. (2004) Rising atmospheric carbon dioxide, plants face the future. *Annu. Rev. Plant. Biol.* 55, 591-628.
- Lorenz W., Langenbruch G. (1989) Investigations on the dispersal of the European corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hbn., Lepidoptera, Pyralidae) in the German Federal Republic. *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Allgemeine und Angewandte Entomologie* 7, 1-3.
- Loss, S.P., Siddique, K.H.M. (1994) Morphological and Physiological Traits Associated with Wheat Yield Increases in Mediterranean Environments. *Adv. Agron.* 52, 229-276.
- Lotter, D.W. (2003) Organic Agriculture. *J. Sustain. Agr.* 21 (4), 59-128.
- Lotter, D.W., Seidel, R., Liebhardt, W. (2003) The performance of organic and conventional cropping systems in an extreme climate year. *Am. J. Alternative Agr.* 18 (3), 146-154.
- Lotze-Campen, H., Müller, C., Bondeau, A., Smith, P., Lucht, W. (2006) Rising Food Demand, Climate Change and the Use of Land and Water. In: Brouwer F., McCarl, B.A. (Hrsg.) *Agriculture and Climate Beyond 2015. A New Perspective on Future Land Use Patterns*. Springer, Dordrecht, Niederlande, 109-130.
- Loya, W.M., Pregitzer, K.S., Karberg, N.J., King, J.S., Giardina C.P. (2003) Reduction of soil carbon formation by tropospheric ozone under increased carbon dioxide levels. *Nature* 425, 705-707.
- Lucht, W., Prentice, I.C., Myneni, R.B., Sitch, S., Friedlingstein, P., Cramer, W., Bousquet, P., Buermann, W., Smith B. (2002) Climatic Control of the High-Latitude Vegetation Greening Trend and Pinatubo Effect. *Science* 31 (296) 1687-1689.
- Lüscher, A., Aeschlimann, U., Schneider, M.K., Blum H. (2006) Short- and Long-Term Responses of Fertile Grassland to Elevated [CO₂]. In: Nösberger J., Long S.P., Norby R.J., Stitt M., Hendrey G.R., Blum H. (Hrsg.) *Managed Ecosystems and CO₂*. *Ecol. Stud.* 187. Springer Verlag, 139-156.
- Lüscher, A., Hartwig, U.A., Suter, D., Nosberger, J. (2000) Direct evidence that symbiotic N₂ fixation in fertile grassland is an important trait for a strong response of plants to elevated atmospheric CO₂. *Glob. Change Biol.* 6, 655-662
- Lütke Entrup E. (1986a) Raps. In: Oehmichen J. (Hrsg.) *Pflanzenproduktion. Band 2, Produktionstechnik*, 463-484.
- Lütke Entrup E. (1986b) Feldfutter- und Zwischenfruchtanbau. In: Oehmichen J. (Hrsg.) *Pflanzenproduktion. Band 2, Produktionstechnik*, 508-565.
- Lütke Entrup N. (2000) Integrierter Landbau – das Leitbild für eine standortgerechte und umweltverträgliche Landwirtschaft. In: Oehmichen,

- J., Lüttge Entrup, N. (Hrsg.) Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2, Kulturpflanzen. 1-23.
- Lynch, J.P., St. Clair S.B. (2004) Mineral stress, the missing link in understanding how global climate change will affect plants in real world soils. *Field Crop Res.* 90, 101-115.
- Maixner, M., Holz, B. (2003) Risks by invasive species for viticulture. *Schriftenreihe des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Reihe A, Angewandte Wissenschaft (No.498)* 154-164.
- Makowski, N. (2000) Körnerleguminosen. In: Oehmichen J., Lüttge Entrup N. (Hrsg.) Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2, Kulturpflanzen. 553-571.
- Makowski, N. (2000) Ölfrüchte, In: Oehmichen, J., Lüttge Entrup, N. (Hrsg.) Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2, Kulturpflanzen, 513-552.
- Manderscheid, R. (1996) Effect of CO₂ enrichment on cereals. In: 1. Workshop, Klimaveränderung und Landbewirtschaftung – Landwirtschaft als Verursacherin und Betroffene. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 165, 61-69.
- Manderscheid, R., Bender, J., Jäger, H.J., Weigel, H.-J. (1995) Effects of Season Long CO₂ Enrichment on Cereals .2. Nutrient Concentrations and Grain Quality. *Agr. Ecosyst. Environ.* 54 (3), 175-185.
- Manderscheid, R., Bender, J., Schenk, U., Weigel, H.J. (1997) Response of biomass and nitrogen yield of white clover to radiation and atmospheric CO₂ concentration. *Environ. Exp. Bot.* 38, 131-143.
- Manderscheid, R., Frühauf, C., Weigel, H.-J. (2003) Wechselwirkung von CO₂-Anreicherung unter Feldbedingungen (FACE) und Stickstoffversorgung auf Wachstum und Ertrag von Zuckerrüben. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 15, 158-160.
- Manderscheid, R., Pacholski, A., Weigel, H.-J. (2005) Hinweis auf Senkenlimitierung des Wachstums von Zuckerrüben unter erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentration. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 17, 356-366.
- Manderscheid, R., Weigel, H.-J. (2006) Klimawandel und Getreideanbau. Worauf muss sich die praktische Landwirtschaft einstellen? *GetreideMagazin* 11. Jg 2/2006, 134-139.
- Manderscheid, R., Weigel, H.-J. (2007) Drought stress effects on wheat are mitigated by atmospheric CO₂ enrichment. *Agron. Sustain. Dev.* 27, 79-87.
- Manning, W.J., Tiedemann, A.V. (1995) Climate change, potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂) ozone (O₃) and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. *Environ. Pollut.* 88, 219-245.
- Maracchi, G., Sirotenko, O., Bindi M. (2005) Impacts of Present and Future Climate Variability on Agriculture and Forestry in the Temperate Regions, Europe. *Climatic Change* 70 (1-2), 117-135.
- Marhan, S., Demin, D., Erbs, M., Kuzyakov, Y., Fangmeier, A., Kandeler E. (2007) Soil organic matter mineralization and residue decomposition of spring wheat grown under elevated CO₂ atmosphere. *Agr. Ecosyst. Environ.* (in press) doi, 10.1016/j.agee.2007.04.001.
- MARS (2006) Monitoring Agriculture with Remote Sensing Bulletin 14 (6) 01.09-10.11.2006. Zugriff 03/2007: http://agrifish.jrc.it/Bulletins/Europe/2006/TR2006_V14_6_PRINT.pdf.
- Masters, G.J., Brown, V.K., Clarke, I.P., Whittaker, J.B., Hollier, J.A. (1998) Direct and indirect effects of climate change on insect herbivores, Auchenorrhyncha (Homoptera). *Ecol. Entomol.* 23, 45-52.
- Mastrandrea, M.C., Schneider, S. (2004) Probabilistic Integrated Assessment of "Dangerous" Climate Change. *Science* 304, 571-574.
- Mattson, W.J., Haack, R.A. (1987) The Role of Drought in Outbreaks of Plant-eating Insects. *Bioscience* 37 (2), 110-118.
- McCown R.L. (2005) New thinking About Farmer Decision Makers. In: Hatfield J.L. (Hrsg.) *The Farmer's Decision. Balancing economic successful agriculture production with environmental quality.* Soil and Water Conservation Society. Iowa, USA. 11-44.

- McKee, I.F., Bullimore, J.F., Long, S.P. (1997) Will elevated CO₂ concentrations protect the yield of wheat from O₃ damage? *Plant Cell Environ.* 20 (1), 77-84.
- McKenney, M.S., Roesenber, N.J. (1993) Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agric. For. Meteorol.* 64, 81-110.
- Mearns L.O., Rosenzweig C., Goldberg R. (1996) The effect of changes in daily and interannual climatic variability on CERES-Wheat, A sensitivity study. *Climatic Change* 32, 257-292.
- Mendelsohn, R. (2000) Measuring the Effect of Climate Change on Developing Country Agriculture. FAO Economic and Social Development Paper 145. Zugriff: <http://www.fao.org/DOCREP/003/X8044E/x8044e03.htm>
- Menon, S. (2004). Current uncertainties in assessing aerosol effects on climate. *Annu. Rev. Env. Resour.* 29, 1-30.
- Menzel, A., Estrella, N., Fabian, P. (2001) Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Glob. Change Biol.* 7 (6), 657-666.
- Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavska, O., Briede, A., Chmielewski, F.-M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, A., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Mage, F., Mestre, A., Nordli, O., Penuelas, J., Pirinen, P., Remisova, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.-E., Zach, S., Zust, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob. Change Biol.* 12, 1-8.
- Meßner, H. (2000) Mais (*Zea mays*). In: Oehmi-chen, J., Lütke Entrup, N. (Hrsg.) *Lehrbuch des Pflanzenbaues*. Band 2, 398-427.
- Michaels, P.J., Knappenberger, P.C., Davis, R.E. (2006) Sea-surface temperatures and tropical cyclones in the Atlantic basin. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L09708, doi, 10.1029/2006GL025757.
- Miglietta, F., Bindi, M., Vaccari, F.P., Schapendonk, A.H.C.M., Wolf, J., Butterfield, R.E. (2000) Crop Ecosystem Responses to Climatic Change, Root and Tuberous Crops. In: Reddy, K.R., Hodges, H.F. (Hrsg.) *Climate Change and Global Food Productivity*. CAB International, 189-212.
- Mirschel, W., Eulenstein, F., Wenkel, K.-O., Wieland, R., Müller, L., Willms, M., Schindler, U., Fischer, A. (2005) 6. Regionale Ertragsschätzung für wichtige Fruchtarten auf repräsentativen Ackerstandorten in Märkisch-Oderland mit Hilfe von SAMT. In: Wiggering, H., Eulenstein, F., Augustin, J. (Hrsg.) *Entwicklung eines integrierten Klimaschutzmanagements für Brandenburg*. Handlungsfeld Landwirtschaft. Zugriff 04/2006: http://z2.zalf.de/content/1784_Ertrag_fuer_Klimawandel_Mirschel.pdf.
- Mirschel, W., Wenkel, K.-O. (1996) Agroökosystemmodelle – Werkzeuge zur Folgenabschätzung von Klimaänderungen. In: 1. Workshop, Klimaveränderung und Landwirtschaft – Landwirtschaft als Verursacherin und Betroffene. *Landbauforschung Völkende, Sonderheft* 165, 151-169.
- MLUR (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein) (2006b) Getreideanbaufläche, Erträge und Ernten. In: *Agrarbericht des Landes Schleswig-Holstein*. Zugriff 07/2006: <http://www.agrarreport-sh.de/>.
- MLUR (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein) (2006a) Getreideernte insgesamt. In: *Agrarbericht des Landes Schleswig-Holstein*. Zugriff 07/2006: <http://www.agrarreport-sh.de/>.
- MLUV (Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz) (2005) Pflanzenproduktion. In: *Agrarbericht 2005 zur Land- und Ernährungswirtschaft des Landes Brandenburg*. Zugriff 07/2006: http://www.mluv.brandenburg.de/cms/media.php/2320/agb_2005.pdf.
- Monjon, S., Soumagnac, S. (2007) Current understanding and research practices related to

- socio-economic aspects of climate change impacts and adaptation. Final report CIRCLE CA. Climate Change Research Coordination for a Larger Europe. Sixth framework programme priority, ERA-NET, 117 S.
- Moore, B.D., Cheng, S.H., Sims, D., Seemann, J.R. (1999) The biochemical and molecular basis for photosynthetic acclimation to elevated atmospheric CO₂. *Plant Cell Environ.* 22, 567-582.
- Morecroft, M.D., Paterson, J.S. (2006) 7. Effects of temperature and precipitation changes on plant communities. In: Morison, J.I.L., Morecroft, M.D. (Hrsg.) *Plant Growth and Climate Change*. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 146-164.
- Morgan, J.A., Pataki, D.E., Korner, C., Clark, H., Del Grosso, S.J., Grunzweig, J.M., Knapp, A.K., Mosier, A.R., Newton, P.C.D., Niklaus, P.A., Nippert, J.B., Nowak, R.S., Parton, W.J., Polley, H.W., Shaw M.R. (2004) Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. *Oecologia* 140 (1), 11-25.
- Morgan, P.B., Bollero, G.A., Nelson, R.L., Dohleman, F.G., Long, S.P. (2005) Smaller than predicted increase in aboveground net primary production and yield of field-grown soybean under fully open-air (CO₂) elevation. *Glob. Change Biol.* 11, 1856-1865.
- Morgan, P.B., Mies, T.A., Bollero, G.A., Nelson, R.L., Long, S.P. (2006) Season-long elevation of ozone concentration to projected 2050 levels under fully open-air conditions substantially decreases the growth and production of soybean. *New Phytol.* 179, 333-343.
- Morison J.I.L. (1985) Sensitivity of stomata and water use efficiency. *Plant Cell Environ.* 8, 467-474.
- Morrow, J.L., Mitloehner, F.M., Johnson, A.K., Galyean, M.L., Dailey, J.W., Edrington, T.S., Anderson, R.C., Genovese, K.J., Poole, T.L., Duke, S.E., Callaway, T.R. (2005) Effect of water sprinkling on incidence of zoonotic pathogens in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 83 (8), 1959-66.
- Mosier, A.R. (1998) Soil processes and global change. *Biol Fertil Soils* 27, 221-229.
- MPI-M (Max-Planck-Institut für Meteorologie) (2006)
<http://www.mpimet.mpg.de/wissenschaft/ueberblick/atmosphaere-im-erdsystem/regionale-klimamodellierung/remo-uba/abbildungen.html>.
- Mrasek, V. (2004) Wärmestress im Weinberg. Wie der Klimawandel Winzer und Wissenschaft herausfordert. Zugriff 05/2006: <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/wib/313471/> vom 24.10.2004.
- Mulchi, C.L., Slaughter, L., Saleem, M., Lee, E.H., Pausch, R., Rowland, R. (1992) Growth and Physiological-Characteristics of Soybean in Open-Top Chambers in Response to Ozone and Increased Atmospheric CO₂. *Agr. Ecosyst. Environ.* 38 (1-2), 107-118.
- Münzing, K., Lindhauer, M.G. (2006) Die Qualität der deutschen Weizenernte. 2. Teil, Mahl- und Backqualität von Weizensorten und -partien in der Bundesrepublik Deutschland. *Mühle + Mischfutter* 143, 664-671.
- MüRück (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft) (2000) Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen (jährlich erscheinende Broschüre) Eigenverlag, München.
- MüRück (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft) (2000),...,2005, Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen (jährlich erscheinende Broschüre) Eigenverlag, München.
- MüRück (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft) (2001) Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen (jährlich erscheinende Broschüre) Eigenverlag, München.
- MüRück (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft) (2002) Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen (jährlich erscheinende Broschüre) Eigenverlag, München.
- MüRück (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft) (2003) Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen (jährlich erscheinende Broschüre) Eigenverlag, München.

- MüRück (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft) (2004) Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen (jährlich erscheinende Broschüre) Eigenverlag, München.
- MüRück (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft) (2005) Topics, Jahresrückblicke Naturkatastrophen (jährlich erscheinende Broschüre) Eigenverlag, München.
- Mußhoff, O., Appel, F. (2007) Was bringen Wetterderivate? DLG-Mitteilungen 9/2007, 20-22.
- NABU (Naturschutz Deutschland e.V.) (2006) Agrarforschung und Biotechnologie, Welche Forschung braucht eine nachhaltige Landwirtschaft? 26 S.
- Nakićenović, N., Alcamo, J., Davis, G. de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., Emilio la Rovere, E., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M.E., Shukla, P.R., Smith, S., Swart, R.J., van Rooyen, S., Victor, N., Dadi, Z. (2000) Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge.
- Natural Resources Canada (2004) Agriculture. In: Climate Change Impacts and Adaptation, A Canadian Perspective. Climate Change Impacts and Adaptation Directorate. Zugriff 12/2005:
http://adaptation.nrcan.gc.ca/perspective/agri_4_e.php.
- Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni, R.B., Running, S.W. (2003) Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science* 300, 1560-1563.
- NFU (National Farmers' Union) (2005) Agriculture and Climate Change. 52 S. Zugriff 08/2006:
<http://www.nfuonline.com/documents/Policy%20Services/Environment/Climate%20Change/NFU%20Climate%20Change.pdf>.
- Niehoff, S. (2006) Hybridweizen einfach führen. In: Saaten-Union News Nr. 40 (07/2006) Bioenergie und mehr. Zugriff 07/2006:
<http://www.saaten-union.de/index.cfm/startid/330/doc/2618/nl/58/contact/1533.html>.
- Niklaus P.S. (2007) Climate Change Effects on Biogeochemical Cycles, Nutrients, and Water Supply. In: Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Hrsg.) *Agroecosystems in a Changing Climate*. CRC Press, Florida, S. 11-52.
- Nowak, R., Ellsworth, D.S., Smith, S.D. (2004) Functional responses of plants to elevated CO₂ – do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New Phytol.* 162, 253-280.
- OcCC (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung) (2002) Das Klima ändert – auch in der Schweiz. Die wichtigsten Ergebnisse des IPCC aus der Schweiz. 48 S. Zugriff (01/2006) unter: <http://www.proclim.ch/products/IPCC-CH02/IPCC-CH02D.pdf>.
- OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) (2002) Study of the Effects of Climate Change on Agriculture, Policy Implications. Joint Working Party on Agriculture and the Environment. COM/AGR/CA/ENV/EPOC(2002)98, 33 S.
- OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) (2006) Agricultural Aspects of the OECD Environmental Outlook to 2030. COM/ENV/EPOC/AGR/CA (2006)24, 17 S.
- OECD/IEA (International Energy Agency) (2006) Adaptation to Climate Change, Key Terms. COM/ENV/EPOC/IEA/SLT (2006)1.
- Okelo, P.O., Carr, L.E., Harrison, P.C., Douglass, L.W., Byrd, V.E., Wabeck, C.W., Schreuders, P.D., Wheaton, F.W., Zimmermann, N.G. (2003) Effectiveness of novel methods to reduce heat stress in broilers, Chilled and carbonated drinking water. *T. ASAE* 46 (2), 453-460.
- Öko-Institut e.V. (2004) Gentechnik-Nachrichten Spezial 15. Transgene dürre- und salztolerante Pflanzen. Zugriff 05/2006 unter: http://www.oeko.de/gen/s015_de.pdf.

- Olesen, J.E. (2007) Climate change as a driver for European agriculture. Standing Committee on Agricultural Research (SCAR). Foresight process. Zugriff 06/2007: http://ec.europa.eu/research/agriculture/scar/pdf/scar_foresight_climate_change_en.pdf.
- Olesen, J.E., Bindi, M. (2002) Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *Eur. J. Agron.* 16, 239-262.
- Olesen, J.E., Carter, T.R., az-Ambrona, C.H., Fronzek, S., Heidmann, T., Hickler, T., Holt, T., Quemada, M., Ruiz-Ramos, M., Rubaek, G.H., Sau, F., Smith, B., Sykes, M.T. (2007) Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Climatic Change* 81, 123-143.
- Olesen, J.E., Jensen, T., Petersen, J. (2000) Sensitivity of field-scale winter wheat production in Denmark to climate variability and climate change. *Climate Res.* 15, 221-238.
- Ontario Forest Research Institute (2003) A Synopsis of Known and Potential Diseases and Parasites Associated With Climate Change. Forest Research Information Paper No. 154. 179 S.
- Ottman, M.J., Kimball, B.A., Pinter, P.J., Wall, G.W., Vanderlip, R.L., Leavitt, S.W., Lamorte, R.L., Matthias, A.D., Brooks, T.J. (2001) Elevated CO₂ increases sorghum biomass under drought conditions. *New Phytol.* 150 (2), 261-273.
- Pampus, M. (2005) Einschätzungen zu möglichen und bereits nachweisbaren Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Biodiversität in Hessen. 151 S. Gutachten im Auftrag des Hessisches Landesamtes für Umwelt und Geologie (Klimaschutz-Monitor). Zugriff 06/2006: <http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/dokumente/endberichte/naturschutz.pdf>.
- Parmesan, C., Yohe, G. (2003) A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421, 37-42.
- Parry, M., Rosenzweig, C., Livermore, M (2005) Climate change, global food supply and risk of hunger. *Philos. T. R. Soc. B* 360, 2125-2138.
- Parry, M.L. (1978) *Climatic Change, Agriculture and Settlement*. Dawson Archon Books, Hamden, Conn., 1978. 214 pp
- Parry, M.L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., Fischer G. (2004) Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environ. Chang.* 14, 53-67.
- Patience, J.F., Umboh, J.F., Chaplin, R.K., Nyachoti, C.M. (2005). Nutritional and physiological responses of growing pigs exposed to a diurnal pattern of heat stress. *Livest. Prod. Sci.* 96, 205-214.
- Patterson, D.T, Westbrook, J.K., Joyce, R.J.V., Lingren, P.D., Rogasik, J. (1999) Weeds, insects, and diseases. *Climatic Change* 43, 711-727.
- Peet M.M., Wolfe, D.W. (2000) Crop Ecosystem Responses to Climatic Change, Vegetable Crops. In: Reddy K.R., Hodges, H.F. (Hrsg.). *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB International, Wallingford, UK, S. 213-244.
- Peñuelas J., Gordon, C., Llorens, L., Nielsen, T., Tietema A., Beier C., Bruna, P., Emmett, B., Estiarte, M., Gorissen (2004) Nonintrusive Field Experiments show different plant responses to warming and drought among sites, seasons, and species in a North-South European Gradient. *Ecosystems* 7, 598-612.
- Pereira, J.S., Chaves, M.-M., Caldeira M.-C., Correia, A.V. (2006) Water availability and productivity. In: Morison, J.I.L., Morecroft, M.D. (Hrsg.) *Plant Growth and Climate Change*. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 118-145.
- Pfeifer, R.A., Southworth J., Doering O.C. (2002) Climate variability impacts on farm-level risk. In: *Effects of Climate Change and Variability on Agricultural Production Systems*. Doering O.C., Randolph, J.C., Southworth, J., Pfeifer, R.A. (Hrsg.) Kluwer Academic Publishers, London, 179-192.
- Phillips, D.A., Fox, T.C., Ferris, H., Moore, J.C. (2006). 23. Increase in Atmospheric [CO₂] and the Soil Food Web. In: Nösberger, J., Long, S.P., Norby, R.J., Stitt, M., Hendrey, G.R.,

- Blum, H. (Hrsg.) Managed Ecosystems and CO₂. Ecol. Stud. 187, 413-428.
- Phillips, R.L., Zak, D.R., Holmes, W.E., White, D.C. (2002) Microbial community composition and function beneath temperate trees exposed to elevated atmospheric carbon dioxide and ozone. *Oecologia* 131 (2), 236-244.
- Pierre, E., Rieder, J. (2000) Dauergrünland. In: Lütke Entrup, N., Oehmichen, J. (Hrsg.) Lehrbuch des Pflanzenbaues Band 2. Kulturpflanzen, Thomas Mann Verlag, Gelsenkirchen-Buer. 692-755.
- PIK (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.) (Hrsg.) (2005) Verbundvorhaben Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung (KLARA). Analyse spezifischer Verwundbarkeiten und Handlungsoptionen. 200 S.
- Pimentel, D., Hepperly, P., Hanson, J., Doude, D., Seidel, R. (2005) Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *Bioscience* 55 (7), 573-582.
- Pleijel, H., Mortensen, L., Fuhrer, J., Ojanpera, K., Danielson, H. (1999) Grain protein accumulation in relation to grain yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in open-top chambers with different concentrations of ozone, carbon dioxide and water availability. *Agr. Ecosys. Environ.* 72, 265-270.
- Podzun, R., Cress, A., Majewski, D., Renner, V. (1995) Simulation of European climate with a limited area model. II, AGCM boundary conditions. *Contributions to atmospheric physics* 68 (3), 205-225.
- Polle, A., Pell, E.J. (1999) The role of carbon dioxide in modifying the plant response to ozone. In: Luo, Y., Mooney, H.A. (Hrsg.) Carbon Dioxide and Environmental Stress. San Diego. Academic Press, 193-213.
- Polley, H.W. (2002) Implications of atmospheric and climatic change for crop yield and water use efficiency. *Crop Sci.* 42 (1), 131-140.
- Poorter H., Perez-Soba, M. (2001) The growth response of plants to elevated CO₂ under non-optimal environmental conditions. *Oecologia* 129 (1), 1-20.
- Poorter, H. (1998) Do slow-growing species and nutrient-stressed plants respond relatively strongly to elevated CO₂? *Glob. Change Biol.* 4 (6), 693-697.
- Porter, J.H., Parry, M.L., Carter T.R. (1991) The Potential Effects of Climatic-Change on Agricultural Insect Pests. *Agr. Forest Meteorol.* 57 (1-3), 221-240.
- Porter, J.R., Semenov, M.A. (1999) Climate variability and crop yields in Europe. *Nature* 400, 724.
- Porter, J.R., Semenov, M.A. (2005) Crop responses to climatic variation. *Philos. T. R. Soc. of London B* 360 (1463), 2021-2035.
- Porter, J.R., Steffen, W. (2004) Current and future issues for Global Environ. Chang. and arable agriculture. *Ges. Pflanzenbauwiss.* 16, 10-14.
- Powlson, D. (2005) Climatology, Will soils amplify climate change? *Nature* 433, 204-205.
- Preger, A.C., Welp, G., Marquardt, U., Koleczek B., Amelung, W. (2006) Humusgehalte in nordrhein-westfälischen Ackerböden, Aktueller Status und zeitliche Entwicklung. *Bonner Bodenkundl. Abh.* 45, 98 S.
- ProClim (2005) Hitzesommer 2003. Synthesebericht. Forum for Climate and Global Change. Bern, 31 S.
- Putz, B. (1986) Kartoffeln. In: Oehmichen, J. (Hrsg.) Pflanzenproduktion. Band 2. Produktionstechnik, 431-463.
- Putz, B. (2000) Kartoffeln, In: Oehmichen, J., Lütke Entrup, N. (Hrsg.) Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band, 2 Kulturpflanzen, 481-512.
- Quiggin, J., Horowitz, J. (2003) Costs of adjustment to climate change. *Aust. J. Agr. Resour. Ec.* 47, 429-446.
- Rao, D.G. (2002) Validation of Corn, Soybean, and Wheat Models in DSSAT for Assessing Climate Change Impacts on Midwest Crop Production. In: Doering O.C., Randolph, J.C., Southworth, J., Pfeifer, R.A. (Hrsg.) Effects of Climate Change and Variability on Agricultural Production Systems. Kluwer Academic Publishers, London, 101-125.

- Rapp, J. (2000) Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland, DWD-Bericht Nr. 212. Selbstverlag, Offenbach. S.?
- Rapp, J. (2001) Regionale Klimatrends in Deutschland im 20. Jahrhundert. In: Klimastatusbericht 2001. DWD, 175-184.
- Rath, D., Gädeken, D., Hesse, D., Schlichting, M.C. (1994) Die Wirkung erhöhter Temperaturen auf die Nutztierhaltung. In: Klimaveränderung und Landbewirtschaftung Teil II. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 148, 341-375.
- Reddy, K.R., Hodges, H.F. (2000) Climate Change and Global Crop Productivity. CABI Publishing, Wallingford, UK, 472 S.
- Reilly J., Schimmelpfennig, D. (2000) Irreversibility, uncertainty, and learning, Portraits of adaptation to long-term climate change. *Climatic Change* 45, 253-278.
- Reilly J.M. (1999) Climate Change and Agriculture, The State of the Scientific Knowledge. *Climatic Change* 43, 645-650.
- Reilly J.M., Schimmelpfennig, D. (1999) Agricultural Impact Assessment, Vulnerability, and the Scope for Adaptation. *Climatic Change* 43, 745-788.
- Reilly, J.M. (1995) Climate Change and Agriculture, Recent Findings and Issues. *Am. J. Agr. Econ.* 77, 727-733.
- Renaudeau, D. (2005) Effects of short-term exposure to high ambient temperature and relative humidity on thermoregulatory responses of European (Large White) and Caribbean (Creole) restrictively-fed growing pigs. *Anim. Res.*, 54 (2), 81-93.
- Richards, R.A. (2002) Current and emerging environmental challenges in Australian agriculture – the role of plant breeding. *Aust. J. Agr. Res.* 53, 881-892.
- Ritchie, J.T., Alagarwamy, G. (2005) Overview of crop models for assessment of crop production. In: Doering O.C., Randolph, J.C., Southworth, J und Pfeifer, R.A. (Hrsg.) Effects of Climate Change and Variability on Agricultural Production Systems. Kluwer Academic Publishers, London, 43-68.
- Rogasik, J., Dämmgen, U., Lüttich M. (1996) Ökosystemare Betrachtungen zum Einfluss klimatischer Faktoren und veränderter Intensität der Landnutzung auf Quellen- und Senkeneigenschaften von Böden für klimarelevante Spurengase. In: 1. Workshop, Klimaveränderung und Landbewirtschaftung – Landwirtschaft als Verursacherin und Betroffene. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 165, 87-104.
- Rogers, A., Ainsworth, E. (2006) The Response of Foliar Carbohydrates to Elevated [CO₂]. In: Nösberger, J., Long, S.P., Norby, R.J., Stitt, M., Hendrey, G.R., Blum, H. (Hrsg.) Managed Ecosystems and CO₂. *Ecol. Stud.* 187, 293-308.
- Rosenzweig, C., Hillel, D. (1998a) Carbon Dioxide, Climate Change and Crop Yields. In: Rosenzweig, C., Hillel, D. (Hrsg.) Climate Change and the Global Harvest. Potential Impacts of the Greenhouse Effect on Agriculture. Oxford University Press. Oxford, 70-100.
- Rosenzweig, C., Hillel, D. (1998b) Effects on Weeds, Insects, and Diseases. In: Rosenzweig, C., Hillel, D. (Hrsg.) Climate Change and the Global Harvest. Potential Impacts of the Greenhouse Effect on Agriculture. Oxford University Press. Oxford, 101-122.
- Rosenzweig, C., Hillel, D. (1998c) 10. Adaptation, Economics and Policy. In: Rosenzweig, C., Hillel, D. (Hrsg.) Climate Change and the Global Harvest. Potential Impacts of the Greenhouse Effect on Agriculture. Oxford University Press. Oxford, 245-260.
- Rosenzweig, C., Hillel, D. (2000) Soils and global climate change, Challenges and opportunities. *Soil Sci.* 165 (1), 47-56.
- Roßberg, D., Michel, V., Graf, R., Neukampf, R. (2007) Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* 59 (7), 155-161.
- Rötter, R., van der Geijn, S.C. (1999) Climate Change Effects on Plant Growth, Crop yield and Livestock. *Climatic Change* 43, 651-681.

- Rounsevell, M.D.A., Evans, S.P., Bullock, P. (1999) Climate Change and Agricultural Soils, Impacts and Adaptation. *Climatic Change* 43, 683-709.
- Rounsevell, M.D.A., Ewert, F., Reginster, I., Lee-mans, R., Carter, T.R. (2005) Future scenarios of European agricultural land use II. Projecting changes in cropland and grassland. *Agr. Ecosyst. Environ.* 107, 117-135.
- Rowell, D.P. (2006) A demonstration of the uncertainty in projections of UK climate change resulting from regional model formulation. *Climatic Change* 79, 243-257.
- Rustad, L.E., Campbell, J.L., Marion, G.M., Norby, R.J., Mitchell, M.J., Hartley, A.E., Cornelissen, J.H.C., Gurevitch, J. (2001) A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and above-ground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126(4), 543-62.
- Saatenunion (2002) Hybridweizen – noch viel zu erwarten. Zugriff am 10.01.2006 unter folgender Verlinkung: <http://www.saatenunion.de/printview-cfm/id/1460/print/yes/cfid/3389191/cftoken/42>
...
- Saatenunion (2007) Energiefruchtfolgen für jeden Standort Zugriff: 03.07.2007 unter: <http://www.saatenunion.de/index.cfm/nav/404/article/2444.html>.
- Saatenunion (2007) Zunehmende Frühsommertrockenheit, Was tut die Weizenzüchtung. Saatenunion Newsletter 42, Züchtung im Klimawandel. Zugriff: <http://www.saatenunion.de/index.cfm/portal/1/nav/319/article/3033/page/print1.html>.
- SAG (Senatsarbeitsgruppe) (2006) Koordinierung der Klimawirkungsforschung im Geschäftsbereich des BMELV. Teil 1. Auswertung der Zusammenstellung von klimarelevanten Projektskizzen aus den Instituten. Stand, August 2005, 213 S.
- SAG (Senatsarbeitsgruppe) (2007) Koordinierung der Klimawirkungsforschung im Geschäftsbereich des BMELV. Teil 2. Empfehlungen zur künftigen Forschung zu zentralen Fragen der Auswirkungen des Klimawandels und mögliche Maßnahmen zur Anpassung der Land- und Forstwirtschaft. Stand 15.05.2007, 43 S.
- Sage, R.F. (1994) Acclimation of photosynthesis to increasing atmospheric CO₂, The gas exchange perspective. *Photosynth. Res.* 39, 351-368.
- Sage, R.F. (2005) Atmospheric CO₂, Environmental Stress, and the Evolution of C4 Photosynthesis. In: Ehleringer J.R., Cerling T.E., Dearing M. D. (Hrsg.) *Ecol. Stud.* 177. A History of Atmospheric CO₂ and its Effects on Plants, Animals, and Ecosystems. Springer Science, 185-213.
- Sage, R.F., Wedin, D.A., Li, M.R. (1999) The biogeography of C4 photosynthesis, Patterns and controlling factors. In: Sage, R.F., Monson, R.K. (Hrsg.) *C4 plant biology*. San Diego, Academic Press, 313-183.
- Savoini, G., Moretti, V.M. (2006). Quality of Primary Food Products as Affected by Climate Change. *Vet. Res. Commun.* 30, 99-103.
- Scabba, F., Canaccini, F., Castagna, A., Bender, J., Weigel, H.-J., Ranieri A. (2006) Physiological and biochemical stress responses in grassland species are influenced by both early-season ozone exposure and interspecific competition. *Environ. Pollut.* 142, 540-548.
- Schär, C., Vidale, P.L., Lütti, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A., Appenzeller, C. (2004). The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 1-4.
- Scheffer, K. (2006) Wie optimiert man den Anbau von Energiepflanzen und ihre Konversion für Wärme, Strom und Treibstoffe? Dokumentation der Konferenz, „Bioenergie – Welche Forschungsfragen stellen sich?“ Am 03.07.2006 an der Universität Kassel.
- Schellnhuber, J. (2007) Mögliche anthropogene Kipp-Prozesse im Erdsystem. Zugriff 08/2007: <http://www.pik-potsdam.de/infothek/kipp-prozesse?searchterm=Kipp+>
- Schenk, U., Jäger, H.J., Weigel, H.J. (1997a) The response of perennial ryegrass and white clover swards to elevated atmospheric CO₂ concentrations. I. Effects on competition and spe-

- cies composition and interaction with N supply. *New Phytol.* 135, 67-79.
- Schenk, U., Jäger, H.J., Weigel, H.J. (1997b) The response of perennial ryegrass / white clover mini-swards to elevated atmospheric CO₂ concentrations, II. Effects on yield and fodder quality. *Grass Forage Sci.* 52 (3), 232-241.
- Scherm, H. (2004) Climate change, can we predict the impacts on plant pathology and pest management? *Can. J. Plant Pathol.* 26, 267-273.
- Scherm, H., Sutherst, R.W., Harrington, R., Ingram J.S.I. (2000) Global networking for assessment of impacts of global change on plant pests. *Environ. Pollut.* 108, 333-341.
- Schindler, U., Steidl, J., Müller, L., Eulenstein, F., Thiere, J. (2007) Drought risk to agricultural land in Northeast and Central Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sc.* 170, 357-362.
- Schmidhuber, J. (2006) Impact of an increased biomass use on agricultural markets, prices and food security, A longer-term perspective. Zugriff (04/2007) unter: <http://www.fao.org/es/esc/BiomassNotreEurope.pdf>.
- Schmitz, G., Rothmeier, I., Greib, G., Ross-Nickoll, M., Bartsch, D. (2002) Process and potential of the spreading of the European Corn Borer (*Ostrinia nubilalis* Hbn.) in Northwest Germany. *Z. Pflanzenk. Pflanzen.* 109 (6), 624-629.
- Schneider, S.H. Easterling, W.E., Meams, L.O. (2000) Adaptation Sensitivity to natural variability, agent assumptions and dynamic climate change. *Climatic Change* 45, 203 – 221.
- Schnug E., Haneklaus S. (2002) Landwirtschaftliche Produktionstechnik und Infiltration von Böden, Beitrag des ökologischen Landbaus zum vorbeugenden Hochwasserschutz. *Landbauforschung Völkenrode* 52 (4), 197-203.
- Schönberger, H. (2004) Der 10-Punkteplan bei Trockenheit. Zugriff am 17.08.2004 unter: <http://www.saatenunion.de/printview.cfm?id=1933&print=yes>
- Schönberger, H., Kropf, U. (2000) Hafer (*Avena sativa*). In: Oehmichen, J., Lütke Entrup, N. (Hrsg.) *Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2, Kulturpflanzen*, 387-397.
- Schönberger, H., Kropf, U. (2000) Winter- und Sommergerste (*Hordeum vulgare*). In: Oehmichen, J., Lütke Entrup, N. (Hrsg.) *Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2, Kulturpflanzen*, 325-361.
- Schönwiese, C.-D. (Red.) (2003) Klimastatement der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, der Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie und der Schweizerischen Gesellschaft für Meteorologie, 8 S. Zugriff 12/2005 unter: http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/aktivitaeten/pdf/klimastatement_2003.pdf.
- Schönwiese, C.-D., Janoschitz, R. (2005) Klimatrendatlas Deutschland 1901-2000. Berichte des Instituts für Atmosphäre und Umwelt der Universität Frankfurt/Main. Eigenverlag. Zugriff 06/2007: <http://web.uni-frankfurt.de/IMGF/meteor/klima/InstBer4.htm>.
- Schönwiese, C.-D., Staeger, T., Trömel, S. (2004) The hot summer 2004 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analysis. *Meteorol. Z.*, 13, 323-327.
- Schröder, G., Goetzke, G., Kuntzke, D. (2006) Control of European corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hbn.) using insecticides – experimental results from the Oderbruch area. *Gesunde Pflanzen* 58 (3), 143-151.
- Schröder, W., Schmidt G., Hasenclever J. (2005) Korrelation meteorologischer und pflanzenphänologischer Indikatoren des Klimawandels. Statistische Analyse am Beispiel Baden-Württemberg. *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.* 17(2), 94-105.
- Schröter, D., Acosta-Michlik, L., Arnell, A.W., Araújo, M.B., Badeck, F., Bakker, M., Bondeau, A., Bugmann, H., Carter, T., Vega-Leinert, A.C.d.l., Erhard, M., Espiñeira, G.Z., Ewert, F., Fritsch, U., Friedlingstein, P., Glendining, M., Gracia, C.A., Hickler, T., House, J., Hulme, M., Klein, R.J.T., Krukenberg, B., Lavorel, S., Leemans, R., Lindner, M., Liski, J., Metzger, M.J., Meyer, J., Mitchell, T.,

- Mohren, F., Morales, P., Moreno, J.M., Reginster, I., Reidsma, P., Rounsevell, M., Pluimers, J., Prentice, I.C., Pussinen, A., Sánchez, A., Sabaté, S., Sitch, S., Smith, B., Smith, J., Smith, P., Sykes, M.T., Thonicke, K., Thuiller, W., Tuck, G., Werf, G.v.d., Vayreda, J., Wattenbach, M., Wilson, D.W., Woodward, F.I., Zaehle, S., Zierl, B., Zudin, S., Cramer, W. (2004) ATEAM –Final report. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam.
- Schuchardt, B., Schirmer, M. (Hrsg.) (2005) Klimawandel und Küste. Die Zukunft der Unterweserregion. Springer-Verlag Heidelberg, 342 S.
- Schultz, H.R. (2005) Veränderungen im Klima und mögliche weinbauliche Konsequenzen. Deutsches Weinbau-Jahrbuch 56, 18-25.
- Schultz, H.R., Hoppmann, D., Hofmann, M. (2005) Der Einfluss klimatischer Veränderungen auf die phänologische Entwicklung der Rebe, die Sorteneignung sowie Mostgewicht und Säurestruktur der Trauben. Beitrag zum Integrierten Klimaschutzprogramm des Landes Hessen (InKlim 2012) des Fachgebiets Weinbau der Forschungsanstalt Geisenheim. 43 S. Zugriff 06/2006:
<http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/dokumente/endberichte/weinbau.pdf>.
- Schulze, D.E., Freibauer, A. (2005) Carbon unlocked from soils. *Nature* 437, 205-206.
- Schüttert, R., Hensche, H.-U. (2000) Betriebs- und marktwirtschaftliche Grundlagen der Pflanzenproduktion. In: Oehmichen, J., Lütke Entrup, N. (Hrsg.) Lehrbuch des Pflanzenbaus. Band 2, Kulturpflanzen, 24-45.
- Schweizer Rück (Schweizer Rückversicherungsgesellschaft) (1998) Landwirtschaft in Europa, Konzepte für ein Risikoprofil im Wandel. Zugriff (12/2005):
[http://www.swissre.com/INTERNET/pwsfilpr.nsf/vwFilebyIDKEYLu/WWIN-4VFD5Z/\\$FILE/approaches_dt.Paras.0003.File.pdf](http://www.swissre.com/INTERNET/pwsfilpr.nsf/vwFilebyIDKEYLu/WWIN-4VFD5Z/$FILE/approaches_dt.Paras.0003.File.pdf)
- Seguin, B., Brisson, N., Legave, J.M., Cortazar, de I.G. (2005) Adaptation of horticulture and viticulture to climate change in France. In: NFJ Report Vol 1, No3, S. 23
- Seling, S., Lindhauer, M.G. (2006) Die Qualität der deutschen Weizenernte 2006. Teil 1, Quantitatives und qualitatives Ergebnis in Bund und Ländern. *Mühle und Mischfutter* 143 (20) 653-662.
- Seyfert, F., Runge, H. (1964) Landwirtschaftliche Wetterkunde. Deutscher Landwirtschaftsverlag. 192 S.
- Sharma, A.K., Rodriguez, L.A., Wilcox, C.J., Collier, R.J., Bachman, K.C., Martin, F.G. (1988) Interactions of Climatic Factors Affecting Milk Yield and Composition. *J. Dairy Sci.* 71 (3), 819-825.
- Shindell, D.T., Rind, D., Lonergan, P. (1998) Increased polar stratospheric ozone losses and delayed eventual recovery owing to increasing greenhouse-gas concentrations. *Nature* 392 (6676), 589-592.
- Skärby, L., Sellden, G., Mortensen L., Bender, J., Jones, M., de Temmerman, L., Wenzel, A., Fuhrer, J. (1993) Responses of Cereals Exposed to Air Pollutants in Open-Top Chambers. In: CEC (Ed.). The European Open-Top Chamber Project, Assessment of the Effects of Air Pollutants on Agricultural Crops. *Air Pollution Research Report* 48, 87-105.
- Skees, J.R., Hazell, P., Miranda, M. (1999) New Approaches to Crop Insurance in Developing Countries. EPTD Discussion Paper No. 55. International Food Policy Research Institute, Washington. Zugriff 03/2007:
<http://www.ifpri.org/divs/eptd/dp/papers/eptdp55.pdf>
- Slingo, J.M., Challinor, A.J., Hoskins, B.J., Wheeler, T.R. (2005) Introduction, food crops in a changing climate. *Philos. T. R. Soc. B* 360, 1983-1989.
- SMUL (Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft) (Hrsg.) (2005) Klimawandel in Sachsen. Sachstand und Ausblick.. 111 S.
- Southworth, J. (2002) Issues and Approaches to Climate Change. In: Doering O.C., Randolph, J.C., Southworth, J., Pfeifer, R.A. (Hrsg.) Ef-

- fects of Climate Change and Variability on Agricultural Production Systems. Kluwer Academic Publishers, London, 21-41.
- Southworth, J., Pfeifer, R.A., Habeck M. (2002) Crop Modelling Results under Climate Change for the upper Midwest USA. In: Doering O.C., Randolph, J.C., Southworth, J., Pfeifer, R.A. (Hrsg.) Effects of Climate Change and Variability on Agricultural Production Systems. Kluwer Academic Publishers, London, 127-157.
- Spanakakis, A (2007) Den gesamten Komplex im Auge behalten. Saatenunion. Zugriff 29.05.2007: <http://www.saaten-uni-on.de/index.cfm/portal/1/nav/319/article/2549/page/print1.html>.
- Statistisches Bundesamt (2002) Fachserie 3, Reihe 3.2.1., Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Wachstum und Ernte – Feldfrüchte – 2001. Juni 2002. Zugriff 05/2006: <https://www-ec.destatis.de>.
- Statistisches Bundesamt (2003) Fachserie 3, Reihe 1.1.1., Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodennutzung und Viehbestand der Betriebe. Mai 2002. Zugriff 05/2006: <https://www-ec.destatis.de>.
- Statistisches Bundesamt (2005a) Fachserie 3, Reihe 3, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Landwirtschaftliche Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung 2003. Januar 2005. S. 139. Zugriff 05/2006: <https://www-ec.destatis.de>.
- Statistisches Bundesamt (2005b) Fachserie 3, Reihe 4, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Viehbestand und tierische Erzeugung 2004. Zugriff 05/2006: <https://www-ec.destatis.de>.
- Statistisches Bundesamt (2006a) Fachserie 3, Reihe 3, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Landwirtschaftliche Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung 2005. August 2006. S. 143. Zugriff 05/2006: <https://www-ec.destatis.de>.
- Statistisches Bundesamt (2006b) Fachserie 3, Reihe 4, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Viehbestand und tierische Erzeugung 2005. September 2006. S. 102. Zugriff 05/2006: <https://www-ec.destatis.de>.
- Statistisches Bundesamt (2007) Fachserie 3 Reihe 4.1. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Rinder und Schweinebestand. 3. November 2006. Zugriff 05/2006: <https://www-ec.destatis.de>.
- Steffen, W., Canadell, P. (2005) Carbon Dioxide Fertilization and Climate Change Policy. Australian Greenhouse Office, 33 S.
- Stern, N. (2006) The Economics of Climate Change. The Stern Review. Zugriff 11/2006: <http://www.cambridge.org/9780521700801>
- Sterzel, T. (2007) Correlation analysis of climate variables and wheat yield data on various aggregation levels in Germany and the EU-15 using GIS and statistical methods, with a focus on heat wave years. In: Gerstengarbe F.W. (Hrsg.) PIK Report No. 108. 128 S.
- Sticht, C., Schrader, S., Giesemann, A., Weigel, H.-J. (2006) Effects of elevated atmospheric CO₂ and N fertilization on abundance, diversity and C-isotopic signature of collembolan communities in arable soil. Appl. Soil Ecol. 34, 219–229.
- Sticht, C., Schrader, S., Giesemann, A., Weigel, H.-J. (2008) Atmospheric CO₂ enrichment induces life strategy and species specific responses of collembolans in the rhizosphere of sugar beet and winter wheat. Soil Biol. Biochem. (im Druck).
- Still, C.J., Berry, J.A., Collatz, G.J., DeFries, R.S. (2003) Global distribution of C₃ and C₄ vegetation, Carbon cycle implications. Global Biogeochem. Cy. 17(1), 1006, doi,10.1029/2001GB001807.
- Stitt, M. (1991) Rising CO₂ Levels and Their Potential Significance for Carbon Flow in Photosynthetic Cells. Plant Cell Environ. 14 (8), 741-762.
- Stmlf (Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten) (2006) Tabelle 15, Anbauflächen, Ernteerträge und Erntemengen in Bayern seit 1950, S. 205. Zugriff 05/2006: <http://www.agrarbericht.de>.

- Stock, M. (2003) Klimaveränderung und Klimaschutz. UWSF. Z. Umweltchem Ökotox. 15 (4), 251-261
- Stone, P.J., Savin, R. (1999) Grain quality and its physiological determinants. In: Satorre, E.H., Slafer, G.A. (Hrsg.) Wheat. Ecology and Physiology of Yield Determination. New York, Food Production Press, 85 S.
- Szith, R. (2007) Einfluss des Klimas auf Pflanzenkrankheiten, Unkräuter und Schädlinge. ADAGIO-Workshop „Landwirtschaft und Klimawandel“, BOKU Wien, 3. Juli 2007.
- Tarnawski, S., Aragno, M. (2006) The Influence of Elevated CO₂ on Diversity, Activity and Biogeochemical Functions of Rhizosphere and Soil Bacterial Communities. In: Nösberger, J., Long, S.P., Norby, R.J., Stitt, M., Hendrey, G.R., Blum, H. (Hrsg.) Managed Ecosystems and CO₂. Ecol. Stud. 187, 393-412.
- Terao, T., Miura, S., Yanagihara, T., Hirose, T., Nagata, K., Tabuchi, H., Kim, H.Y., Lieferring, M., Okada, M., Kobayashi, K. (2005) Influence of free-air CO₂ enrichment (FACE) on the eating quality of rice. J. Sci. Food Agr. 85 (11), 1861-1868.
- Tester, R.F., Morrison, W.R., Ellis, R.H., Piggott, J.R., Batts, G.R., Wheeler, T.R., Morison, J.I.L., Hadley, P., Ledward, D.A. (1995) Effects of elevated growth temperature and carbon dioxide levels on some physicochemical properties of wheat starch. J. Cereal Sci. 22, 63-71.
- Teufel, J. (2005) Entwicklung stresstoleranter Nutzpflanzen im Zuge des Klimawandels, Überblick über den Forschungsstand und Perspektiven. In: Biodiversität und Klima – Vernetzung der Akteure in Deutschland – Ergebnisse und Dokumentation des Auftaktworkshops an der Internationalen Naturschutzakademie des Bundesamtes für Naturschutz, Insel Vilm, 29.09-01.10.2004, 55-56.
- The Royal Society (2005) Food crops in a changing climate, Report of a royal Society Discussion Meeting held in April 2005. Policy document 10/05, June 2005. ISBN 0 85403 615 6.
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y.C., Erasmus, B.F.N., Ferreira de Siqueira, M., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley B., van Jaarsveld A.S., Midgley, G F., Miles, L., Ortega-Huerta, M.A., Peterson, A.T., Phillips O.L., Williams S.E. (2004) Extinction risk from climate change. Nature 427, 145-148.
- Tiedemann, von A. (1996) Globaler Wandel von Atmosphäre und Klima – welche Folgen ergeben sich für den Pflanzenschutz? Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. 48, 73-79.
- TMLNU (Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt) (2005) Landwirtschaftliche Erzeugung. In: Bericht zur Entwicklung der Landwirtschaft in Thüringen 2005. Zugriff 05/2006: http://www.tll.de/agb05/pdf/agb05_2.pdf.
- Tubiello, F.N., Amthorb, J.S., Boote, K.J., Donatelli M., Easterling W., Fischer, G., Gifford, R.M., Howden, M., Reilly J., Rosenzweig, C. (2007) Crop response to elevated CO₂ and world food supply A comment on “Food for Thought...” by Long *et al.*, Science 312, 1918-1921, 2006. Eur. J. Agron 26(3), 215-223.
- Turnpenny, J.R., Parsons, D.J., Armstrong, A.C., Clark, J.A., Cooper, K., Matthews, A.M. (2001) Integrated models of livestock systems for climate change studies. 2. Intensive Systems. Glob. Change Biol. 7, 163-170.
- UBA (Umweltbundesamt) (2005a) Deutsches Treibhausgasinventar 1990-2003. Nationaler Inventarbericht 2005. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen. Berlin, April 2005.
- UBA (Umweltbundesamt) (2005b) Die Zukunft in unseren Händen. 21 Thesen zur Klimaschutzpolitik des 21. Jahrhunderts und ihre Begründungen. 173 p.
- UBA (Umweltbundesamt) (2006a) Künftige Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert. Hintergrundpapier Umweltbundesamt, Dessau, April 2006, aktualisiert im September 2006, 7 S.
- UBA (Umweltbundesamt) (2006b) Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland – Regionale

- Szenarien und nationale Aufgaben. Hintergrundpapier Umweltbundesamt, Dessau, Oktober 2006, 20 S.
- UNECE (2004) Revised manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceeded. Umweltbundesamt, Berlin, Germany (http://www.icpmapping.org/pub/manual_2004).
- Unsworth, M.H., Hogsett, W.E. (1996) Combined effects of changing CO₂, temperature, UV-B radiation and O₃ on crop growth. In: Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant processes. FAO, Rome, Italy.
- USF (Umweltsystemforschung der Universität Kassel) (2005) Klimawandel und Landwirtschaft in Hessen, Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Landwirtschaftliche Erträge. Abschlussbericht des Wissenschaftlichen Zentrums für Umweltsystemforschung der Universität Kassel. INKLIM Baustein 2, 22 S.
- Valkama, E., Koricheva, J., Oksanen, E. (2007) Effects of elevated O₃, alone and in combination with elevated CO₂, on tree leaf chemistry and insect herbivore performance, a meta-analysis. *Glob. Change Biol.* 13, 184-201.
- Van der Merwe, N.J. (2005) CO₂, Grasses and Human Evolution. In: Ehleringer, J.R., Cerling, T.E., Dearing, M.D. (Hrsg.) A History of Atmospheric CO₂ and its Effects on Plants, Animals, and Ecosystems. Springer Science, 293-328.
- Vandermeiren, K., de Temmerman, L., Hookham N. (1995) Ozone sensitivity of *Phaseolus vulgaris* in cultivar differences, growth stage and growing conditions. *Water Air Soil Poll.* 85 (3), 1455-1460.
- Vereinigte Hagel (2002) Mehrgefahrenversicherungen, Ernten gegen Naturgefahren versichern, Presseinformation vom 2. August 2002. Zugriff: [http://www.swissre.com/INTERNET/pwswilpr.nsf/vwFilebyIDKEYLu/WWIN-4VFD5Z/\\$FILE/approaches_dt.Paras.0003.File.pdf](http://www.swissre.com/INTERNET/pwswilpr.nsf/vwFilebyIDKEYLu/WWIN-4VFD5Z/$FILE/approaches_dt.Paras.0003.File.pdf)
- Viner, D., Morison. J.I.L., Wallace C. (2006) Recent and future climate change and their implications for plant growth. In: Morison, J.I.L., Morecroft, M.D. (Hrsg.) Plant Growth and Climate Change. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 1-16.
- Vingarzan, R. (2004) A review of surface ozone background levels and trends. *Atmos. Environ.* 38 (21), 3431-3442.
- Volk, M., Niklaus, P.A., Körner, C. (2000) Soil moisture effects determine CO₂ responses of grassland species. *Oecologia* 125 (3), 380-388.
- Vollmer, F.-J. (1986) Weizen (*Triticum* L.) In: Oehmichen, J. (Hrsg.) Pflanzenproduktion. Band 2. Produktionstechnik. Parey Verlag, 274-279.
- Wall, E., Smit, B. (2005) Climate Change Adaptation in Light of Sustainable Agriculture. *J. Sustain. Agr.* 27(1), 113-123.
- Walls, M. (2006) Agriculture and Environment. SCAR Foresight Group. In: FFRAF report, for-sighting food, rural and agri-futures.
- Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J.C., Frometin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O.H., Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, 389-395.
- Wang, W., Vinocur, B., Altman, A. (2003) Review. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures, towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, doi, 10.1007/s00425-003-1105-5, 1-14.
- Wayne, P., Foster, S., Connolly, J., Bazzaz, F., Epstein, P. (2002) Production of allergenic pollen by ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) is increased in CO₂-enriched atmospheres. *Ann. Allerg. Asthma Im.* 88, 279-282.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2006) Sondergutachten 2006. Die Zukunft der Meere. Zu warm, zu hoch, zu sauer. WBGU Berlin, 114 S.

- Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P. (Hrsg.) (2005) Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft. Band 6. Weißensee Verlag, Berlin.
- Wehling, P. (2004) Wohin entwickelt sich die Pflanzenzüchtung bis zum Jahr 2025? In: Isermeyer, F. (Hrsg.) Ackerbau 2025. Landbau-forschung Völkenrode. Sonderheft 274, 75-98.
- Weigel, H.J. (2004) Gesunde Pflanzen unter zukünftigem Klima, wie beeinflusst der Klimawandel die Pflanzenproduktion? Gesunde Pflanzen. doi, 10.1007/s10343-004-0060-9.
- Weigel, H.-J., Bender, J. (1994) Auswirkungen von Ozon auf Pflanzen. In: Klimaveränderung und Landbewirtschaftung Teil II. Landbau-forschung Völkenrode, Sonderheft 148, 203-236.
- Weigel, H.J., Manderscheid, R. (2005) CO₂ Enrichment Effects on Forage and Grain Nitrogen Content of Pasture and Cereal Plants. J. Crop Improvement 13 (1/2), 73-89.
- Weigel, H.J., Manderscheid, R., Schaller, M. (2007) Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Ertrag und Qualität von Getreide. Getreidetechnologie 61, 142-149.
- Weigel, H.J., Pacholski, A., Burkart, S., Helal, M., Heinemeyer, O., Kleikamp, B., Manderscheid, R., Frühauf, C., Hendrey, G.F., Lewin, K., Nagy, J. (2005) Carbon Turnover in a Crop Rotation under Free Air CO₂ Enrichment (FACE). Pedosphere 15 (6), 728-738.
- Weigel, H.J., Pacholski, A., Waloszcyk, K., Frühauf, C., Manderscheid, R., Anderson, T.H., Heinemeyer, O., Kleikamp, B., Helal, M., Burkart, S., Schrader, S., Sticht, C., Giese-mann, A. (2006) Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on barley, sugar beet and wheat in a rotation, examples from the Braunschweig carbon project. Landbau-forschung Völkenrode 56 (3-4), 101-115.
- Weiland, P., Gömann, H. (2006) Baustelle Biogas. Forschungsreport, Sonderheft 2006, 6-8.
- Weisheimer, A., Palmer, T.N. (2005) Changing frequency of occurrence of extreme seasonal temperatures under global warming. Geophys. Res. Lett. 32, L20721, doi, 10.1029/2005GL023365.
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W. (1997) Proposal for the development of climate scenarios. Climate Research 8, 171-180.
- West, J. W. (2003) Effects of heat-stress on production in dairy cattle. J. Dairy Sci. 86 (6), 2131-2144.
- West, J.B., HilleRisLambers, J., Lee, T.D., Hobbie, S.E., Reich, P.B. (2005) Legume species identity and soil nitrogen supply determine symbiotic nitrogen-fixation responses to elevated atmospheric [CO₂]. New Phytol. 167, 525-530.
- Wetzel, M. (1986) 7.5 Roggen (*Secale cereale*). In: Oehmichen, J. (Hrsg.) Pflanzenproduktion. Band 2. Produktionstechnik. Parey Verlag, 308-332.
- Wheeler, R.M., Tibbitts, T.W., Fitzpatrick, A.H. (1991) Carbon Dioxide Effects on Potato Growth under Different Photoperiods and Irradiance. Crop Science 31, 1209-1213.
- Wheeler, T.R., Craufurd, P.Q., Ellis, R.H., Porter, J.R., Vara-Prasad, P.V. (2000) Temperature variability and the yield of annual crops. Agr. Ecosyst. Environ. 82, 159-167.
- Wheeler, T.R., Daymond, A.J., Ellis, R.H., Hadley, P., Morison, J.I.L. (1995) Field tunnel experiments on onion. In: Harrison, P.A., Butterfield, R.E., Downing, T.E. (Hrsg.) Climate Change and Agriculture in Europe. Assessment of Impacts and Adaptations, 114-124.
- Wheeler, T.R., Hadley, P., Ellis, R.H., Morison, J.I.L. (1993). Changes in growth and radiation use by lettuce crops in relation to temperature and ontogeny. Agr. Forest Meteorol. 66, 173-186.
- Wieser H., Manderscheid, R., Erbs, M., Weigel, H.J. (2007) Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on the quantitative protein composition of wheat grain. Journal of Agricultural Chemistry, submitted
- Wiggering, H., Eulenstein, F., Augustin, J. (2005) Entwicklung eines integrierten Klimaschutz-

- managements für Brandenburg. Handlungsfeld Landwirtschaft. Zugriff 04/2006: http://z2.zalf.de/oa/1773_index.htm.
- Williams, A.N., Nearing, M., Habeck, M., Southworth, J., Pfeifer, R., Doering, O.C., Lowenberg-Deboer, J., Randolph, J.C., Mazzocco M.A. (2001) Global Climate Change, Implications of Extreme Events for Soil Conservation Strategies and Crop Production in the Midwestern United States. In: Scott, D.E. (Hrsg.) *Sustaining the Global Farm*, 509-515.
- Windt, A., Holtschulte, B. (2000) Zucker- und Futterrüben. In: Oehmichen, J., Lüttge Entrup, N. (Hrsg.) *Lehrbuch des Pflanzenbaues*. Band 2, Kulturpflanzen, 428-480.
- Yang, E.S., Cunnold, D.M., Salawitch, R.J., McCormick, M.P., Russell, J., Zawodny, J.M., Oltmans, S., Newchurch, M.J. (2006) Attribution of recovery in lower-stratospheric ozone. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 111 (D17), Art. No. D17309 SEP 9.
- Young, K.J., Long, S.P. (2000) Crop Ecosystem Responses to Climatic Change, Maize and Sorghum. In: Reddy K.R., Hodges H.F. (Hrsg.) *Climate Change and Global Crop Productivity*. CABI Publishing, CABI International, Wallingford, 107-132.
- Zak, D.R., Pregitzer, K.S., King, J.S., Holmes, W.E. (2000) Elevated atmospheric CO₂, fine roots and the response of soil microorganisms, a review and hypothesis. *New Phytol.*, 147 (1), 201-222.
- Zanetti, S., Hartwig, U.A., van Kessel, C., Luscher, A., Hebeisen, T., Frehner, M., Fischer, B.U., Hendrey, G.R., Blum, H., Nosberger, J. (1997) Does nitrogen nutrition restrict the CO₂ response of fertile grassland lacking legumes? *Oecologia* 112 (1), 17-25.
- Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U., Cramer, W. (2005) Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme, 203 S.
- Ziegler, B. (Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinpfalz) Klimaänderung erfordert Flexibilität bei der Bodenbewirtschaftung. Neustadt/W. Zugriff im März 2006 unter: <http://www.landschaft.rlp.de/Internet/global/they-men.nsf/59cc5a1fc9c7e89ec1256fa50045969a/0810c0adb40120e4c1256fe9004054f4?OpenDocument>.

Zeitungsartikel

- Etscheid, G. (2007) Abschied von der Feiluft-Kuh. Weil immer mehr Weiden in Äcker verwandelt werden, verschwinden Bayerns Kühe ganzjährig im Stall – zum Leidwesen der Touristen. *Die Zeit* Nr. 23 vom 31. Mai 2007, S. 15.
- Thies, H. (2007) April, April, Angeblich sind die Landwirte Opfer einer „Dürrekatastrophe“. Doch das Getreide in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern gedeiht prächtig. *Die Zeit*, Nr. 23 vom 31. Mai 2007, S. 15.

Online-Zeitschriften

- Spiegel-online (02.02.2007a) Meeresanstieg bedroht dicht besiedelte Küsten. Spiegel-online vom 02.02.2007. Zugriff: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,463967,00.html>.
- Spiegel-online (02.02.2007b) Deutschlands Inseln könnten versinken, Felder verdorren. Spiegel-online vom 02.02.2007. Zugriff: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,463969,00.html>.
- Spiegel-online (03.05.2007) Bienensterben könnte Lebensmittelkrise auslösen. Spiegel-online vom 03.05.2007. Zugriff: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,480748,00.html>.
- Spiegel-online (18.09.2007) Fleisch soll deutlich teurer werden. Spiegel-online vom 18.09.2007. Zugriff: <http://www.spiegel.de/wirtschaft/0,1518,506288,00.html>.
- Spiegel-online (22.05.2007) Globaler CO₂-Ausstoß steigt dramatisch. Spiegel-online vom

22.05.2007.

Zugriff:

<http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,484114,00.html>.

Zugriff:

<http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,460250,00.html>.

Spiegel-online (24.01.2007) Sorge vor Weltkrieg ums Wasser. Spiegel-online vom 24.01.2007.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Treibhauseffektes. Ohne ihn betrüge die Oberflächentemperatur der Erde ca. -18°C. Aufgrund des Treibhauseffektes beträgt die Temperatur dagegen ca. + 15°C (Quelle: Latif, 2005a).....	10
Abbildung 2: Jährliche Anomalien (Referenzintervall: 1961-1990) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1856-2004, basierend auf direkten Messungen (Land- und Ozeangebiete; Säulen), 10-jährige Glättung (schwarze Kurve) und lineare Trends (Quelle: Schönwiese und Janoschitz, 2005 unter Verwendung von Daten von Jones <i>et al.</i> , 1999).....	16
Abbildung 3: Beobachtete Veränderungen in den globalen Niederschlagsereignissen einschließlich Starkregenereignissen bzw. Trockenperioden (Quelle: IPCC, 2007a).....	16
Abbildung 4: Prognostizierter globaler Temperaturanstieg entsprechend der verschiedenen Emissionsszenarien. Die farbigen Nummern geben die Zahl der Simulationsläufe an, der schattierte Bereich die Standardabweichung vom Mittelwert (durchgezogene Linie) (Quelle: IPCC, 2007a).....	21
Abbildung 5: Schematisierte Darstellung der Zunahme von Temperaturmaxima in Folge des Zusammenspiels der Zunahme von Durchschnittstemperaturen und zunehmender Klimavariabilität (Streuung) (nach IPCC, 2001a).....	21
Abbildung 6: Die aktuell mit dem regionalen Klimamodell REMO projizierten regionalen Temperaturerhöhungen für verschiedene Jahreszeiten (a) (Quelle: MPI-M). Im Vergleich dazu (b) die WETTREG-Temperatursimulationen (Quelle: Spiegel-online).....	31
Abbildung 7: Änderungen des Niederschlages im Sommer- und Winterhalbjahr nach a) REMO- und b) WETTREG-Simulationen (Quelle: MPI-M, Hamburg; Spiegel-online).....	32
Abbildung 8: Naturräumliche Einheiten Deutschlands (Quelle: BfN).....	36
Abbildung 9: Karte der Bodenausgangsgesteine (Maßstab 1: 5000000) (Quelle: BGR).....	37
Abbildung 10: Mittlere Jahresdurchschnittstemperatur (1961-1990) (links), mittlere jährliche Niederschlagshöhe (1961-1990) (Mitte), mittlere Sonnenscheindauer (rechts) (Quelle: Klimaatlas DWD).....	38
Abbildung 11: Standorteignung für landwirtschaftliche Nutzung in Deutschland auf Basis der Ackerzahl (aus Zebisch <i>et al.</i> , 2005 nach Liedtke und Marcinek, 2002).....	40
Abbildung 12: Relative Anbauflächen (a) und Erntemengen von Getreide (b) im Jahr 2005 (Daten: Statistisches Bundesamt, 2006a).....	44
Abbildung 13: Schematische Darstellung der vier Aspekte zu Klimawandel und Landwirtschaft (LW): Beitrag (Ursache), Minderung (Mitigation), Auswirkungen (Impact) und Anpassung (Adaption).....	67
Abbildung 14: Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Landwirtschaft unter Berücksichtigung verschiedener Aggregationsebenen bzw. Skalen.....	79
Abbildung 15: Methoden zur Untersuchung der Auswirkungen von Elementen des Klimawandels auf der Ebene von Einzelpflanze bis hin zu Agrarökosystemen.....	79
Abbildung 16: Die Temperaturabhängigkeit der Photosyntheseleistung (oben) und wichtige Temperaturbereiche verschiedener Kulturpflanzenarten (unten) (nach Wardlaw, 1979 zitiert in Rosenzweig u. Hillel 1998a).....	82
Abbildung 17: Photosynthese (oben) und Transpiration (unten) eines Sommerweizenblattes in Abhängigkeit von der eingestrahlten Lichtintensität bei gegenwärtiger (360 ppm; offene Symbole) und erhöhter (700 ppm; geschlossene Symbole) CO ₂ -Konzentration in der Atmosphäre (Burkart, unveröffentlicht).....	91

Abbildung 18: Darstellung der klimatischen Wasserbilanz Deutschlands aus der Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Verdunstung (Quelle: BMU, 2003)	107
Abbildung 19: Schematische Darstellung möglicher direkter und indirekter Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Schadorganismen, Krankheiten und Unkräuter.....	123
Abbildung 20: Modellgestützte Ertragsprognosen für Weizen in Österreich für 2020-2080 ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung des CO ₂ -Düngeeffektes. Einzelne Säulen beziehen sich auf verschiedene globale Zirkulationsmodelle (n. Alexandrov <i>et al.</i> 2002).	145
Abbildung 21: Schematisierte Darstellung der möglichen Ausdehnung des Maisanbaus bei zukünftiger Erwärmung (Quelle: Fuhrer, 2003).	154

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lebensdauer, Konzentrationszunahme und das Global Warming Potential (GWP) ausgewählter Treibhausgase (Quelle: IPCC, 2001a und 2007a).....	11
Tabelle 2: Übersicht der beobachteten bodennahen Temperatur- und Niederschlagstrends in Deutschland (Quelle: Schönwiese und Janoschitz, 2005 unter Verwendung von Daten von Rapp, 2000 und DWD).....	24
Tabelle 3: Regionale Klimastudien unter Einbeziehen der Landwirtschaft nach Bundesländern bzw. Naturräumen und für Deutschland gesamt.	27
Tabelle 4: Durchschnittliche Anbaufläche und Hektarerträge (2000-2005) für Winterweizen, Wintergerste, Roggen, Mais (Silomais und Körnermais einschließlich Korn-Kolben-Mix), Kartoffel, Zuckerrübe, Raps und Grünland bzw. (2001-2005) für Wein (Most) im gesamten Bundesgebiet und den einzelnen Bundesländern sowie der prozentuale Anteil der Hektarerträge 2003 im Verhältnis zum Jahresmittel (Quelle: Statistisches Bundesamt, 2002, 2005 und 2006).	46
Tabelle 5: Anbaueignung ausgewählter Rebsorten nach dem Wärmesummenindex H nach Huglin (aus Kartschall <i>et al.</i> , 2005 nach Huglin, 1978 und 1986). Der Huglin-Index ist eine Wärmesumme über Tagesmittel und Tagesmaximumwerte der Lufttemperatur im Zeitraum von April bis September.	58
Tabelle 6: Mögliche Auswirkungen einer Temperaturerhöhung auf Pflanzen (aus Hertstein <i>et al.</i> , 1994).....	82
Tabelle 7: Ertragsveränderungen (% im Vergleich zur heutigen CO ₂ -Konzentration) verschiedener Sommerweizensorten ermittelt in unterschiedlichen CO ₂ -Anreicherungsexperimenten (OTC = open top chambers ; FT = Folientunnel) (aus Weigel, 2004; nach Fangmeier und Jäger, 2001)	95
Tabelle 8: Reaktive Sensitivität verschiedener landwirtschaftlich bedeutender Kulturen gegenüber Ozon (nach ICP Vegetation, 2002).	103
Tabelle 9: Makro- und Mikronährstoffgehalte im Korn zweier Sommerweizensorten (W1 = Turbo; W2= Star) nach Anzucht unter normalen und erhöhten atmosphärischen CO ₂ -Konzentrationen über die gesamte Vegetationsperiode in Open-Top-Kammern (OTC) sowie das Nährstoffverhältnis unter Angabe des Signifikanzniveaus (Quelle: Manderscheid <i>et al.</i> , 1995).	116
Tabelle 10: Einfluss von Klimaänderungen auf Bodeneigenschaften und Bodenprozesse (+ : positiv bewertete Folgen; – : negativ bewertete Folgen) (Rogasik <i>et al.</i> , 1996).....	118
Tabelle 11: Ertragsänderungen ohne und (mit) Berücksichtigung des CO ₂ -Düngeeffektes für Winterweizen nach Modellberechnungen für einzelne Bundesländer bzw. Naturräume.	153
Tabelle 12: Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel durch die Landwirtschaft und die Dauer der Umsetzung (verändert nach Reilly, 1995).	164

Abkürzungsverzeichnis

A

a	Jahr
ADAGIO	Anpassung der Landwirtschaft europäischer Regionen an Umwelt- risiken aufgrund des Klimawandels (Projekttitle)
ADAM	Adaptation and Mitigation Strategies
AFL	Amt für Landentwicklung, Saar- land
AGCM	Atmospheric general circulation model
AGRIDEMA	Modelling tools and Agricultural Decision Making
AGROSIM	Agrarökosystemmodell des ZALF
ALE	Agentur für LandEntwicklung und LandErlebnis
AOT-40	Accumulated exposure over a threshold of 40 ppb (Kenngröße für Ozon-Emissionen)
AR4	Forth Assessment Report
ASTRA	Developing Policies & Adaptation Strategies to Climate Change in the Baltic Sea Region
ATB	Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam-Bornim
ATEAM	Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling

B

BAU	Business as Usual
BayFORKLIM	Bayerischer Klimaforschungsver- bund
BayFORUV	Bayerischer Forschungsverbund: Erhöhte UV-Strahlung in Bayern
BBA	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
BBSRC	Biotechnology and biological sci- ences research council
BDP	Bund Deutscher Pflanzenzüchter
BFEL	Bundesforschungsanstalt für Er- nährung und Lebensmittel
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMBF	Bundesministeriums für Bildung und Forschung
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucher- schutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BOKU	Universität für Bodenkultur Wien
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BRIC	Brasilien, Russland, Indien und China

BSA	Bundessortenamt
BSE	Bovine spongiforme Enzephalo- pathie
Bt	Bacillus thuringiensis
BtL	Biomass to Liquid
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschlands
bzw.	beziehungsweise
C	
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
CAP	Common Agricultural Policy
CCC	Wachstumsregler (Wirkstoff Chlormequat)
CCM	Corn-Cob-Mix (Kolben-Korn-Mix)
CCSP	Climate Change Science Program
CEC	Climate & Environment Consul- tung GmbH, Potsdam
CEC	Commission of the European Communities
CERES	Pflanzenwachstumsmodell
CGM	Canuto-Goldman-Mazzitelli (Ent- wickler des CGM-Modells)
CH4	Methan
CHIP	Changing Climate and Potential Impacts on Potato Yield and Qual- ity
CIMMYT	Centro Internacional de Mejora- miento de Maíz y Trigo (Internati- onales Zentrum für Mais- und Weizenforschung in Mexiko)
CIRCLE	Climate Impact Research Coordi- nation for a Larger Europe
Cl	Chlor
CLIVAGRI	Impacts of Climate change and Variability on European Agricul- ture
CO2	Kohlenstoffdioxid
COGECA	General Confederation of Agricul- tural Co-operatives in the European Union
COPA	Committee of Professional Agri- cultural Organisations in the Euro- pean Union
COST	European Cooperation in the field of Scientific and Technical Re- search
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
CSM	Climate System Model
CULTAN	Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition
D	
d	Tag
d.h.	das heißt
DC.	District of Columbia
DEFRA	Department of Environment, Food and Rural Affairs

DETR	Department for Environment, Transport and the Regions	FCKW	fluorhaltige Kohlenwasserstoffverbindung
DGE	Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V.	FH	Fachhochschule
DGG	Deutsche Gartenbauwissenschaftliche Gesellschaft e.V.	FKZ	Forschungskennziffer
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung	FP6	Sixth Framework Programme
DLG	Deutsche Landwirtschaftliche Gesellschaft	FP7	Seventh Framework Research Programme
DLR	Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum, früher Forschungsanstalt für Weinbau und Gartenbau	FT	Folientunnel
DSS	Decision Support System (Entscheidungsunterstützungssystem)	G	
dt	Dezitonne	g	Gramm
DTR	Blattfleckenkrankheit (<i>Drechslera tritici-repentis</i>)	GAP	Gemeinsame Europäische Agrarpolitik
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.	GCM	Global Circulation Model
DWD	Deutscher Wetterdienst	GFP	Gesellschaft zur Förderung der privaten deutschen Pflanzenzüchtung
E		GIS	geographisches Informationssystem (auch: Geoinformationssystem)
e.V.	eingetragener Verein	GLOWA	Globaler Wandel des Wasserkreislaufes
ECCLIPS	Effect of Climate Change on Livestock Production Systems	GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
ECCP	European Climate Change Programme	Gt	Gigatonne
ECHAM	Klimamodell des MPI-M	GWP	Global Warming Potential
Ed.	Editor	H	
Eds.	Editoren	H	Huglin-Index
EEA	European Environment Agency (Europäische Umweltagentur)	H ₂ O	Wasser, Wasserdampf
ENSO	El Niño Southern Oscillation	ha	Hektar
EOTCP	European Open-Top Chamber Program	HadCM	Hadley Center Climate Model
EPSO	European Plant Science Organisation	HI	Harvest index (Ertragsindex)
EPTD	Environment and Production Technology Division	hl	Hektoliter
ERA-NET	European Research Area Networks	HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
ESPACE	European Stress Physiology and Climate Experiment	HMULV	Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum & Verbraucherschutz
et al.	et alteri (lateinisch für ‚und Andere‘)	Hrsg.	Herausgeber
etc.	et cetera (lateinisch für ‚und die übrigen‘)	HU	Humboldt-Universität Berlin
EU	Europäische Union	I	
F		i.A.	im Allgemeinen
FACE	Free Air Carbon dioxide Enrichment	ICP Vegetation	International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig	IEA	International Energy Agency (Internationale Energiebehörde)
FAO	Food and Agriculture Organization	IFOK	Institut für Organisationskommunikation GmbH
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization Statistik Datenbanken	IFPRI	International Food Policy Research Institute
FBN	Forschungsinstituts für die Biologie landwirtschaftlicher Nutztiere, Dummerstorf	IGER	Institute of Grassland and Environmental Research
		IISD	International Institute for Sustainable Development
		INKLIM 2012	Integrierte Klimaschutzprogramm Hessen 2012

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	LPG	Landwirtschaftliche Produktionsgenossenschaft
J		LUA	Landesumweltamt Brandenburg
K		LUBW	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
K	Kalium	LVWO	Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Baden-Württemberg
Kap.	Kapitel	LW	Landwirtschaft
kg	Kilogramm	M	
KLARA	Netzwerk zur Klimaadaptation in der Region Starkenburg	m	Meter
Klimazwei	Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen	MAP	Marktanreizprogramm Erneuerbare Energien
KLIMU	Klimaänderung und Unterweserre-gion	MARS	Monitoring Agriculture with Remote Sensing
KLIMZUG	Klimawandel in Regionen zu-kunfts-fähig gestalten	Mg	Magnesium
KliO	Klimawandel und Obstbau in Deutschland	Mio	Million
KLIWA	Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft	ML	Ministerium für den ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft & Verbraucherschutz Niedersachsen
km	Kilometer	MLU	Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Sachsen-Anhalt
KOM	Kommission der Europäischen Gemeinschaften	MLUR	Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft	MLUV	Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg
KV	Klimaveränderung	mm	Millimeter
kW	Kilowatt	MPI-M	Max-Planck-Institut für Meteorologie
L		Mrd.	Milliarden
LandCaRe	Vorsorge und Gestaltungspotenziale in ländlichen Räumen unter regionalen Wetter- und Klimaänderungen	Mt	Megatonne
LAP	Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim	MU	Ministerium für Umweltschutz Niedersachsen
LEJ	Landesanstalt für Ernährungswirtschaft und Jagd, Nordrhein-Westfalen	MUNLV	Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Nordrhein-Westfalen
LEL	Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der Ländlichen Räume	MüRück	Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft
LFA	Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern	N	
LfL	Landesanstalt für Landwirtschaft Bayern; Landesanstalt für Landwirtschaft Sachsen	N	Stickstoff
LfStaD	Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung	N ₂ O	Stickstoffdioxid, Lachgas
LfUG	Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen	Na	Natrium
LKP	Landeskuratorium für pflanzliche Erzeugung in Bayern e.V.	NABU	Naturschutzbund Deutschland e.V.
LLG-LSA	Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau, Sachsen-Anhalt	NAO	Nordatlantische Oszillation
LLH	Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen	NaWaRos	nachwachsende Rohstoffe
		NCAR CSM	The National Center for Atmospheric Research Climate System Model
		NCAR	The National Center for Atmospheric Research
		NCCR climate	National Centre of Competence in Research on Climate (Nationales Klimakompetenzzentrum der Schweiz)

NCLAN	National Crop Loss Assessment Network	SMUL	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
NFS	Nationaler Forschungsschwerpunkt	SO2	Schwefeldioxid
NFU	National Farmers' Union	SRES	Special Report on Emission Scenarios
NH3	Ammoniak	StMLF	Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten
NJF	Nordic Association of Agricultural Scientists	SWIM	Soil and Water Integrated Model
nm	Nanometer		
NN	Normal-Null		
No.	Nummer	T	
NOx	Stickoxiden	t	Tonne
NPP	Nettoprimärproduktion	TAR	Third Assessment-Report
O		THG	Treibhausgas
O2	Sauerstoff	THI	Thermo Humidity Index
O3	Ozon	TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
OcCC	Organe consultatif sur les changements climatiques – Beratendes Organ für Fragen der Klimamänderung	TLUG	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development – Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung	TMLNU	Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt
OTC	open top chambers (nach oben offene Kammersysteme im Freiland)	TU	Technische Universität
P		U	
P	Phosphor	u.a.	unter anderem
PEP	Phosphoenolpyruvat	u.U.	unter Umständen
pH	pondus Hydrogenii oder potentia Hydrogenii	UBA	Umweltbundesamt
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung	UK	United Kingdom (Vereinigtes Königreich, Großbritannien)
ppb	parts per billion	UKCIP	United Kingdom Climate Impacts Programme
ppm	parts per million	UL	Umweltgerechte Landwirtschaft
ProClim	InfoSystem on Climate and Global Change	UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
PRUDENCE	Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects	UNEP	United Nations Environmental Programme (Umweltprogramm der Vereinten Nationen)
Q		UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen)
R		Uni	Universität
REMO	Regional Model (Klimamodell des Max-Planck-Institut für Meteorologie)	US	United States (of America)
S		USA	United States of America (Vereinigte Staaten von Amerika)
s.	siehe	USF	Umweltsystemforschung der Universität Kassel
s.a.	siehe auch	UV	Ultraviolett
s.o.	siehe oben	UV-B	Ultraviolette Strahlung im Wellenlängenbereich von 315-280 nm; auch Dornstrahlung genannt
s.u.	siehe unten	V	
SAG	Senatsarbeitsgruppe	v.a.	vor Allem
SAMT	Spatial Analysis and Modeling Tool	VdZ	Verein der Zuckerindustrie
SF6	Schwefelhexafluorid	vgl.	vergleiche
		VOC	flüchtige organische Substanz („volatile organic compound“)
		Vol.	Volume

VPD vapour pressure difference (Wasserdampf-Druckgefälle)

W

WBGU Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen

WETTREG Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode (entwickelt von der Climate & Environment Consultung GmbH, Potsdam)

WGL Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz

WMO World Meteorological Organization (Weltorganisation für Meteorologie)

WUE Water use efficiency (Wassernutzungskoeffizient)

X

Y

Z

z.B. zum Beispiel

z.T. zum Teil

ZALF Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg

ZUFO Zentrum für Umweltforschung, Münster

Sonderzeichen

% Prozent

°C Grad Celsius

€ Euro

Anhänge

Interviews bzw. Anfragen zu Maßnahmen in Bezug auf Auswirkungen von Klimaveränderungen und auf Anpassungen der deutschen Landwirtschaft

(Zeitraum überwiegend Februar-Mai 2006; insbesondere Agrarfakultäten auch Anfang 2007)

1) Ministerien und Landesbehörden

Behörde	Beobachtungen; Maßnahmen; Projekte
<i>Baden-Württemberg</i>	
Landesanstalt für Umweltschutz (LUBW)	federführend bei KLARA (s. Regionale Klimastudien); Verbundprojektantrag bei dem BMBF-Förderungsschwerpunkt „Klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ abgelehnt;
Landesanstalt für Pflanzenbau (LAP)	indirekt durch Sortenprüfung; Berechnungssteuerungsmodelle („agrowetter“) in Zusammenarbeit mit dem DWD;
Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau (LVWO)	Verschiebung (Verfrühung) phänologischer Phasen; Sortenveränderung; Zunahme von Krankheiten und Schädlingen;
<i>Bayern</i>	
Landesanstalt für Landwirtschaft (IfL)	Beteiligung am BayFORUV-Verbund: Untersuchung der erhöhten UV-Strahlung auf die Pflanzenproduktion (Gerste); Projekt zu Trockenstressresistenz von Gerste in Zusammenarbeit mit Argentinien; größeres Projekt zu Trockenstress in Zusammenarbeit mit der TU München an Finanzierung gescheitert; z.Zt. keine weiteren Klimaprojekte wegen Mittelknappheit; passives Monitoring z.B. durch Bodenbeobachtungspartellen; Kolloquium „Konsequenzen der Klimaänderung für die Landwirtschaft“, 2005;
<i>Brandenburg</i>	
Landesumweltamt Brandenburg (LUA)	Fachbeiträge des Landesumweltamtes: Daten zum integrierten Klimaschutzmanagement im Land Brandenburg, darin u.a. Abschätzung der Anpassungsfähigkeit der Landwirtschaft an den Klimawandel;
Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz (MLUV) (Landwirtschaftsabteilung)	„automatische“ Anpassung über Züchtung; zusätzliche Berechnung wegen fehlendem Eigenkapital unrealistisch; zunehmende Konflikte zwischen Naturschutz und Landwirtschaft bei Wasserverknappung wahrscheinlich;
<i>Hessen</i>	
Hessische Landesanstalt für Umweltschutz und Geologie (HLUG)	Koordination der hessischen Klimastudie INKLIM 2012; in Planung: INKLIM 2012 Baustein II-plus; Zuversicht, dass Landwirtschaft es mit Anpassungsmaßnahmen weiterhin gelingen wird, Erträge zu steigern;
Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum & Verbraucherschutz (HMULV)	eventuell weitere Forschungen zu INKLIM 2012 im Bereich zu Auswirkungen von Extremereignissen auf Krankheits- und Schädlingsbefall;
Landesbetrieb für Landwirtschaft (LLH)	phänologische Erhebungen an landesweiten Versuchsstandorten (allmähliche Anpassung); u.U. mit stärkerem Krankheitsbefall zu rechnen;

Behörde	Beobachtungen; Maßnahmen; Projekte
<i>Mecklenburg-Vorpommern</i>	
Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei (LFA)	keine Arbeiten zu Klimawandel und Landwirtschaft;
<i>Niedersachsen</i>	
Ministerium für den ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft & Verbraucherschutz (ML)	keine eigenen Arbeiten zu Klimawandel und Landwirtschaft;
Ministerium für Umweltschutz (MU)	keine eigenen Arbeiten zu Klimawandel und Landwirtschaft; Niedersachsens Landwirtschaft gehört eher zu Gewinnern der KV; Anpassung in Bezug auf Deiche;
Landwirtschaftskammer	indirekte Maßnahmen, die sich z.T. aus Vorschriften der „Cross-Compliance“ ergeben, wie insbesondere zum Erosionsschutz sowie durch pfluglose Bodenbearbeitung;
<i>Nordrhein-Westfalen</i>	
Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV)	keine Arbeiten zu KV & Landwirtschaft;
Landesanstalt für Ernährungswirtschaft und Jagd (LEJ)	keine Arbeiten zu KV & Landwirtschaft;
<i>Rheinland-Pfalz</i>	
Landwirtschaftskammer	keine Arbeiten zu KV & Landwirtschaft;
Dienstleistungszentren für den ländlichen Raum	KV wird für Landwirtschaft und Gartenbau nicht dramatisch gesehen, da schon heute mediterrane Kulturen angebaut werden; im Weinanbau zunehmend Probleme mit Bewässerung (Bodenbewirtschaftung) und Schädlingen;
<i>Saarland</i>	
Amt für Landentwicklung (AFL)	keine Aktivitäten zu KV & Landwirtschaft;
Ministerium für Umwelt (LW)	keine Aktivitäten zu KV & Landwirtschaft; im Saarland: keine intensive Landbewirtschaftung; Bodenwasser sollte nicht problematisch werden; u.U. Sortenanpassung notwendig;
<i>Sachsen</i>	
Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft / Sächsisches Ministerium für Umwelt und Landwirtschaft (LfL / SMUL)	in Sachsen konservierende Bodenbewirtschaftung (pfluglos) auf Grund von EU-Förderprojekt weit verbreitet; länderübergreifendes Verbundprojekt: „Entwicklung und Erprobung standortangepasster Anbausysteme unter besonderer Berücksichtigung der Klimaänderung“, Beginn 2005; Informationsveranstaltung „Auswirkungen der KV auf den Pflanzenbau und mögliche Anpassungsmaßnahmen“, 2004;
Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG)	2003: in Sachsen Verenden von Rindern auf Weiden durch verunreinigtes Wasser in Tümpeln (Cyanobakterien) beobachtet;
<i>Sachsen-Anhalt</i>	
Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt (MLU)	keine Projekte des Ministeriums;
Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (Ilg-lsa)	keine Arbeiten zu KV & Landwirtschaft; indirekte Maßnahmen: konservierende Bodenbearbeitung für Kosten- und Wasserersparnis; Beregnung wenig praktikabel bei schon heute angespannter Wassersituation;
<i>Schleswig-Holstein</i>	
Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MLUR)	abgesehen vom Küstenschutz keine weiteren Maßnahmen, zumal Landwirtschaft von KV profitieren dürfte;
<i>Thüringen</i>	

Behörde	Beobachtungen; Maßnahmen; Projekte
Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG)	Aufbau einer regionalen Klimadatenbank und -modelle (REKLI I – III); Ausführliche Informationen und Links zum Klimawandel auf der homepage;
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)	Interesse, verstärkt zu KV & LW zu arbeiten, da zunehmende Wasserknappheit und Hitze (Pflanzenzüchtung) problematisch werden; Beregnung: unrentabel; besser: pfluglose Bodenbearbeitung; Lößgebiete weniger kritisch, da sie die Winterniederschläge speichern, Ost-Thüringen bricht dagegen bei Erträgen weg;
<i>Bundesweit</i>	
Umweltbundesamt (UBA)	Einrichtung eines Kompetenzzentrums Klimafolgen und Anpassung „KomPass“, 2006; Erstellung deutschlandweiter regionaler Klimamodelle (REMO und WETTREG); Vernetzung der Akteure und Erstellung einer nationalen Anpassungsstrategie;

2) Universitäten, insbesondere Agrarfakultäten und sonstige Forschungseinrichtungen

Einrichtung	Beobachtungen; Maßnahmen; Projekte
<i>Baden-Württemberg</i>	
Forschungsanstalt Geisenheim	Erstellung des Weinkapitels zu INKLIM 2012 (Hessen); diverse Forschungsarbeiten u.a. zu Qualitätsverlusten bei Wein durch zunehmende Wärme (besonders kritisch für Riesling);
Universität Hohenheim	diverse Arbeiten zum Klimawandel (FACE, Klimatron, s. auch Expertenliste auf homepage); u.a. Arbeiten zur züchterischen Anpassung an Trockenstress (Triticale); einen guten Überblick über die aktuellen internationalen Forschungsaktivitäten gibt die homepage: http://www.plantstress.com/ ;
<i>Bayern</i>	
TU München	Vergleich der Getreideerträge bundesweit in Studienarbeit; Kooperation mit Australien (Züchtung trockenresistenten Weizens);
Uni Würzburg	Arbeiten zu Stress- und Salztoleranz von Gehölzen; in Franken: bereits heutzutage Beregnung im Weinbau;
<i>Berlin</i>	
HU Berlin	diverse Arbeiten zu Einfluss von Witterung auf Kornertrag bzw. von KV auf die Pflanzenentwicklung (Phänologie); Klio: Klimazwei-Projekt Klimawandel und Obstbau in Deutschland;
<i>Hessen</i>	
Uni Kassel –Umweltsystemforschung (USF)	Durchführung Landwirtschaftskapitel INKLIM 2012 bzw. INKLIM 2012 Baustein II-plus
Universität Giessen	FACE-Untersuchungen (Grünlandökosysteme);
<i>Mecklenburg-Vorpommern</i>	
Uni Rostock	Lysimeterstation Groß Lüsewitz: Auswirkungen der KV auf den Wasserhaushalt in Abhängigkeit verschiedener Fruchtfolgen; Ozonbildungspotential in Mecklenburg-Vorpommern;
<i>Niedersachsen</i>	
Uni Bremen	regionale Klimastudie zur Unterweser: Fazit: für niedersächsische Landwirtschaft ist KV wenig problematisch; aber: Anpassung notwendig;
Uni Göttingen	keine direkten Arbeiten zu Auswirkungen der KV auf die Landwirtschaft;

Einrichtung	Beobachtungen; Maßnahmen; Projekte
<i>Nordrhein-Westfalen</i>	
Uni Bonn	z.B. Forschungsarbeiten zum Einsatz von Wetterderivaten im Agribusiness;
<i>Sachsen-Anhalt</i>	
Uni Halle	u.a. Bodenbearbeitung unter trockenen Bedingungen;
<i>Schleswig-Holstein</i>	
Uni Kiel	keine Arbeiten zu KV & Landwirtschaft;
<i>Bundesweit</i>	
Biologische Bundesanstalt (BBA) (Weinbau, Obstbau, Ackerbau und Grünland)	Aktivitäten: s. Projektsammlung Senatsarbeitsgruppe Klimaänderungen, wie z.B. Monitoring von Veränderungen der Phänologie, Schädlinge oder Krankheiten; einzelne Bsp. für Zunahme des Schädlingsdrucks;
Bundesforschungsanstalt für Ernährung und Lebensmittel (BFEL)	u.a. Untersuchungen zur Kornqualität in Abhängigkeit von Witterungsverhältnissen; Auswirkungen von Hitzestress;
Bundessortenamt (BSA)	KV: kein Untersuchungsthema (Begleiterscheinung); Beobachtung der Verfrühung phänologischer Daten;

3) Verbände, etc.

Einrichtung	Beobachtungen; Maßnahmen; Projekte
<i>Bundesweit</i>	
Deutsche Landwirtschaftliche Gesellschaft (DLG)	keine direkten Aktivitäten zu KV & LW (indirekt: angepasste Bodenbearbeitung)
Bund Deutscher Pflanzzüchter (BDP) / Gesellschaft zur Förderung der privaten deutschen Pflanzenzüchtung (GFP)	BMBF-Projekt zu KV & Züchtung; Trockenstresstoleranz (automatisch) bei Selektion berücksichtigt; in Zukunft: molekulargenetischer Ansatz zu Trockenresistenz; Bedeutung der Genbanken für genetische Vielfalt;
Privater Züchter: Lochow Petkus	schleichende Anpassung durch Züchtung (z.B. Abnahme Winterhärte); Grundlagenforschung für Trockenstressresistenz; Austausch mit internationalen Zentren (z.B. CYMMIT); Einsatz von Bio- und Gentechnologie;
Deutsche Umweltstiftung	keine Projekte zu Klimawandel und Landwirtschaft (schleichende Anpassung);

Teilnahme an Workshops etc. zum Thema Klimawandel mit Bezug zur Landwirtschaft

Datum	Veranstalter (Ort) Thema
08.12.2005	FAL (Braunschweig) 6. FACE-Treffen des Braunschweiger Kohlenstoffanreicherungsexperiments
16/17.02.2006	Wetterspiegel (Hamburg) Extremwetterkongress
15.03.2006	Agrochemisches Institut Piesteritz e.V. (Wittenberg) 1. Wittenberger AgroChemie-Workshop
16.03.2006	Bioland (Freising) Klimawandel und Biolandbau
25.04.2006	UBA (Dessau) Künftige Klimaänderungen in Deutschland: Regionale Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert.
16.05.2006	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Wiesbaden) Fachtagung „Klimawandel und Klimafolgen in Hessen“
22.06.2006	TU Braunschweig (Braunschweig) Geoökologisches Kolloquium: „Ökologie und Hochwasser“
29.06.2006	TU Braunschweig (Braunschweig) Geoökologisches Kolloquium: „Die Rolle von gelöster organischer Bodensubstanz für den Kohlenstoffhaushalt terrestrischer Ökosysteme“
03.07.2006	Universität Kassel (Kassel) Bioenergie: Welche Forschungsfragen stellen sich?
12.07.2006	TU Braunschweig (Braunschweig) Extremere Hochwassergefahr durch den Klimawandel
24-27.09.2006	BfN (Vilm) Biodiversität und Klima – Vernetzung der Akteure in Deutschland III
17.10.2006	UBA (Berlin) Zweiter nationaler Workshop: Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland. Regionale Szenarien und nationale Aufgaben
30.10.2006	Projektverbund (Hannover) Regionales Klimamanagement von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen
06.11.2006	Zentrum für Umweltforschung (ZUFO, Münster) ZUFO-Umweltsymposium 2006 „Globale Umweltveränderungen und Wetterextreme“
10.11.2006	Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Suderburg) Genug Wasser für die Landwirtschaft?! – Wird Feldberegnung zum Problem?
30.11.2006	Landwirtschaftliche Fakultät der Uni Bonn (Bonn) Hochwasserschutz: Integrationskonzepte für Raumplanung, Flächenmanagement und Landbewirtschaftung
21.02.2007	DGG (Erfurt) 44. Gartenbauwissenschaftliche Tagung; Schwerpunktthema: Klimaveränderungen und deren Auswirkungen auf den Gartenbau
28.02/01.03.2007	BMBF (Berlin) Klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen

Datum	Veranstalter (Ort) Thema
20.06.2007	DLG (Bernburg) DLG-Pflanzenbautagung 2007: Klimawandel – Strategien für den deutschen Pflanzenbau
25.06.2007	Agrarwissenschaftliche Fakultät der Uni Hohenheim (Hohenheim) Landwirtschaftlicher Hochschultag „Regionale Folgen des Klimawandels“
12/13.09.2007	Holländisches Klimaschutzprogramm (Den Haag) Internationale Konferenz “Climate changes Spatial Planning“
01.10.2007	LANDCARE (FAL) Überregionaler Stakeholder-Workshop zum Decision Support System (DSS)

286	Silvia Haneklaus, Rose-Marie Rietz, Jutta Rogasik and Susanne Schroetter (eds.) (2005) Recent advances in in agricultural chemistry	11,00€
287	Maria del Carmen Rivas (2005) Interactions between soil uranium contamination and fertilization with N, P and S on the uranium content and uptake of corn, sunflower and beans, and soil microbiological parameters	8,00€
288	Alexandra Izosimova (2005) Modelling the interaction between Calcium and Nickel in the soil-plant system	8,00€
290	Gerold Rahmann (Hrsg.) (2005) Ressortforschung für den Ökologischen Landbau 2005	9,00€
292	Franz-Josef Bockisch und Elisabeth Leicht-Eckardt (Hrsg.) (2006) Nachhaltige Herstellung und Vermarktung landwirtschaftlicher Erzeugnisse	15,00€
293	Judith Zucker (2006) Analyse der Leistungsfähigkeit und des Nutzens von Evaluationen der Politik zur Entwicklung ländlicher Räume in Deutschland und Großbritannien am Beispiel der einzelbetrieblichen Investitionsförderung	12,00€
294	Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2006) Möglichkeiten der Dekontamination von "Unerwünschten Stoffen nach Anlage 5 der Futtermittelverordnung (2006)"	15,00€
295	Hiltrud Nieberg und Heike Kuhnert (2006) Förderung des ökologischen Landbaus in Deutschland — Stand, Entwicklung und internationale Perspektive	14,00€
296	Wilfried Brade und Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2006) Schweinezucht und Schweinefleischerzeugung - Empfehlungen für die Praxis	12,00€
297	Hazem Abdelnabby (2006) Investigations on possibilities to improve the antiphytopathogenic potential of soils against the cyst nematode <i>Heterodera schachtii</i> and the citrus nematode <i>Tylenchulus semipenetrans</i>	8,00€
298	Gerold Rahmann (Hrsg.) (2006) Ressortforschung für den Ökologischen Landbau 2006	9,00€
299	Franz-Josef Bockisch und Klaus-Dieter Vorlop (Hrsg.) (2006) Aktuelles zur Milcherzeugung	8,00€
300	Analyse politischer Handlungsoptionen für den Milchmarkt (2006)	12,00€
301	Hartmut Ramm (2006) Einfluß bodenchemischer Standortfaktoren auf Wachstum und pharmazeutische Qualität von Eichenmisteln (<i>Viscum album</i> auf <i>Quercus robur</i> und <i>petraea</i>)	11,00€
302	Ute Knierim, Lars Schrader und Andreas Steiger (Hrsg.) (2006) Alternative Legehennenhaltung in der Praxis: Erfahrungen, Probleme, Lösungsansätze	12,00€
303	Claus Mayer . Tanja Thio . Heike Schulze Westerath . Pete Ossent . Lorenz Gyga . Beat Wechsler und Katharina Friedli (2007) Vergleich von Betonspaltenböden, gummimodifizierten Spaltenböden und Buchten mit Einstreu in der Bullenmast unter dem Gesichtspunkt der Tiergerechtigkeit	8,00€
304	Ulrich Dämmgen (Hrsg.) (2007) Calculations of Emissions from German Agriculture — National Emission Inventory Report (NIR) 2007 for 2005	16,00€
[304]	Introduction, Methods and Data (GAS-EM)	
[304A]	Tables	
	Berechnungen der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft — Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2007 für 2005	
[304]	Einführung, Methoden und Daten (GAS-EM)	
[304 A]	Tabellen	

305	Joachim Brunotte (2007) Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide	14,00€
306	Uwe Petersen . Sabine Kruse . Sven Dänicke und Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2007) Meilensteine für die Futtermittelsicherheit	10,00€
307	Bernhard Osterburg und Tania Runge (Hrsg.) (2007) Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen in Gewässer – eine wasserschutzorientierte Landwirtschaft zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie	15,00€
308	Torsten Hinz and Karin Tamoschat-Depolt (eds.) (2007) Particulate Matter in and from Agriculture	12,00€
309	Hans Marten Paulsen und Martin Schochow (Hrsg.) (2007) Anbau von Mischkulturen mit Ölpflanzen zur Verbesserung der Flächenproduktivität im ökologischen Landbau – Nährstoffaufnahme, Unkrautunterdrückung, Schaderregerbefall und Produktqualitäten	9,00€
310	Hans-Joachim Weigel und Stefan Schrader (Hrsg.) (2007) Forschungsarbeiten zum Thema Biodiversität aus den Forschungseinrichtungen des BMELV	13,00€
311	Mamdoh Sattouf (2007) Identifying the Origin of Rock Phosphates and Phosphorus Fertilisers Using Isotope Ratio Techniques and Heavy Metal Patterns	12,00€
312	Fahmia Aljmli (2007) Classification of oilseed rape visiting insects in relation to the sulphur supply	15,00€
313	Wilfried Brade und Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2007) Rinderzucht und Rindfleischerzeugung - Empfehlungen für die Praxis	10,00€
314	Gerold Rahmann (Hrsg.) (2007) Ressortforschung für den Ökologischen Landbau, Schwerpunkt: Pflanze	12,00€
315	Andreas Tietz (Hrsg.) (2007) Ländliche Entwicklungsprogramme 2007 bis 2013 in Deutschland im Vergleich — Finanzen, Schwerpunkte, Maßnahmen	12,00€
316	Michaela Schaller und Hans-Joachim Weigel (2007) Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung	16,00€