

Landwirtschaft

Horst Gömann, Cathleen Frühauf, Andrea Lüttger, Hans-Joachim Weigel

- 18.1 Einleitung – 184**
- 18.2 Agrarrelevante klimatische Veränderungen – 184**
- 18.3 Direkte Auswirkungen von Klimaveränderungen auf wichtige Kulturpflanzen – 185**
 - 18.3.1 Temperaturveränderungen – 185
 - 18.3.2 Niederschlagsveränderungen – 186
 - 18.3.3 Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre – 186
 - 18.3.4 Interaktionen und Rückkopplungen: CO₂, Temperatur, Niederschlag – 187
- 18.4 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf agrarrelevante Schadorganismen – 187**
- 18.5 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf landwirtschaftliche Nutztiere – 188**
- 18.6 Auswirkungen auf die Agrarproduktion – 188**
- 18.7 Anpassungsmaßnahmen – 189**
- 18.8 Kurz gesagt – 190**
 - Literatur – 190**

18.1 Einleitung

Wie kaum ein anderer Wirtschaftsbereich hängt die Landwirtschaft von Witterung und Klima ab. Die Änderungen wichtiger Klimakenngrößen wie Temperatur und Niederschlag sowie der Konzentration von Spurengasen in der Atmosphäre beeinflussen unmittelbar physiologische Prozesse in Kulturpflanzen und damit den Ertrag und die Qualität der Ernteprodukte. Zudem wirken sich Klimaänderungen auf die Pflanzenproduktion indirekt aus, indem sie strukturelle und funktionelle Eigenschaften von Agrarökosystemen verändern. Hierzu zählen z. B. Elemente der genutzten und assoziierten Biodiversität (► Kap. 15), physikalische, chemische und biologische Kenngrößen des Bodens (► Kap. 20) oder das Auftreten von Pflanzenkrankheiten und Schädlingen. Auch die Leistungsfähigkeit von Nutztieren hängt von Klima und Witterung ab.

Nach den in Teil 1 dieses Buches für Deutschland mittelfristig projizierten klimatischen Änderungen sind sowohl negative als auch positive Konsequenzen für die deutsche Landwirtschaft zu erwarten. Entscheidend dafür, wie diese Effekte ausfallen, sind zum einen die Art und Intensität der Klimaveränderungen selbst, zum anderen die Empfindlichkeit der jeweils betrachteten Produktionssysteme und die Implementierung von Anpassungsmaßnahmen, mit deren Hilfe sich die Folgen des Klimawandels nutzen, vermeiden oder mildern lassen. Während z. B. eine moderate durchschnittliche Erwärmung oder die kontinuierliche Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration durchaus positive Wirkungen auf die deutsche Pflanzenproduktion haben können, wirken sich besonders extreme Wetterlagen – regional unterschiedlich – meist deutlich negativ auf einzelne Landnutzungs- oder Produktionssysteme aus.

Anpassungen an den Klimawandel sind im Zusammenhang mit der allgemeinen Entwicklung landwirtschaftlicher Betriebs-, Landnutzungs- und Produktionsstrukturen zu betrachten und zu bewerten – Triebkräfte sind dabei in erster Linie der technische Fortschritt, die steigende Produktivität sowie ökonomische und politische Rahmenbedingungen, die sich vor allem in den vergangenen 10 Jahren stark geändert haben. Insbesondere die

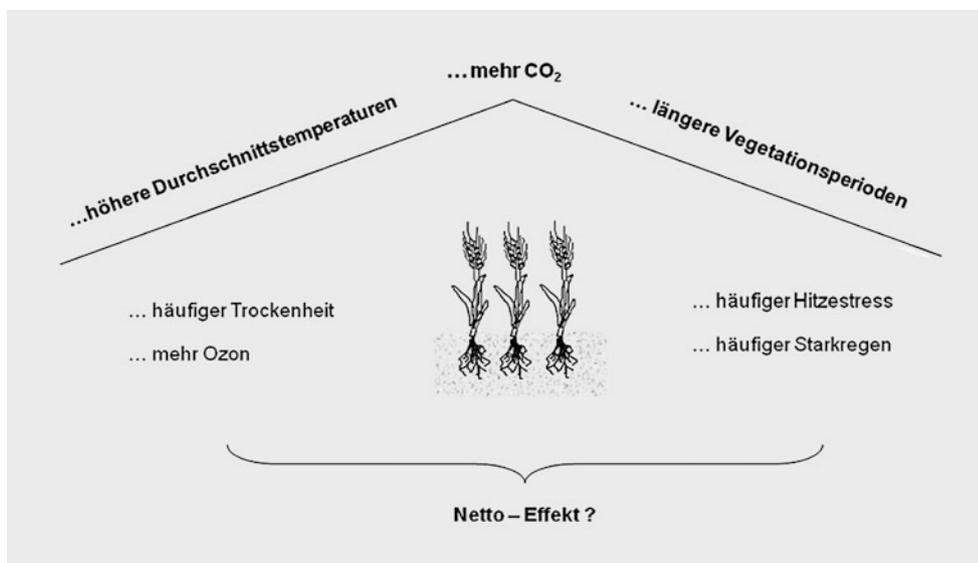
Entwicklungen auf den Agrarmärkten, die ihrerseits durch weltweite Klimaveränderungen beeinflusst werden, wirken sich auf die deutsche Landwirtschaft aus. Dieses Kapitel fasst den derzeitigen Stand der Erkenntnisse zu den möglichen Wirkungen des Klimawandels auf die deutsche Landwirtschaft sowie Anpassungsoptionen zusammen, mit einem Schwerpunkt auf der Pflanzenproduktion.

18.2 Agrarrelevante klimatische Veränderungen

Im letzten Jahrhundert wurden für die Landwirtschaft folgende relevante Klimaveränderungen in Deutschland beobachtet: Neben einem Anstieg der mittleren Temperatur um etwa 1 °C (Gerstengarbe und Werner 2003) nahmen nach Analysen des DWD die Jahresniederschläge insgesamt um bis zu 15 % zu. Während die Niederschlagsmengen im Winter bis zu 30 % zulegten, wiesen sie im Sommer Abnahmen bis zu ca. 10 % auf, mit Ausnahme von Regionen an der Küste bzw. im Süden. Insgesamt nahmen die Jahresniederschläge in einzelnen Gebieten im Westen um bis zu 40 % zu, im Osten, bedingt durch das kontinentaler geprägte Klima, nur um bis zu 20 %.

Die Klimamodelle geben den Hinweis, dass sich die beobachteten Entwicklungen fortsetzen werden (► Kap. 4). Sehr wahrscheinlich werden wir durchschnittlich wärmere und trockenere Sommer erleben sowie wärmere, feuchtere und schneeärmere Winter. Darüber hinaus ist das Kohlendioxidangebot in der Atmosphäre für alle Pflanzen so hoch wie nie in der jüngeren Erdgeschichte und nimmt mittelfristig schnell weiter zu. Daneben steigt die Konzentration des für Pflanzen giftigen Ozons in den bodennahen Luftschichten. Zusätzlich müssen wir mit einer höheren Variabilität einzelner Witterungs- und Wetterereignisse rechnen, also insgesamt mit räumlich und zeitlich sehr unterschiedlichen Perioden von extremer Hitze, Trockenheit, hohen Ozonkonzentrationen und Starkniederschlägen (■ Abb. 18.1).

In den letzten 15 Jahren ist ein deutlicher Rückgang der Niederschläge im Frühjahr (März, April, Mai) beobachtet worden.



■ **Abb. 18.1** Agrarökosysteme im Klima der Zukunft. Unter den Rahmenbedingungen einer eindeutig projizierten Veränderung von Durchschnittswerten des Klimas ist die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion mit einer zunehmenden Klimavariabilität, verbunden mit häufiger auftretenden Klimaextremen, konfrontiert. Wie sich das Zusammenspiel dieser unterschiedlichen Elemente des Klimawandels im Endeffekt auswirkt, ist größtenteils noch offen. (Nach Weigel 2011)

Da im gleichen Zeitraum die Temperatur und somit die Verdunstung zunahm, ging die Bodenfeuchte stark zurück. Diese ausgeprägte Frühjahrstrockenheit bilden die Klimaprojektionen in der Vergangenheit nicht ab, sodass keine Aussage über die zukünftige Entwicklung der Bodenfeuchtesituation im Frühjahr getroffen werden kann (Gömann et al. 2015).

18.3 Direkte Auswirkungen von Klimaveränderungen auf wichtige Kulturpflanzen

18.3.1 Temperaturveränderungen

■ Wachstum, Ertrag

Der Stoffwechsel und das Wachstum von Pflanzen hängen von Minimum, Optimum und Maximum der Temperatur sowie von Wärmesummen ab. Diese sind je nach Pflanzenart oder -sorte, Standort und Herkunft sehr unterschiedlich. Weiter steigende Durchschnittstemperaturen und mehr extreme Temperaturen, die zu Hitzestress führen, werden sich daher unterschiedlich auf die Produktion der verschiedenen Kulturpflanzen auswirken (Morison und Lawlor 1999; Porter und Gawith 1999).

Temperaturextreme oberhalb des art- oder sortenspezifischen Temperaturoptimums schädigen Kulturpflanzen meistens. Besonders temperaturempfindlich sind Phasen der Samen- und Fruchtbildung. Extremereignisse wie Hitzeperioden im Sommer mit Temperaturen nur wenig oberhalb der Durchschnittstemperaturen beeinträchtigen generative Stadien wie das Entfalten der Blüte bei Getreide (Porter und Gawith 1999; Barnabas et al. 2008). Bei Weizen und Mais führen Temperaturen über 30 bzw. 35 °C zur Sterilität der Pollen, stören so die Befruchtung und den Fruchtausatz. Das verringert die potenzielle Kornzahl und schmälert den Ertrag. Bei anderen empfindlichen Kulturen wie z. B. Tomaten können Blüten oder junge Früchte aufgrund von Hitzestress absterben.

Kritisch für den Ackerbau ist eine Zunahme der Temperaturvariabilität. Eine der wenigen diesbezüglich durchgeführten Simulationen ergab, dass sich Ertragsschwankungen bei Weizen verdoppeln, wenn eine Verdopplung der regulären Abweichungen der saisonalen Durchschnittstemperaturen angenommen wird, und dass dies insgesamt zu einem vergleichbaren Ertragsrückgang führt wie durch eine durchschnittliche Temperaturerhöhung um 4 °C (Porter und Semenov 1999).

■ Qualität

Temperaturveränderungen können auch die Qualität pflanzlicher Produkte beeinflussen. Hitzestress während der Kornfüllung wie im heißen Sommer 2006 erhöht bei Weizen den Proteingehalt des Korns und verändert die Proteinqualität, was sich wiederum auf die Backeigenschaften auswirkt (BMELV 2006). Zuckerrüben weisen unter Hitzestress erhöhte Aminostickstoffgehalte auf, was einerseits dem Rübenantrag zugutekommt, andererseits aber die Zuckerkristallisation behindert. Bei Raps reduzieren hohe Temperaturen den Ölgehalt, steigern aber den Proteingehalt. Das schränkt dessen Verwendung als Biodiesel ein, bringt aber Vorteile für die Tierernährung mit sich. Bei einigen Kulturen

führen höhere Nachttemperaturen zu unerwünschten Effekten: Zum Beispiel wird in Weintrauben mehr Säure abgebaut, oder die Fruchtausfärbung ist bei bestimmten Apfelsorten verringert.

Bisher haben die steigenden Temperaturen die Qualität der deutschen Weine verbessert und den Anbau von Rotweinsorten begünstigt. Dabei ist das Mostgewicht, ein Indikator für den Zuckergehalt in den Weintrauben, ein entscheidendes Qualitätsmerkmal. Bei hohen Temperaturen steigt das Mostgewicht schnell. Die Ausbildung der Aromen benötigt jedoch Zeit. Als Faustregel gilt, dass dies etwa 100 Tage ab der Blüte dauert. Wird der Beginn der Lese in warmen Jahren wie 2003 nur nach dem Mostgewicht festgelegt, ist weder das Aroma fertig ausgebildet, noch sind die Trauben voll ausgereift.

■ Phänologie

Viele Prozesse in den Pflanzen werden durch die Temperatur und durch die Tageslänge gesteuert. Steigende Temperaturen und höhere Wärmesummen verlängern insgesamt die Vegetationsperiode. Sie beeinflussen sowohl den Beginn als auch die Dauer einzelner phänologischer Stadien der Pflanzen wie den Vegetationsbeginn. Doch auch die nachfolgenden Entwicklungsphasen wie Blüte und Abreife werden durch die höheren Temperaturen beschleunigt und beginnen früher. Dies kann einerseits zur Folge haben, dass etwa beim Getreide die wichtige Kornfüllungsphase verkürzt wird und sich der Ertrag verringert. Andererseits zeigen Modellsimulationen eine potenziell positive Wirkung auf den Ertrag, da Getreide unter erhöhten Temperaturen früher zu blühen beginnt, wodurch späterer Hitzestress umgangen werden kann (Nendel et al. 2014).

Ferner kann es zu einer Entkopplung von Systemen kommen. So reagieren beispielsweise Pflanzen insbesondere im Frühjahr vor allem temperatursensitiv, viele Tiere wie etwa bestäubende Insekten dagegen vorrangig fotosensitiv. Wenn sich die Temperaturverläufe durch den Klimawandel ändern, bleiben die Tageslängen und damit die Aktivität der fotosensitiven Tiere gleich. Hier stellt sich die Frage, inwiefern sich bestäubende Insekten über Generationen dem veränderten Klima anpassen, d. h. ihre Aktivität früher im Jahr aufnehmen können, oder inwiefern sich der Lebensraum von angepassten Insekten etwa aus südlicheren Ländern nach Deutschland verlagert.

Das Ende der Vegetationsperiode hängt von verschiedenen Faktoren ab. Je nach Pflanzenart ist neben der Temperatur auch die Tageslänge entscheidend. Bereits das erste Auftreten von tieferen Temperaturen kann die Blattverfärbung und den Blattfall auslösen. Nachfolgend wieder steigende Temperaturen können von den betroffenen Pflanzen nicht mehr genutzt werden. Dazu sind nur Winterkulturen in der Lage. Dauern milde Temperaturen allerdings zu lange an, entwickeln sich die Bestände zu stark für die Überwinterung. Viele Kulturen brauchen einen Kältereiz im Winter (Vernalisation). Ist das Kältebedürfnis während der Ruhezeit nicht erfüllt, kommt es bei Wintergetreide zu Ertragsverlusten, da der Übergang zur Blühphase nicht gleichmäßig erfolgt. Ein verzögerter und ungleichmäßiger Austrieb beim Spargel zu Saisonbeginn wird ebenfalls mit einer unzureichenden Vernalisation in einzelnen Regionen in Verbindung gebracht.

Gemüse im Freiland baut man meistens satzweise an, d. h., vom Frühjahr bis zum Herbst werden die Kulturen zeitlich ver-

■ **Tab. 18.1** Erträge (t/ha) der verschiedenen Pflanzen aus dem zweimaligen Fruchtfolgeversuch in Braunschweig mit der FACE-Technik unter normaler (370–380 ppm) und erhöhter CO₂-Konzentration (550 ppm) sowie mit ausreichender (N100) und reduzierter Stickstoffdüngung (N50 = 50 % von N100) Angegeben sind die Kornerträge und die Rübenfrischmassen. (Verändert nach Weigel und Manderscheid 2012)

CO ₂	N	2000	2001	2002	2003	2004	2005
		Wintergerste	Zuckerrübe	Winterweizen	Wintergerste	Zuckerrübe	Winterweizen
Normal	100	9,52	68,1	5,70	5,90	71,7	8,38
	50	7,84	61,1	4,74	4,74	64,2	7,31
Erhöht	100	10,2	73,4	6,59	6,87	76,8	9,70
	50	8,50	66,2	5,94	5,58	74,5	7,58
%CO ₂ -Effekt	100	7,5	7,8	15,6	16,5	7,1	15,8
	50	8,5	8,3	11,7	17,6	16,0	3,7

setzt gepflanzt und geerntet. Steigen mit dem Klimawandel die Temperaturen, ist das kein Problem, da der Unterschied zwischen der mittleren Temperatur im Sommeranbau und der im Frühjahrs- und Herbstanbau deutlich größer ist als der erwartete Temperaturanstieg durch den Klimawandel (Fink et al. 2009). Verwendet werden hierfür Sorten, die an höhere bzw. niedrigere Temperaturen angepasst sind. Ein Mehrertrag bei satzweisem Anbau kann nur erreicht werden, wenn ein zusätzlicher Satz in einer verlängerten Vegetationsperiode produziert werden kann.

18.3.2 Niederschlagsveränderungen

Grundsätzlich sind Niederschlag und Wasserhaushalt ausschlaggebend dafür, welche Kulturpflanzen sich erfolgreich anbauen lassen. Bereits geringe Veränderungen der Niederschlagsmengen wirken sich deutlich auf die Produktivität von Agrarökosystemen aus. Da die Verdunstung vor allem von der Temperatur abhängt und um ca. 5 % pro °C Temperaturerhöhung zunimmt, beeinflusst die Klimaerwärmung auch den Wasserhaushalt eines Agrarökosystems.

In längeren Trockenphasen versuchen Pflanzen, die verringerte Bodenwasserverfügbarkeit durch vermehrtes Wurzelwachstum zu kompensieren, da hierdurch ein größeres Bodenvolumen erschlossen werden kann. Insgesamt wird das oberirdische Sprosswachstum beeinträchtigt. Sowohl zwischen den Arten als auch den Sorten gibt es Unterschiede in der Reaktion auf Wasserstress. Auch sind Kulturpflanzen während der einzelnen Entwicklungsstadien unterschiedlich empfindlich gegenüber Wasserstress. Empfindliche Phasen bei Getreide sind die Blüte, Bestäubung und Kornfüllung. Unzureichende Wasserversorgung kann teilweise in späteren Wachstumsphasen kompensiert werden. Bei Obst und Gemüse, die in der Regel als Frischware vermarktet werden, sowie Zierpflanzen führt Wassermangel zu einem Totalausfall, da aufgrund der erheblichen Qualitätsverluste keine Vermarktung mehr möglich ist.

Die Blattentwicklung verkraftet selbst zeitlich begrenzten Wasserstress nicht gut: Die Blätter wachsen schlechter, was sich in einer sinkenden Blattfläche, einer nachhaltig beeinträchtigten Fotosynthese und letztlich in Ertragsverlusten widerspiegelt. Besonders bei einjährigen Kulturpflanzen verkürzt eine häufigere

Frühjahrstrockenheit (► Abschn. 18.2) oder eine zunehmende Sommertrockenheit die effektive Entwicklungsdauer. Dabei geht eine beschleunigte Abreife der Pflanzen meistens nicht nur auf Kosten der Fruchtbildung, sondern auch zulasten der Produktqualität. Tritt Trockenheit bereits zu Vegetationsbeginn auf, kann sich abhängig von der Bodenart auch das Keimen und Aufgehen von Ackerkulturen verringern. Darüber hinaus sind bei geringer Bodenfeuchte Nährstoffe schlechter verfügbar, Pflanzenschutzmittel weniger wirksam, der Humusaufbau verringert und die Anfälligkeit des Bodens gegenüber Winderosion hoch (► Kap. 20).

18.3.3 Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre

Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre bildet die Grundlage für Wachstum und Entwicklung aller Pflanzen. Viele Pflanzen der mittleren und hohen Breiten sind sog. C₃-Pflanzen (z. B. Weizen, Roggen und Zuckerrüben). Dagegen gehören etwa Mais, Hirse und Zuckerrohr zu den C₄-Pflanzen. Für die meisten C₃-Pflanzen ist die heutige CO₂-Konzentration der Atmosphäre suboptimal. Eine höhere CO₂-Konzentration regt bei C₃-Pflanzen in der Regel die Fotosynthese an und vermindert gleichzeitig die Verdunstung über die Spaltöffnungen der Blätter. Hingegen reagieren C₄-Pflanzen nicht oder kaum mit einer Steigerung der Fotosynthese, drosseln aber ebenfalls die Verdunstung (Leakey et al. 2009). Bei beiden Pflanzentypen verbessert sich dabei die Wassernutzungseffizienz.

Inwieweit diese Auswirkungen das Wachstum der Kulturpflanzen ankurbeln und letztlich den Ertrag unter Feldbedingungen steigern, ist nicht abschließend geklärt (► Kap. 17). Wetter und Witterung, die Nährstoff- und Wasserversorgung sowie Sorteneigenschaften können die CO₂-Wirkung erheblich verändern. Die Mehrzahl der Experimente zum sogenannten CO₂-Düngeeffekt – meist CO₂-Anreicherungsversuche – fanden unter mehr oder weniger künstlichen Umwelt- und Wachstumsbedingungen statt, z. B. in Klimakammern, Gewächshäusern und Feldkammern, als Topfversuche und mit optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung. Das Ergebnis: Bei einer CO₂-Anreicherung um bis zu 80 % gegenüber der jeweiligen Umge-

bungskonzentration von 350–385 ppm CO₂ in der Atmosphäre nahmen die Erträge um 25–30 % zu (Kimball 1983; Ainsworth und McGrath 2010). Versuche in den USA, Japan und Deutschland mit Weizen, Reis, Soja, Gerste und Zuckerrüben unter realen Anbaubedingungen mit der FACE-Technik (*free air carbon dioxide enrichment*) ergaben geringere Wachstumssteigerungen um 10–14 % (■ Tab. 18.1; Long et al. 2006; Weigel und Manderscheid 2012).

Experimente und Modelle haben gezeigt, dass Kulturpflanzen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen weniger Wasser abgeben und der Boden häufig feuchter ist (Kirkham 2011; Burkart et al. 2011). Das heißt: Höhere CO₂-Konzentrationen können auch deshalb das Wachstum steigern, weil die Pflanzen über mehr Wasser verfügen. Dieser Effekt ist für C₃- und C₄-Pflanzen gleichermaßen relevant. Da C₄-Pflanzen auf höhere CO₂-Konzentrationen aber nicht mit mehr Fotosynthese reagieren, sind positive Wachstumseffekte nur unter Trockenheit zu erwarten. Feldversuche mit der FACE-Technik an Mais in den USA und Deutschland bestätigen das: Erhöhte CO₂-Konzentrationen von etwa 550 ppm kompensieren größtenteils trockenheitsbedingte Ertragsverluste (Leakey et al. 2009; Manderscheid et al. 2014).

Fast alle Studien zum CO₂-Düngeeffekt zeigen, dass sich die Gehalte an Makro- und Mikroelementen sowie sonstigen Inhaltsstoffen wie Zucker, Vitaminen und sekundären Pflanzenstoffen ändern. Bei CO₂-Anreicherungsversuchen mit Konzentrationen von 550–650 ppm verringerte sich der Stickstoffgehalt in den Blättern von Grünlandarten und in Samen und Früchten, etwa Getreidekörnern, um 10–15 % im Vergleich zur heutigen CO₂-Konzentration (Taub et al. 2007; Erbs et al. 2010). Ändert sich die pflanzliche Qualität derart, ändert sich nicht nur die Qualität von Nahrungs- und Futtermitteln, sondern auch die Nahrungsquelle, beispielsweise für pflanzenfressende Insekten und sonstige Schaderreger (Chakraborty et al. 2000).

18.3.4 Interaktionen und Rückkopplungen: CO₂, Temperatur, Niederschlag

Die positive Wirkung von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf die Fotosynthese von Kulturpflanzen verstärkt sich mit steigender Temperatur (Long 1991; Manderscheid et al. 2003). Allerdings nicht immer beim Pflanzenwachstum: Es wurden sowohl positive (z. B. keine) als auch negative Wechselwirkungen festgestellt (Batts et al. 1997; Mitchell et al. 1993; Prasad et al. 2002). In letzterem Fall führte das Wachstum unter CO₂-Anreicherung und höheren Temperaturen, verglichen mit dem Wachstum unter der heutigen CO₂-Konzentration, zu einer Verringerung.

Verringert sich durch mehr CO₂ in der Atmosphäre die Verdunstung über die Blätter und den ganzen Bestand, kann die Wassernutzungseffizienz deutlich steigen. Weniger Verdunstung bedeutet zudem eine Verringerung des latenten Wärmestroms, sodass gleichzeitig die Blatt- und Bestandsoberflächen um 1–2 °C wärmer werden können. Die positive Rückkopplung auf die Wassernutzungseffizienz könnte einen Wassermangel aufgrund künftig abnehmender Sommerniederschläge ganz oder teilweise kompensieren. Die physiologische Rückkopplung mit dem latenten Wärmestrom wiederum könnte die Effekte einer Erwärmung

der Atmosphäre weiter verstärken. Ob die CO₂-Wirkung auf den pflanzlichen Wasserhaushalt in einem künftig wärmeren Klima Bodentrockenheit und Trockenstress tatsächlich mildern wird, bleibt jedoch Spekulation.

Wird also bei höheren Temperaturen auch die Wasserversorgung zum limitierenden Faktor, könnte der CO₂-Düngeeffekt die Wechselwirkungen entscheidend beeinflussen. Viele Pflanzenwachstums- und Ertragsmodelle haben die Wirkung der CO₂-Düngung untersucht: Negative Ertragseffekte bei Getreide, die allein wärmeren Temperaturen und schlechterer Wasserversorgung geschuldet sind, fallen wesentlich geringer aus oder kehren sich ins Positive um, wenn man den CO₂-Düngeeffekt berücksichtigt. Das hängt wiederum davon ab, wie hoch man in den Modellen die CO₂-bedingte Ertragssteigerung ansetzt. Auch wenn man die Folgen zunehmender Extremereignisse bewertet, ist zu berücksichtigen, dass in den Modellszenarien allen Pflanzen mehr CO₂ zur Verfügung steht. Kulturpflanzen tolerieren unter hohen CO₂-Konzentrationen Hitze besser als unter den heutigen CO₂-Bedingungen (Hamilton et al. 2008).

Zum einen wissen wir noch nicht genug über die Wechselwirkungen der verschiedenen Klimafaktoren untereinander. Zum anderen ist wenig darüber bekannt, wie andere Faktoren (z. B. das landwirtschaftliche Management in Form von Düngung, Bodenbearbeitung, Bewässerung und Sortenwahl) diese Wechselwirkungen beeinflussen. Wirken sich erhöhte CO₂-Konzentrationen immer noch positiv aus, wenn die Pflanzen beispielweise weniger Stickstoff bekommen? Diese Frage ist bislang nicht eindeutig geklärt. Zunächst brauchen derartige Fragen eine Antwort, um geeignete Anpassungsmaßnahmen ableiten zu können (Schaller und Weigel 2007).

18.4 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf agrarrelevante Schadorganismen

Klimafaktoren beeinflussen das Auftreten von pflanzlichen Schadorganismen, zu denen Bakterien, Pilze und Viren sowie Insekten, Unkräuter und eingewanderte Arten zählen. Witterung und Klima bestimmen, wie anfällig die Wirtspflanze ist und wie die Schaderreger sich entwickeln, ausbreiten und überdauern. Der Acker- und Gartenbau sowie das Grünland reagieren empfindlich, wenn infolge von Klimaveränderungen Pflanzenkrankheiten zunehmen oder neu auftauchen.

Die Auswirkungen von Schadorganismen auf die Landwirtschaft durch die zu erwartenden Änderungen im Zuge des Klimawandels zu quantifizieren und zu bewerten ist komplex und schwierig. Denn der Klimawandel wirkt nicht nur auf die Schadorganismen selbst, sondern ebenfalls auf ihre als Nützlinge bezeichneten Gegenspieler. Wie Veränderungen einzelner Klimafaktoren die ausbalancierten Wechselwirkungen zwischen Schad- und Nutzorganismen beeinträchtigen, lässt sich zurzeit noch nicht hinreichend beantworten (Chakraborty et al. 2000; Jurosek und von Tiedemann 2013a, 2013b, 2013c). Allerdings dürften Änderungen agronomischer Faktoren wie Bodenbearbeitung oder Fruchtfolge das Auftreten von Schaderregern deutlich stärker beeinflussen als Klimaänderungen.

18.5 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf landwirtschaftliche Nutztiere

Klimaveränderungen wirken sich zum einen indirekt über Veränderungen in der Futterbereitstellung, Futterzusammensetzung bzw. -qualität auf die Viehhaltung aus. Zum anderen wirken höhere Temperaturen, Strahlungsintensitäten und Luftfeuchten direkt auf die Gesundheit und damit die Produktivität der Tiere (DGfZ 2011; DLG 2013; Gauly et al. 2013).

Liegt die Luftfeuchtigkeit über 70 %, leiden Milchkühe bereits bei Temperaturen über 24 °C unter Hitzestress. Das haben Untersuchungen auf Basis des Temperatur-Luftfeuchte-Index (THI) ergeben, der in diesem Fall einen Wert von rund 70 aufweist. Höhere THI-Werte verringern die Milchleistung und -qualität, wobei auch Unterschiede in den Haltungssystemen dazu beitragen (Nienaber und Hahn 2007; Hammami et al. 2013; Sanker 2012). So wurde in Nordwestdeutschland ein kontinuierlicher Anstieg der Milchleistung bei einem THI von 0–30 beobachtet; bei einem THI von 60 blieb die Milchleistung konstant und nahm rapide ab, wenn der THI-Wert über 62 lag (Brügemann et al. 2011, 2012). Gleichzeitig sank der Proteingehalt der Milch mit steigendem THI.

Bei Hitzestress steigt der Energiebedarf der Tiere, da möglicherweise ein Wärmeüberschuss entsteht, der abgeführt werden muss (Walter und Löpmeier 2010). Daneben verbessern höhere Temperaturen die Bedingungen für Überträger von Krankheitserregern. Allerdings führt auch der globale Tiertransport nach Zentraleuropa dazu, dass neue Krankheiten wie z. B. die Blauzungenkrankheit auftreten (Mehlhorn 2007).

18.6 Auswirkungen auf die Agrarproduktion

Die Folgen des projizierten Klimawandels auf die Pflanzenproduktion in Deutschland wurden in einigen Studien analysiert. Vergleichbare Untersuchungen für die Tierproduktion liegen nicht vor. Um Ertragseffekte abzuschätzen, wurden in zahlreichen Studien mechanistische oder dynamische Wachstumsmodelle und in geringerem Umfang statistische Modelle genutzt. Während Wachstumsmodelle pflanzenphysiologische Prozesse, u. a. den CO₂-Düngeneffekt, sowie Bodeneigenschaften, Wasserverfügbarkeit und Management (z. B. Düngungsregime) explizit berücksichtigen, sind diese Zusammenhänge in statistischen Ansätzen implizit enthalten. Die Modelle wurden in der Regel mit Daten von Versuchsstandorten, aber auch von statistischen Ertragshebungen überprüft und danach beurteilt, inwiefern sie beobachtete Ertragsschwankungen reproduzieren können. Dabei ist einerseits zu bedenken, dass Schwankungen in erhobenen Erträgen nicht nur auf Witterungsschwankungen beruhen, sondern teilweise auf weiteren Effekten wie einer Änderung der Anbaustruktur. Andererseits schlagen sich Ertragseinbußen infolge extremer Witterungsereignisse wie Kahlfrost, d. h. strenge Fröste ohne schützende Schneedecke, nicht vollständig nieder, da betroffene Bestände teilweise umgebrochen werden und stattdessen eine Sommerkultur angebaut wird.

Bei der Ertragsmodellierung wird davon ausgegangen, dass die bestehenden Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Bodeneigenschaften und Witterungsbedingungen auf die Ertragsänderung den gleichen Gesetzmäßigkeiten folgen wie in der

Vergangenheit. Es gibt bisher zu wenige Untersuchungen darüber, welche Auswirkungen das Überschreiten von Schwellenwerten (wie erhöhte Temperaturen während der Bestäubung oder früheres Einsetzen von Wasserstress) hat. Es wird unterstellt, dass die bisher bekannten Zusammenhänge in den nächsten Jahrzehnten weiter gültig sind. Daher erstreckt sich der Zeithorizont für die Betrachtung von Ertragsänderungen zumeist bis Mitte dieses Jahrhunderts.

Um die Auswirkungen des erwarteten Klimawandels abzuschätzen, werden die Wirkmodelle mit verfügbaren Klimaprojektionsdaten gespeist. Entscheidend für die Ergebnisse sind neben der Wahl des Emissionsszenarios das globale bzw. regionale Klimamodell sowie das Wirkmodell (z. B. Ertragsmodell) selbst. Während die simulierten Temperaturänderungen verschiedener Globalmodelle innerhalb bestimmter Bandbreiten liegen, aber gleiche Tendenzen aufweisen, unterscheiden sich die Projektionen zum Niederschlag besonders bei der jahreszeitlichen Verteilung deutlich. Die allein mit Klimaparametern simulierten Ertragsabweichungen reichen von negativ bis positiv. Wird der Effekt einer höheren CO₂-Konzentration auf den Ertrag mit berücksichtigt, kommt es, abhängig von der Kultur, zu deutlich positiven Ertragseffekten. Damit trägt der CO₂-Düngeneffekt in den Ertragsprojekten maßgeblich zu den projizierten Ertragsanstiegen bei.

Einige Ergebnisse solcher Klimafolgenuntersuchungen sind in **Tab. 18.2** exemplarisch für Winterweizen zusammengefasst. Sie vermitteln einen Eindruck über die Bandbreite der rein klimabedingten Ertragswirkungen. Demnach verändern sich die Weizenerträge bis Mitte des 21. Jahrhunderts regional unterschiedlich – je nach Standort- und Klimabedingungen. Mit CO₂-Düngeneffekt können die Erträge regional um mehr als 20 % steigen, ohne CO₂-Düngeneffekt aber auch um bis zu 24 % sinken. Demnach müssen die ostdeutschen Regionen ohne CO₂-Düngeneffekt tendenziell die höchsten Ertragsverluste hinnehmen. Berücksichtigt man den CO₂-Effekt und vor allem die verbesserte Wassernutzungseffizienz, kann der Winterweizenertrag regional um 5–9 % zunehmen. Dieser Effekt fällt in Regionen mit geringerem Niederschlagsniveau und leichteren Böden stärker aus (Kersebaum und Nendel 2014; Lüttger und Gottschalk 2013).

Für die Produktivität von Grünland in Hessen ergab sich im Rahmen einer Klimafolgenabschätzung eine Ertragszunahme von etwa 10 % (USF 2005), für den brandenburgischen Landkreis Märkisch-Oderland ein Verlust von etwa 15 %, jeweils gegenüber der heutigen Klimasituation (Mirschel et al. 2005). Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Quantität und die Qualität von Futterpflanzen beeinflussen wiederum die Ernährung der Tiere (Hawkins et al. 2013).

Kurz- bis mittelfristig, das bedeutet innerhalb der nächsten 20–30 Jahre, sind abgesehen von einer möglichen Zunahme der jährlichen Variabilität sowie extremer Wetterlagen keine gravierend negativen Effekte des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion zu erwarten. Ganz im Gegenteil: Die für diesen Zeitraum projizierten relativ geringen Temperaturzunahmen und geringen Abnahmen der Sommerniederschläge fördern eher das Pflanzenwachstum, allerdings nicht überall gleich. Die bisherigen regionalen Unterschiede im Ertragsniveau dürften sich verstärken. In den ertragschwächeren Regionen können zudem die Erträge stärker jährlich schwanken, weil die jährliche Variabilität des Klimas zunimmt und mehr Extreme wie Hitzewellen und Trockenheit auftreten.

■ **Tab. 18.2** Relative Ertragsänderungen von Winterweizen in einzelnen Bundesländern, Naturräumen und Flusseinzugsgebieten in Deutschland. Die Daten wurden in verschiedenen regionalen Klimafolgenstudien mittels Modellberechnungen ohne Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffekts sowie mit CO₂-Düngeeffekt (in Klammern) ermittelt. Zugrunde liegen die SRES- und RCP-Szenarien

Bundesland, Naturraum oder Flusseinzugsgebiet	Ertragsänderung in %	Szenario (SRES, RCP)	Zeithorizont
Baden-Württemberg [1]	-14	A1	2050
Hessen [2]	-10	B2	2041–2050
Brandenburg [3]	-17 (-10)	A1B	2055
Märkisch-Oderland [4]	-5 (0,5)	A1B	2055
Sachsen-Anhalt [5]	-7 bis 1	A1B	2071–2100
Elbeinzugsgebiet	-7,5	A1, B2	2020
Elbeinzugsgebiet [6]	-14 bis -8 -24 bis -20	RCP 2.6 RCP 8.5	2031–2060
Rheineinzugsgebiet [6]	-3 bis 3 8 bis 11	RCP 2.6 RCP 8.5	2031–2060
Nordrhein-Westfalen [7, 8] (verschiedene Regionen)	bis -5 (10 bis <20) bis -7 (5 bis <15)	A1B B1	2050

[1] Stock (2009); [2] Alcamo et al. (2005); [3] Wechsung et al. (2008); [4] Mirschel et al. (2005); [5] Kropp et al. (2009a); [6] Lüttger und Gottschalk (2013); [7] Burkhardt und Gaiser (2010); [8] Kropp et al. (2009b)

18.7 Anpassungsmaßnahmen

Entwicklung und Anwendung von Anpassungsmaßnahmen entscheiden mit darüber, welche Chancen die Landwirtschaft durch den Klimawandel nutzen kann bzw. wie verwundbar die Agrarproduktion künftig sein wird. Die Palette der möglichen Maßnahmen reicht von der Auswahl der Kulturpflanzen bis zum gesamtbetrieblichen Management und bezieht vor- und nachgelagerte Produktionszweige sowie den internationalen Agrarhandel mit ein. Darüber hinaus greifen Anpassungsmaßnahmen aus anderen Bereichen in die Landwirtschaft ein: z. B. über Maßnahmen des vorsorgenden Hochwasserschutzes wie der Ausweisung von Überschwemmungsgebieten, in denen die Landwirtschaft besonderen Auflagen unterliegt.

Welche konkreten Anpassungsoptionen gibt es? Einige Beispiele: Im Bereich Anbaueignung, Wachstum, Produktivität und Gesundheit von Kulturpflanzen können die Aussattermine im Herbst oder im Frühjahr, Saatkulturen und Reihenabstände geändert werden. Darauf abgestimmt lassen sich Düngungsstrategien optimieren, auch um den CO₂-Effekt zu nutzen, sowie das Pflanzenschutzmanagement anpassen. Grundsätzlich kann man geeignetere Sorten oder Kulturen auswählen. Voraussetzung ist jedoch, dass diese durch züchterische Fortschritte ähnlich wie in der Vergangenheit auch zukünftig bereitgestellt werden können. Beispielsweise lässt sich durch den Anbau von trocken- und hitzestresstoleranteren Sorten das Anbauisiko verringern oder durch einen Wechsel der Befestigung, Ausrichtung und Beschneidung der Weinreben das Wachstum und die Zuckereinlagerung in die Beeren infolge steigender Temperaturen wieder etwas verlangsamen.

Mit Blick auf Weiterentwicklungen im Bereich des gezielten Pflanzenschutzes, wie er heute Praxis ist, besteht eine hohe Anpassungsfähigkeit in Bezug auf klimawandelbedingte Änderungen bei Pflanzenkrankheiten und Schädlingen. Zudem kann

eine bessere Agrarwettervorhersage Anpassungen im Anbau unterstützen. In der Produktionstechnik stehen z. B. Verfahren der Be- und Entwässerung, Techniken zur Konservierung der Bodenfeuchte einschließlich Humusaufbau, Folienabdeckung, Frostschutzberegnung oder Hagelnetze zur Verfügung. Ob und welche Maßnahmen umgesetzt werden, hängt letztlich von ihrer Rentabilität ab, die wiederum von der Kultur und den jeweiligen Rahmenbedingungen bestimmt wird.

Eine höhere Diversität im Produktionsprogramm kann klimabedingt steigende Produktionsrisiken abfedern, beispielsweise durch eine ausgewogene Mischung von Winter- und Sommerkulturen. Ebenso wichtig sind Reservekapazitäten für unvorhergesehene Wetterlagen, Lager für Getreidevorräte sowie Liquiditätsreserven. Alternativ oder ergänzend lassen sich Produktionsrisiken durch Versicherungen abdecken.

Auch die Nutztierhaltung bietet Anpassungsmöglichkeiten: etwa durch Zucht wärmetoleranter, robuster und krankheitsresistenter Tiere. Dabei sind jedoch die Strategien der Tierseuchenbekämpfung kontinuierlich weiterzuentwickeln. Zudem werden Verfahrenstechniken und Stallsysteme entwickelt, die Hitzestress kompensieren (DGfZ 2011).

In einigen Studien wurde im Vergleich mit einer projizierten Referenzsituation untersucht, wie sich landwirtschaftliche Produktionsstrukturen infolge von klimabedingten Ertragsveränderungen anpassen und Einkommen ändern. Simulationsergebnisse für das Elbegebiet sowie landwirtschaftliche Betriebe in Berlin und Brandenburg zeigen vergleichsweise geringe klimabedingte Anpassungen der Produktionsstruktur und Auswirkungen auf die landwirtschaftlichen Einkommen (Gömann et al. 2003; Lotze-Campen et al. 2009). Dabei sind viele Anpassungsmaßnahmen weder in den Ertragsmodellen noch in den agrarökonomischen Modellen berücksichtigt, sodass die ermittelten geringen klimabedingten Auswirkungen überschätzt sein dürften.

Im Vergleich zu den Klimaänderungen beeinflussen Entwicklungen auf den Agrarmärkten, agrar- und umweltpolitische Rahmenbedingungen sowie Produktionskosten die landwirtschaftliche Produktion und die Einkommen viel gravierender. Zum Beispiel waren bis 2006 die Agrarpreise niedrig und sanken tendenziell weiter. Deshalb wurden viele Agrarflächen nicht mehr bewirtschaftet. Seit 2007 haben sich die Rahmenbedingungen jedoch verbessert: Die Agrarpreise sind deutlich gestiegen, auch wenn sie mittelfristig stark schwanken, und es wird Bioenergie gefördert. Projektionen zufolge werden Agrarflächen infolge der deutlich gestiegenen Rentabilität wieder stärker genutzt (Offermann et al. 2014). Unter diesen Rahmenbedingungen werden die Landwirte voraussichtlich viele Anpassungsmaßnahmen umsetzen, um ihre Erträge zu sichern, etwa die Beregnung, deren Bedeutung in den trockener werdenden Regionen Deutschlands zunimmt.

18.8 Kurz gesagt

Die Auswirkungen der erwarteten Klimaveränderungen erscheinen für die deutsche Landwirtschaft in den nächsten 20–30 Jahren im Wesentlichen beherrschbar. Für die längerfristigen klimatischen Veränderungen sind die Anforderungen zur Anpassung der Landwirtschaft in Deutschland neu zu analysieren. Zunehmende extreme Wetterlagen wie Früh-, Spät- und Kahlfröste, extreme Hitze, Dürre, Hagel und Sturm könnten die Landwirtschaft herausfordern. Bislang gibt es nur wenige belastbare Erkenntnisse, wie sich künftige agrarrelevante Extremereignisse auswirken, sowie über die Möglichkeiten des Risikomanagements.

Einerseits bestehen erhebliche Unsicherheiten bezüglich der Entwicklungen auf den Agrarmärkten, der zukünftigen politischen Rahmenbedingungen sowie der Klimaveränderungen in den nächsten 20–30 Jahren. Andererseits ist die Landwirtschaft sehr anpassungsfähig, weil landwirtschaftliche Produktionszyklen deutlich kürzer sind als die Zeithorizonte des Klimawandels und weil die Landwirtschaft sich rasch technologisch wie strukturell verändert. Zudem passen sich landwirtschaftliche Betriebe traditionell an neue Witterungs- und Klimaverhältnisse an.

Daher unterliegt die Landwirtschaft zwar einem latenten, jedoch keinem dringenden Anpassungsdruck an den Klimawandel. Dies spiegeln zurzeit auch die Strategien vieler Bundesländer zur Anpassung an den Klimawandel wider. Die meisten Maßnahmen der Länder liegen in den Bereichen Monitoring, Forschung und Beratung.

Literatur

Ainsworth EA, McGrath JM (2010) Direct effects of rising atmospheric carbon dioxide and ozone on crop yields. In: Lobell D, Burke M (Hrsg) Climate change and food security. Adapting agriculture to a warmer world. *Advances in Global Change Research*, Bd. 37. Springer, Dordrecht Heidelberg London New York, S 109–130 doi: 10.1007/978-90-481-2953-9

Alcamo J, Priess J, Heistermann M, Onigkeit J, Mimler M, Priess J, Schaldach R, Trinks D (2005) INKLIM Baustein 2, Abschlussbericht des Wissenschaftlichen Zentrums für Umweltsystemforschung (USF) – Universität Kassel. Projekt: Klimawandel und Landwirtschaft in Hessen: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge. <http://klimawandel.hlug.de/fileadmin/dokumente/klima/inklim/enderichte/landwirtschaft.pdf>

Barnabas B, Jager K, Feher A (2008) The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ* 31(1):11–38

Batts GR, Morison JIL, Ellis RH, Hadley P, Wheeler TR (1997) Effects of CO₂ and temperature on growth and yield of crops of winter wheat over four seasons. *Eur J Agron* 7(1–3):43–52

BMELV – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2006) Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2006. Reihe: Daten-Analysen. <http://www.bmelv-statistik.de/>

Brügemann K, Gernand E, von Borstel UU, König S (2011) Genetic analyses of protein yield in dairy cows applying random regression models with time-dependent and temperature x humidity-dependent covariates. *J Dairy Sci* 94:4129–4139

Brügemann K, Gernand E, von Borstel UU, König S (2012) Defining and evaluating heat stress thresholds in different dairy cow production systems. *Arch Tierzucht* 55:13–24

Burkart S, Manderscheid R, Wittich K-P, Löpmeier FJ, Weigel HJ (2011) Elevated CO₂ effects on canopy and soil water flux parameters measured using a large chamber in crops grown with free-air CO₂ enrichment. *Plant Biol* 13:258–269

Burkhardt J, Gaiser T (2010) Modellierung der Folgen des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion in Nordrhein-Westfalen. Abschlussbericht, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz der Universität Bonn, Abteilung Pflanzenernährung (INRES-PE), Bonn

Chakraborty S, von Tiedemann A, Teng PS (2000) Climate change: potential impact on plant diseases. *Environ Pollut* 108:317–326

DGFZ – Deutsche Gesellschaft für Züchtungskunde e (2011) Der Klimawandel und die Herausforderungen für die Nutztierhaltung von morgen in Deutschland. Positionspapier der DGFZ-Projektgruppe Klimarelevanz in der Nutztierhaltung

DLG – Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (2013) Vermeidung von Wärmebelastungen für Milchkuhe. Merkblatt 336 Download am 24.06.2013. http://www.dlg.org/fileadmin/downloads/merkblaetter/dlg-merkblatt_336.pdf

Erbs M, Manderscheid R, Jansen G, Seddig S, Pacholski A, Weigel H-J (2010) Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on grain quality parameters and elemental composition of wheat and barley grown in a crop rotation. *Agric Ecosyst Environ* 136(1–2):59–68

Fink M, Kläring H-P, George E (2009) Gartenbau und Klimawandel in Deutschland. *Landbauforschung SH* 328:1–9

Gauly M, Bollwein H, Breves G, Brügemann K, Dänicke S, Das G, Demeler J, Hansen H, Isselstein J, König S, Lohölter M, Martinsohn M, Meyer U, Potthoff M, Sanker C, Schröder B, Wrage N, Meibaum B, von Samson-Himmelstjerna G, Stinshoff H et al (2013) Future consequences and challenges for dairy cow production systems arising from climate change in Central Europe - a review. *Animal* 7(5):843–859

Gerstengarbe F-W, Werner PC (2003) Klimaänderungen zwischen 1901 und 2000. In: *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, S 58–59

Gömänn H, Kreins P, Julius C, Wechsung F (2003) Landwirtschaft unter dem Einfluss des globalen Wandels sowie sich ändernde gesellschaftliche Anforderungen: interdisziplinäre Untersuchung künftiger Landnutzungsänderungen und resultierender Umwelt- und sozioökonomischer Aspekte. *Schr Gesellsch Wirtsch Sozialwiss Landbaues* 39:201–208

Gömänn H, Bender A, Bolte A, Dirksmeyer W, Englert H, Feil J-H, Frühauf C, Hauschild M, Krenkel S, Lilienthal H, Löpmeier F-J, Müller J, Mußhoff O, Krenkel S, Offermann F, Seider P, Schmidt M, Seintsch B, Steidl J, Strohm K, Zimmer Y (2015) Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Abschlussbericht: Stand 03.06.2015. Thünen Rep, Bd. 30. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig doi:10.3220/REP1434012425000

Hamilton H, Heckathorn S, Joshi P, Wang D, Barua D (2008) Interactive effects of elevated CO₂ and growth temperature on the tolerance of photosynthesis to acute heat stress in C₃ and C₄ species. *J Integr Plant Biol* 50:1375–1387

Hammami H, Bormann J, M'hamdi N, Montaldo HH, Gengler N (2013) Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. *J Dairy Sci* 96:1844–1855

Literatur

- Hawkins E, Fricker TE, Challinor AJ, Ferro CAT, Ho CK, Osborne TM (2013) Increasing influence of heat stress on French maize yields from the 1960s to the 2030s. *Glob Change Biol* 19:937–947
- Juroszek P, von Tiedemann A (2013a) Climatic changes and the potential future importance of maize diseases: a short review. *Journal of Plant Diseases and Protection* 120:49–56
- Juroszek P, von Tiedemann A (2013b) Climate change and potential future risks through wheat diseases: a review. *European Journal of Plant Pathology* 136:21–33
- Juroszek P, von Tiedemann A (2013c) Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: a review of approaches, challenges, research gaps, key studies, and concepts. *Journal of Agricultural Science* 151(2):163–188
- Kersebaum KC, Nendel C (2014) Site-specific impacts of climate change on wheat production across regions of Germany using different CO₂ response functions. *Eur J Agron* 52:22–32
- Kimball BA (1983) Carbon dioxide and agricultural yield – an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agron J* 75:779–788
- Kirkham MB (2011) Elevated carbon dioxide – impacts on soil and plant water relations. CRC Press. Francis & Taylor,
- Kropp J, Roithmeier O, Hattermann F, Rachimow C, Lüttger A, Wechsung F, Lasch P, Christiansen ES, Reyer C, Suckow F, Gutsch M, Holsten A, Kartschall T, Wodinski M, Hauf Y, Conradt T, Österle H, Walther C, Lissner T, Lux N, Tekken V, Ritchie S, Kossak J, Klaus M, Costa L, Vetter T, Klöse M (2009a) Klimawandel in Sachsen-Anhalt. Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Telegraphenberg A31, 14473 Potsdam
- Kropp J, Holsten A, Lissner T, Roithmeier O, Hattermann F, Huang S, Rock J, Wechsung F, Lüttger A, Pompe S (UFZ), Kühn I (UFZ), Costa L, Steinhäuser M, Walther C, Klaus M, Ritchie S, Metzger M (2009b) Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV)
- Leakey ADB, Ainsworth EA, Bernacchi CJ, Rogers A, Long SP, Ort DR (2009) Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *J Exp Bot* 60:2859–2876
- Long SP (1991) Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentration: has its importance been underestimated? *Plant, Cell Environ* 14:729–739
- Long SP, Ainsworth EA, Leakey ADB, Nösberger J, Ort DR (2006) Food for thought: lower than expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Sci* 312:1918–1921
- Lotze-Campen H, Claussen L, Dosch A, Noleppa S, Rock J, Schuler J, Uckert G (2009) Klimawandel und Kulturlandschaft Berlin. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. PIK-Report 113:1436–0179
- Lüttger, Gottschalk (2013) Regionale Projektionen für Deutschland zu Erträgen von Silomais und Winterweizen bei Klimawandel, Folien zur Tagung „Vom globalen Klimawandel zu regionalen Anpassungsstrategien“ am 2., 3. September in Göttingen. <http://www.kliff-niedersachsen.de/vweb5-test.gwdg.de/wp-content/uploads/2012/11/T1-Andrea-L%C3%BCttger-et-al.pdf>. Zugegriffen: 20. Mai 2016
- Manderscheid R, Burkart S, Bramm A, Weigel H-J (2003) Effect of CO₂ enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage. *Eur J Agron* 19(3):411–425
- Manderscheid R, Erbs M, Weigel H-J (2014) Interactive effects of free-air CO₂ enrichment and drought stress on maize growth. *Eur J Agron* 52:1–10
- Mehlhorn H, Walldorf V, Klimpel S, Jahn B, Jaeger F, Eschweiler J, Hoffmann B, Beer M (2007) First occurrence of culicoides obsoletus-transmitted Bluetongue virus epidemic in Central Europe. *Parasitol Res* 101(1):219–228
- Mirschel W, Eulenstein F, Wenkel KO, Wieland R, Müller L, Willms M, Schindler U, Fischer A et al (2005) 6. Regionale Ertragsschätzung für wichtige Fruchtarten auf repräsentativen Ackerstandorten in Märkisch-Oderland mit Hilfe von SAMT. In: Wiggering (Hrsg) Entwicklung eines integrierten Klimamanagements für Brandenburg (http://z2.zalf.de/content/1784_Ertrag_fuer_Klimawandel_Mirschel.pdf)
- Mitchell RAC, Mitchell VJ, Driscoll SP, Franklin J, Lawlor DW (1993) Effects of increased CO₂ concentration and temperature on growth and yield of winter wheat at 2 levels of nitrogen application. *Plant Cell Environ* 16:521–529
- Morrison JIL, Lawlor DW (1999) Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth. *Plant Cell Environ* 22:659–682
- Nendel C, Kersebaum KC, Mirschel W, Wenkel KO (2014) Testing farm management options as a climate change adaptation strategy using the MONICA model. *Eur J Agron* 52:47–56
- Nienaber JA, Hahn GL (2007) Livestock production system management responses to thermal challenges. *Int J Biometeorol* 52:149–157
- Offermann F, Deblitz C, Golla B, Gömann H, Haenel H-D, Kleinhanß W, Kreins P, von Ledebur O, Osterburg B, Pelikan J, Röder N, Rösemann C, Salamon P, Sanders J, de Witte T (2014) Thünen-Baseline 2013–2023: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. Thünen Rep, Bd. 19. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig
- Porter JP, Gawith M (1999) Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *Eur J Agron* 10:23–36
- Porter JR, Semenov MA (1999) Climate variability and crop yields in Europe. *Nature* 400:724
- Prasad PVV, Boote KJ, Allen LH, Thomas JMG (2002) Effects of elevated temperature and carbon dioxide on seed-set and yield of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Glob Change Biol* 8(8):710–721
- Sanker C (2012) Untersuchungen von klimatischen Einflüssen auf die Gesundheit und Milchleistung von Milchkühen in Niedersachsen. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen
- Schaller M, Weigel H-J (2007) Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. *Landbauforsch Völknerode SH*, Bd. 316. FAL, Braunschweig, S 248
- Stock M (2009) KLARA, Klimawandel, Auswirkungen, Risiken und Anpassung. PIK Report No, Bd. 99. Potsdam-Institute Climate Impact Research, Potsdam
- Taub DR, Miller B, Allen H (2007) Effects of elevated CO₂ on protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Glob Change Biol* 14:1–11
- 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
- Walter K, Löpmeier F-J (2010) Fütterung und Haltung von Hochleistungskühen 5. Hochleistungskühe und Klimawandel. *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research* 1(60):35–44
- Wechsung F, Gerstengarbe F-W, Lasch P, Lüttger A (2008) Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel. PIK-Report. Potsdam-Institute Climate Impact Research, Potsdam
- Weigel H-J (2011) Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. *Landbauforsch SH* 354:9–28
- Weigel H-J, Manderscheid R (2012) Crop growth responses to free air CO₂ enrichment and nitrogen fertilization: rotating barley, ryegrass, sugar beet and wheat. *Eur J Agron* 43:97–107

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.