



Klimawirkungen und Anpassung in der Landwirtschaft

*Hermann Lotze-Campen, Tobias Conradt, Frank Ewert,
Cathleen Frühauf, Horst Gömann, Peggy Michaelis, Andrea Lüttger,
Claas Nendel und Hans-Joachim Weigel*

Inhaltsverzeichnis

- 18.1 Agrarrelevante klimatische Veränderungen – 238**
- 18.2 Direkte Auswirkungen von Klimaveränderungen auf wichtige Kulturpflanzen – 238**
 - 18.2.1 Temperaturveränderungen – 238
 - 18.2.2 Niederschlagsveränderungen – 240
 - 18.2.3 Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre – 240
 - 18.2.4 Interaktionen und Rückkopplungen: CO₂, Temperatur, Niederschlag – 241
- 18.3 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf agrarrelevante Schadorganismen – 242**
- 18.4 Auswirkungen von Klimaveränderungen auf landwirtschaftliche Nutztiere – 242**
- 18.5 Auswirkungen auf die Agrarproduktion – 243**
- 18.6 Anpassungsmaßnahmen – 244**
- 18.7 Kurz gesagt – 245**
- Literatur – 245**

Wie kaum ein anderer Wirtschaftsbereich hängt die Landwirtschaft von Witterung und Klima ab. Die Änderungen wichtiger Klimakenngrößen wie Temperatur und Niederschlag (zu den unterschiedlichen Kenngrößen ► Kap. 6) 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. Auswirkungen auf die Biodiversität und damit verbundene Ökosystemleistungen (► 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 I 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 Kohlendioxid-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 kontinuierlich verändern. Insbesondere die Entwicklungen auf den Agrarmärkten, die ihrerseits durch weltweite Klimaänderungen 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.

18.1 Agrarrelevante klimatische Veränderungen

Seit 1881 wurden für die Landwirtschaft folgende relevante Klimaveränderungen in Deutschland beobachtet: Neben einem Anstieg der Jahresmitteltemperatur um

etwa 1,6 °C (Deutschlandmittel) lagen nach Analysen des DWD (2021) die Änderung des Jahresniederschlages im gleichen Zeitraum im Vergleich zum Referenzzeitraum (1961–1990) zwischen –5,5 % (Sachsen) und +16 % (Schleswig-Holstein). Im Winter nahmen die Niederschläge zwischen 12,6 % (Sachsen) und 35,6 % (Schleswig-Holstein) zu, während im Sommer Abnahmen bis zu 13,7 % (Sachsen) zu beobachten waren.

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 20 Jahren ist ein deutlicher Rückgang der Niederschläge im Frühjahr (März, April, Mai) beobachtet worden. Mit der Zunahme der Temperatur im gleichen Zeitraum und der damit steigenden Verdunstung ging die Bodenfeuchte deutlich zurück. Diese ausgeprägte Frühjahrstrockenheit bildet die Klimaprojektionen für die Vergangenheit nicht ab, sodass keine Aussage über die zukünftige Entwicklung der Bodenfeuchtesituation im Frühjahr getroffen werden kann (Gömann et al. 2015).

18.2 Direkte Auswirkungen von Klimaveränderungen auf wichtige Kulturpflanzen

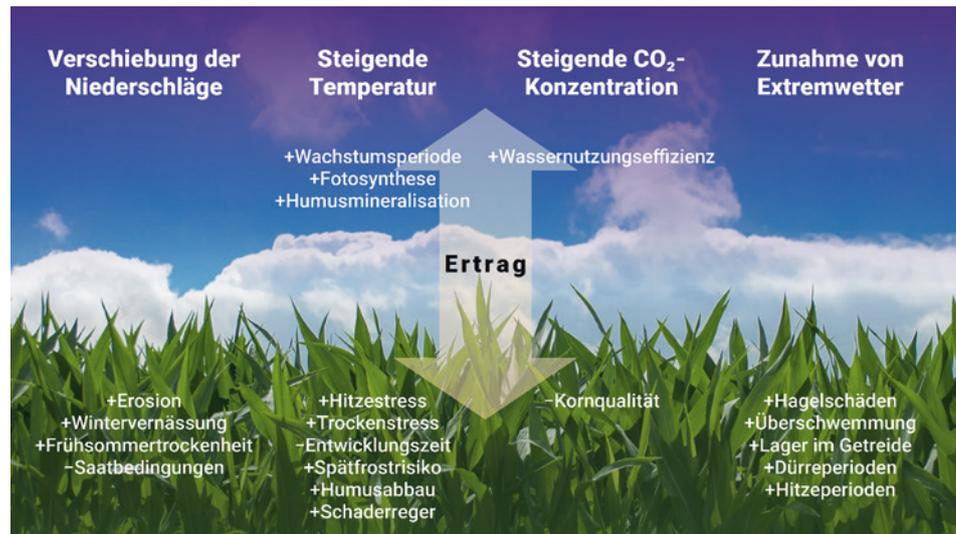
18.2.1 Temperaturveränderungen

■ 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 wirken sich meis-

■ **Abb. 18.1** Agrarökosysteme im Klima der Zukunft: Unter den Rahmenbedingungen einer eindeutig projizierten Veränderung klimatischer Durchschnittswerte ist die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion mit weitreichenden Änderungen, darunter auch mit häufiger auftretenden Klimaextremen, konfrontiert. Wie sich das Zusammenspiel dieser unterschiedlichen Elemente des Klimawandels im Endeffekt auswirkt, ist größtenteils noch offen. (Nach Weigel 2011; Eigene Darstellung)



tens schädlich auf Kulturpflanzen aus. Besonders temperaturempfindlich sind Phasen der Samen- und Fruchtbildung. Extremereignisse wie Hitzeperioden im Sommer beeinträchtigen spezifische generative Stadien wie das Entfalten der Blüte bei Getreide (Porter und Gawith 1999; Barnabas et al. 2008). Bei Weizen und Mais führen Temperaturen über 31 bzw. 35 °C zur Sterilität der Pollen, stören so die Befruchtung und den Fruchtansatz. Das verringert die potenzielle Kornzahl und schmälert den Ertrag (Rezaei et al. 2018). Bei anderen empfindlichen Kulturen wie z. B. Tomaten können Blüten oder junge Früchte aufgrund von Hitzestress absterben. Bei zusätzlicher Trockenheit fehlt zudem der kühlende Effekt der Transpiration, was sich auf die Samenanlage bei direkter Sonneneinstrahlung schädigend auswirkt (Durigon und van Lier 2013).

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 Aminostoffgehalte 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 ist die Fruchtfärbung bei bestimmten Apfelsorten verringert, und beim Wein wird mehr Säure abgebaut. In sehr warmen Sommern steigt bei Letzterem das Mostgewicht (der Zuckergehalt in den Beeren) schnell an; die Ausbildung der Aromen benötigt jedoch Zeit.

■ Phänologie

Viele Prozesse in den Pflanzen werden durch die Temperatur und durch die Tageslänge gesteuert. Steigende Temperaturen verlängern insgesamt die Vegetationsperiode, lassen jedoch viele phänologische Stadien wie Blüte und Abreife früher im Jahreszyklus beginnen und verkürzen deren Dauer. Dies kann einerseits zur Folge haben, dass etwa beim Getreide die wichtige Kornfüllungsphase verkürzt wird und sich der Ertrag verringert. Andererseits zeigen Modellsimulationen auch 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 einige 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 (► Kap. 15).

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 versetzt gepflanzt und geerntet. Steigen mit dem Klimawandel die Temperaturen, ist das nicht unbedingt ein 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. Außerdem werden Gemüseflächen häufig bewässert, sodass durch die Verdunstungskühlung auch Hitzeperioden überbrückt werden können. Allerdings sind hierbei mögliche Schäden durch eine erhöhte Ozonbelastung bei langanhaltender Hitze nicht mitberücksichtigt (Fuhrer et al. 2016; Schauburger et al. 2019).

18.2.2 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 Grad Celsius 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. Dafür wird das oberirdische Sprosswachstum beeinträchtigt. Sowohl zwischen den Arten als auch den Sorten gibt es Unterschiede in der Reaktion auf Trockenstress. Auch sind Kulturpflanzen wäh-

rend der einzelnen Entwicklungsstadien unterschiedlich empfindlich gegenüber Trockenstress. Empfindliche Phasen bei Getreide sind die Blüte und die Kornfüllung. Unzureichende Wasserversorgung kann nur 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. Aufgrund der hohen Deckungsbeiträge für diese Kulturen kann hier jedoch bei entsprechender Wasserverfügbarkeit mit künstlicher Bewässerung als Anpassungsoption entgegengesteuert werden.

Die Blattentwicklung verkraftet selbst zeitlich begrenzten Trockenstress nicht gut: Die Blätter wachsen schlechter, was sich in einer verringerten Blattfläche, einer nachhaltig beeinträchtigten Fotosynthese und letztlich in Ertragsverlusten widerspiegelt. Besonders bei einjährigen Kulturpflanzen verkürzt eine häufigere Frühjahrstrockenheit (► Abschn. 18.1) 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).

18.2.3 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 dem sog. C₃-Metabolismus zuzuordnen (z. B. Weizen, Roggen und Zuckerrüben). Diese C₃-Pflanzen reagieren direkt auf den CO₂-Gehalt der Atmosphäre. Dagegen gehören etwa Mais, Hirse und Zuckerrohr zu den C₄-Pflanzen, die über einen Mechanismus der internen CO₂-Anreicherung verfügen. Bei höheren CO₂-Konzentrationen können C₃-Pflanzen größere Mengen CO₂ pro Zeit durch ihre Spaltöffnungen schleusen und ihren Bedarf für die Fotosynthese schneller befriedigen, und diese sogar weiter steigern. Da durch die Spaltöffnungen auch Wasserdampf entweicht, kann die Pflanze durch frühzeitiges Schließen der Öffnungen Wasserverluste vermeiden. Hingegen können C₄-Pflanzen kaum auf höhere CO₂-Gehalte der Atmosphäre mit einer Steigerung der Fotosynthese reagieren,

drosseln aber ebenfalls die Verdunstung (Leakey et al. 2009). Bei beiden Pflanzentypen verbessert sich dabei die Wassernutzungseffizienz.

Wie stark diese Auswirkungen das Wachstum der Kulturpflanzen ankurbeln und in welcher Höhe sie 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 Umgebungskonzentration von 350 bis 385 ppm CO₂ in der Atmosphäre nahmen die Erträge um 25 bis 30 % zu (Kimball 1983; Ainsworth et al. 2010). Versuche in den USA, Japan und Deutschland mit den C₃-Pflanzen Weizen, Reis, Soja, Gerste und Zuckerrüben unter realen Anbaubedingungen mit der FACE-Technik (*free air carbon dioxide enrichment*) ergaben Wachstumssteigerungen um lediglich 10 bis 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). Höhere CO₂-Konzentrationen können also auch deshalb das Wachstum steigern, weil die Pflanzen das Wasser effektiver nutzen (Manderscheid et al. 2018). Dieser Effekt ist für C₃- und C₄-Pflanzen gleichermaßen relevant. Da C₄-Pflanzen auf höhere CO₂-Konzentrationen aber nicht mit mehr Fotosynthese reagieren, sind zukünftige 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 bis 650 ppm verringerte sich der Stickstoffgehalt in den Blättern von Grünlandarten und in Samen und Früchten, etwa Getreidekörnern, um 10 bis 15 % im Vergleich zur heutigen CO₂-Konzentration (Taub et al. 2007; Erbs et al. 2010). Ändern sich die pflanzlichen Eigenschaften derart, ändert sich zum einen die Qualität von Nahrungs- und Futtermitteln, zum anderen auch die Eignung der Pflanzen als Nahrungsquelle, beispielsweise für pflanzenfressende Insekten und sonstige Schaderreger (Chakraborty et al. 2000).

18.2.4 Interaktionen und Rückkopplungen: CO₂, Temperatur, Niederschlag

Die positive Wirkung von erhöhten CO₂-Konzentrationen auf die Fotosyntheseaktivität von Kulturpflanzen hängt von der Temperatur ab (Long 1991; Manderscheid et al. 2003). Steigen die Temperaturen über ein Optimum hinaus an, kann der positive CO₂-Düngeeffekt einen negativen Temperatureffekt auf das Pflanzenwachstum nicht mehr ausgleichen und Ertragsabnahmen sind die Folge (Batts et al. 1997; Mitchell et al. 1993; Prasad et al. 2002). Verringert sich durch mehr CO₂ in der Atmosphäre die Verdunstung je Blattfläche und des ganzen Pflanzenbestandes, kann die Wassernutzungseffizienz deutlich steigen. Weniger Verdunstung bedeutet zudem eine Verringerung des latenten Wärmestroms, sodass gleichzeitig die Blatt- und Bestandsoberflächen wärmer werden können. Be-

■ **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	9,5	68,1	5,7	5,9	71,7	8,4
	50	7,8	61,1	4,7	4,7	64,2	7,3
Erhöht	100	10,2	73,4	6,6	6,9	76,8	9,7
	50	8,5	66,2	5,9	5,6	74,5	7,6
%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

stände unter Trockenstress können dabei eine um +6 °C wärmere Blatttemperatur haben als gut mit Wasser versorgte Bestände (Durigon und van Lier 2013). Die positive Rückkopplung auf die Wassernutzungseffizienz könnte einen Wassermangel aufgrund künftig abnehmender Sommerniederschläge ganz oder teilweise kompensieren (Weigel et al. 2014). Werden jedoch durch die höhere CO₂-Konzentration mehr Blätter je m² gebildet, kann der Effekt der besseren Wassernutzungseffizienz wieder zunichte gemacht werden. Auch könnte die physiologische Rückkopplung mit dem latenten Wärmestrom die Effekte höherer Temperaturen weiter verstärken.

Wird also im Zuge des Klimawandels 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, wird der CO₂-Düngeeffekt berücksichtigt (Toreti et al. 2020). Dabei sind Standortbedingungen oft entscheidend (Kersebaum und Nendel 2014).

Zum einen wissen wir noch nicht genug über die Wechselwirkungen der verschiedenen Klimafaktoren untereinander. Zum anderen ist zu 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 beispielsweise weniger Stickstoff bekommen? Neue Untersuchungen von Wang et al. (2020) zeigen, dass der globale CO₂-Düngeeffekt in den meisten Regionen der Erde im Zeitraum von 1982 bis 2015 zurückgegangen ist. Es wird vermutet, dass die Nährstoffverfügbarkeit und nicht mehr das CO₂ der limitierende Faktor ist. Derartige Fragen brauchen eine Antwort, um geeignete Anpassungsmaßnahmen ableiten zu können (Schaller und Weigel 2007).

18.3 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 auftreten. Insbesondere wärmere Winter und das Ausbleiben von starkem, in den Boden eindringendem Frost führen dazu, dass mehr Schadorganismen überleben.

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. 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; Juroszek und van Tiedemann 2013a, b, c). Allerdings dürften Änderungen agronomischer Faktoren wie Bodenbearbeitung oder Fruchtfolge das Auftreten von Schaderregern deutlich stärker beeinflussen als Klimaänderungen.

18.4 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 beeinflussen höhere Temperaturen, Strahlungsintensitäten und Luftfeuchten direkt 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 (Temperature Humidity 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 bis 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.

Modellrechnungen des DWD mit dem RCP8.5-Szenario (UBA 2021) zeigen, dass die Anzahl der Tage mit einem THI zwischen 70 und 80 (starker Hitzestress) bis zur Mitte des Jahrhunderts um 10 bis 35 und bis zum Ende des Jahrhunderts um 30 bis 60 zunehmen kann. Tage mit Werten über 80 (extremer Hitzestress) tre-

ten auch in Zukunft selten auf. Nur im Rheintal treten beim 85. Perzentil des untersuchten Ensembles an Klimaprojektionen im 30-jährigem Mittel bis zu sechs Tage mit extremem Hitzestress am Ende des Jahrhunderts auf.

Bei Hitzestress steigt der Energiebedarf der Tiere, da ein Wärmeüberschuss entsteht, der abgeführt werden muss (Walter und Löpmeier 2010). Daneben verbessern höhere Temperaturen die Bedingungen für Überträger von Krankheitserregern. Zu mehr und neuen Krankheiten (wie z. B. die Blauzungkrankheit) hierzulande führt allerdings auch der globale Tiertransport nach Zentraleuropa (Mehlhorn 2007).

18.5 Auswirkungen auf die Agrarproduktion

Die Folgen des projizierten Klimawandels auf die Pflanzenproduktion in Deutschland wurden in einigen Studien analysiert. Um Ertragseffekte für Kulturpflanzen abzuschätzen, wurden in zahlreichen Studien verschiedene Wirkmodelle genutzt, d. h. mechanistische oder dynamische Wachstumsmodelle und in geringerem Umfang auch statistische Modelle. Während Wachstumsmodelle pflanzenphysiologische Prozesse, u. a. den CO₂-Düngeeffekt, sowie Bodeneigenschaften, Wasserverfügbarkeit und Management (z. B. Düngungsregime) explizit berücksichtigen, sind diese Zusammenhänge in statistischen Ansätzen lediglich implizit enthalten. Die Wirkmodelle wurden in der Regel mit Daten von Versuchsstandorten, aber auch von statistischen Ertragerhebungen 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 Kahlfröste, d. h. strenge Fröste ohne schützende Schneedecke, nicht vollständig nieder, da betroffene Bestände teilweise kurzfristig umgebrochen und stattdessen Sommerkulturen angebaut werden.

Bei der Ertragsprojektion mittels statistischer Modelle 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 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. Dieses Problem versuchen mechanistische,

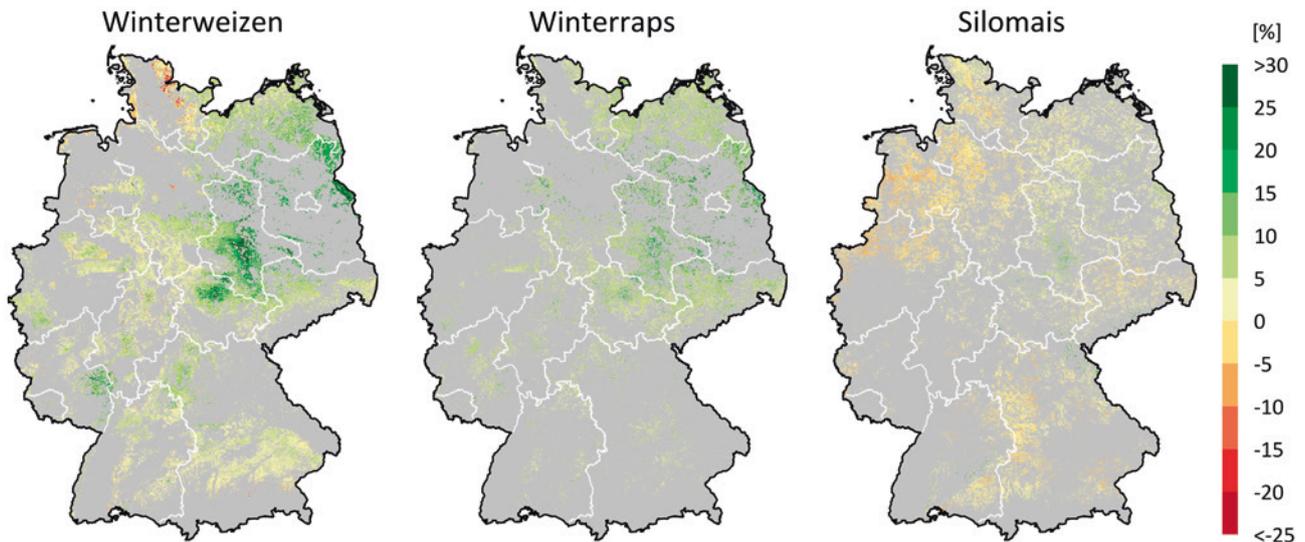
d. h. auf biophysikalischen Prozessen basierende dynamische Modelle zu umgehen.

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 Klimamodelle innerhalb bestimmter Bandbreiten liegen, aber die gleiche Tendenz aufweisen, unterscheiden sich die Projektionen zum Niederschlag besonders bei der jahreszeitlichen Verteilung deutlich. Die allein mit Klimaparametern simulierten Ertragsabweichungen reichen in der Regel von negativ bis neutral. Wird der Effekt einer höheren CO₂-Konzentration auf den Ertrag mitberücksichtigt, kommt es, abhängig von der Kultur, mitunter auch zu deutlich positiven Ertragseffekten (► Abschn. 18.2.4).

Die Bandbreite der Ergebnisse solcher Klimafolgenuntersuchungen aus der Literatur lassen sich am Beispiel Winterweizen wie folgt zusammenfassen. Die Weizenerträge werden sich bis Mitte des 21. Jahrhunderts regional unterschiedlich verändern – je nach Standort- und Klimabedingungen. Mit Einbeziehung des CO₂-Düngeeffekts können die Erträge regional um mehr als 20 % steigen, ohne CO₂-Düngeeffekt aber auch um bis zu 24 % sinken. Demnach müssen die ostdeutschen Regionen (z. B. Brandenburg, Elbeinzugsgebiet) – ohne Einrechnung des CO₂-Düngeeffekts – tendenziell die höchsten Ertragsverluste hinnehmen (Alcamo et al. 2005; Mirschel et al. 2005; Wechsung et al. 2008; Kropp et al. 2009a, b; Stock 2009; Burkhardt und Gaiser 2010; Lüttger und Gottschalk 2013). Berücksichtigt man den CO₂-Effekt und vor allem die verbesserte Wassernutzungseffizienz, kann der Winterweizenertrag regional um 5 bis 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 bis 30 Jahre, sind abgesehen von einer möglichen Zunahme der jährlichen Variabilität sowie extremer Wetterlagen im deutschlandweiten Mittel keine gravierend negativen Effekte des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion zu erwarten. Dabei kann es jedoch regionale Unterschiede geben, die je nach Kultur-



■ **Abb. 18.2** Zu erwartende, über den Zeitraum 2031–2060 gemittelte Ertragsveränderungen für Winterweizen, Winterraps und Silomais (Futtermais) in Deutschland im Vergleich zu 1981–2010 auf der Grundlage von Simulationen mit dem Agrarökosystemmodell MONICA (Nendel et al. 2011) unter Verwendung der Bodenübersichtskarte 1:200.000 und Ensemble-Klimaprojektionen mit ansteigenden CO_2 -Gehalten in der Atmosphäre gemäß dem RCP 8.5-Szenario. (Quelle: Eigene Berechnungen)

art auch mit erheblichen Verlusten einhergehen. Simulationen mit dem mechanistischen Agrarökosystemmodell MONICA (Nendel et al. 2011) ergeben bei einem Zeithorizont bis 2045 (gemittelt über den Zeitraum 2031–2060) für das RCP8.5-Szenario für Deutschland eine durchschnittliche Zunahme des Winterweizenertrags von +6 %, während für Silomais im Durchschnitt keine Änderung projiziert wird (■ Abb. 18.2). Die derzeit verfügbaren Klimaszenarien bilden jedoch regionale Trends der Dürreperioden für Deutschland bislang nicht gut ab, sodass Ertragsprojektionen zurzeit als zu optimistisch eingeschätzt werden.

18.6 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. 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 Aussaattermine im Herbst oder im Frühjahr, Saatkulturen und Reihenabstände geändert werden. Darauf abgestimmt lassen sich Düngungsstrategien optimieren, auch um den CO_2 -Effekt zu nutzen, sowie das Pflanzenschutzmanagement anpassen. Grundsätzlich lassen sich geeigneteren Sorten oder Kulturen auswählen. Voraussetzung ist jedoch, dass auch weiterhin züchterische Fortschritte erzielt werden können. Beispielsweise lässt sich durch den Anbau von trocken- und hitzestresstoleranteren Sorten das Anbaurisiko 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. In den letzten Jahren wurden Sortenwahl und Züchtung eine zunehmende Bedeutung als Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zugeschrieben (Wehner et al. 2017; Macholdt und Honermeier 2016, 2017).

Der gezielte Pflanzenschutz, wie er heute Praxis ist, lässt sich sehr gut an klimawandelbedingte Änderungen bei Pflanzenkrankheiten und Schädlingen anpassen. 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 be-

stimmt wird. Insbesondere die Bestrebungen, gleichzeitig die Verwendung von chemischen Pflanzenschutzmitteln zu reduzieren und die Bestandsgesundheit durch die Selbstregulierung des Ökosystems zu fördern, stellen hier neue Herausforderungen dar. Dabei wird vor allem auf das zusätzliche Angebot von Ökosystemdienstleistungen (► Kap. 34) Wert gelegt, für welche eine höhere Biodiversität in der Agrarlandschaft etabliert werden muss.

Eine höhere Diversität im Produktionsprogramm kann darüber hinaus 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 (Hirschauer et al. 2018).

Auch die Nutztierhaltung bietet Anpassungsmöglichkeiten: etwa durch Zucht wärmetoleranter, robuster und krankheitsresistenter Tiere. Dabei sind auch 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 verändern. Simulationsergebnisse für das Elbegebiet sowie Berlin und Brandenburg zeigen eine vergleichsweise geringe Notwendigkeit für 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.

Neben den zu erwartenden Klimaänderungen beeinflussen Entwicklungen auf den Agrarmärkten, agrar- und umweltpolitische Rahmenbedingungen sowie Produktionskosten die landwirtschaftliche Produktion und Einkommen in starkem Maße. Die global weiterhin steigende Nachfrage nach Nahrungsmitteln, aber auch die potenzielle Nachfrage nach Biomasse und Bioenergie im Rahmen einer ambitionierten Klimapolitik und Emissionsvermeidung könnten die zukünftige Agrarentwicklung auch in Deutschland stark beeinflussen (van Meijl et al. 2018). Der internationale Agrarhandel kann auch eine wichtige Rolle bei der Anpassung an den Klimawandel spielen. Offene und diversifizierte Handelsbeziehungen können helfen, Agrarpreissteigerungen aufgrund von klimabedingten Ernteauffällen in wichtigen Produktionsregionen abzupuffern (Stevanovic et al. 2016).

Unter diesen Rahmenbedingungen werden die Entscheidungskräfte in der Landwirtschaft voraussichtlich viele lokal spezifische Anpassungsmaßnahmen umsetzen, um ihre Erträge zu sichern, etwa die Beregnung, deren Bedeutung in den trockener werdenden Regionen Deutschlands zunimmt.

18.7 Kurz gesagt

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

Einerseits bestehen erhebliche Unsicherheiten bezüglich der Entwicklungen auf den Agrarmärkten, der zukünftigen agrar- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen sowie der regional spezifischen Klimaänderungen in den nächsten 20 bis 30 Jahren. Andererseits ist die Landwirtschaft anpassungsfähig, weil landwirtschaftliche Produktionszyklen deutlich kürzer sind als die Zeithorizonte des Klimawandels und weil die Landwirtschaft sich kontinuierlich technologisch wie strukturell verändert. Adaptive Produktionssysteme und -verfahren, kontinuierliche Züchtungsfortschritte sowie ein effektives betriebliches Risikomanagement sind wichtige Bausteine einer umfassenden landwirtschaftlichen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.

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*. Adv Global Change Res. Springer, Dordrecht, 37:109–130
- 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
- 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. Daten-Analysen, Reihe
- 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(2):258–69
- 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(3):317–26
- 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 Milchkühe. Merkblatt 336
- DWD (2021) ► <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html?nn=480164>
- Durigon A, van Lier QJ (2013) Canopy temperature versus soil water pressure head for the prediction of crop water stress. *Agric Water Manage* 127, C:1–6
- Erbs M, Manderscheid R, Jansen G, Seddig S, Pacholski A, Weigel HJ (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 HP, George E (2009) Gartenbau und Klimawandel in Deutschland. *Landbauaufsorschung* SH 328
- Fuhrer J, Val Martin M, Mills G, Heald CL, Harmens H, Hayes F, Sharps K, Bender J, Ashmore MR (2016) Current and future ozone risks to global terrestrial biodiversity and ecosystem processes. *Ecology and Evolution* 6(24):8785–8799
- Gauly M, Bollwein H, Breves G 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
- 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
- Gömänn H, Bender A, Bolte A et al (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
- 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
- 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(3):937–47
- Hirschauer N, Mußhoff O, Offermann F (2018) Sind zusätzliche staatliche Hilfen für das Risikomanagement in der Landwirtschaft sinnvoll? – Eine ökonomische Einschätzung aktuell diskutierter Maßnahmen. ifo Schnelldienst 71(20)
- Juroszek P, von Tiedemann A (2013a) Climatic changes and the potential future importance of maize diseases: a short review. *J Plant Dis Prot* 120:49–56
- Juroszek P, von Tiedemann A (2013b) Climate change and potential future risks through wheat diseases: a review. *European J Plant Pathol* 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. *J Agric Sci* 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(5):779–788
- Kirkham MB (2011) Elevated carbon dioxide – impacts on soil and plant water relations. CRC Press, Francis & Taylor, New York, 415p
- Kropp J, Roithmeier O, Hattermann F et al (2009a) Klimawandel in Sachsen-Anhalt. Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam
- Kropp J, Holsten A, Lissner T, Roithmeier O, Hattermann F, Huang S, Rock J, Wechsung F, Lüttger A, Pompe S, Kühn I, 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(10):2859–76
- 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(8):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. *Science* 312(5782):1918–1921
- Lotze-Campen H, Claussen L, Dosch A, Noleppa S, Rock J, Schuler J, Ueckert G (2009) Klimawandel und Kulturlandschaft Berlin. PIK-Report 113. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam
- Lüttger A, Gottschalk P (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
- Macholdt J, Honermeier B (2016) Variety choice in crop production for climate change adaptation: Farmer evidence from Germany. *Outlook Agric* 45(2):117–123
- Macholdt J, Honermeier B (2017) Importance of variety choice: Adapting to climate change in organic and conventional farming systems in Germany. *Outlook Agric* 46(3):178–184
- Manderscheid R, Burkart S, Bramm A, Weigel HJ (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 HJ (2014) Interactive effects of free-air CO₂ enrichment and drought stress on maize growth. *Eur J Agron* 52(A):11–21

- Manderscheid R, Dier M, Erbs M, Sickora J, Weigel H-J (2018) Nitrogen supply – A determinant in water use efficiency of winter wheat grown under free air CO₂ enrichment. *Agric Water Manage* 210:70–77
- 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):219–28
- Mirschel W, Eulenstein F, Wenkel K.-O, Wieland R, Müller L, Willms M, Schindler U, Fischer A (2005) Regionale Ertragsschätzung für wichtige Fruchtarten auf repräsentativen Ackerstandorten in Märkisch-Oderland mit Hilfe von SAMT: -2000 versus 2050-. In: Wiggering, H., Eulenstein, F., Augustin, J. (eds), *Entwicklung eines integrierten Klimaschutzmanagements für Brandenburg: Handlungsfeld Landwirtschaft ; (DS 3/6821-B)*. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg, S 49–58
- 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(5):521–529
- Morison JIL, Lawlor DW (1999) Interactions between increasing CO₂ concentration and temperature on plant growth. *Plant Cell Environ* 22(6):659–682
- Nendel C, Berg M, Kersebaum KC, Mirschel W, Specka X, Wegehenkel M, Wenkel KO, Wieland R (2011) The MONICA model: testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. *Ecol Model* 222(9):1614–1625
- 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(2):149–57
- 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
- Rezaei EE, Siebert S, Manderscheid R, Müller J, Mahrookashani A, Ehrenpfordt B, Haensch J, Weigel H-J, Ewert F (2018) Quantifying the response of wheat yields to heat stress: The role of the experimental setup. *Field Crops Research* 217:93–103
- 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. In: *Landbauforsch Völknerode SH 316, FAL Braunschweig* 248
- Schauberger B, Rolinski S, Schaphoff S, Müller C (2019) Global historical soybean and wheat yield loss estimates from ozone pollution considering water and temperature as modifying effects. *Agricultural and Forest Meteorology* 265:1–15
- Stevanovic M, Popp A, Lotze-Campen H, Dietrich JP, Müller C, Bonsch M, Schmitz C, Bodirsky B, Humpeöder F, Weindl I (2016) The impact of high-end climate change on agricultural welfare. *Sci Adv* 2:e1501452
- Stock M (2009) KLARA, Klimawandel, Auswirkungen, Risiken und Anpassung, PIK Report 99. Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, 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(3):565–575
- Toreti A, Deryng D, Tubiello FN et al (2020) Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO₂ on crops. *Nature Food* 1(12):775–782
- UBA (2021) Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse (KWVA) für Deutschland, Handlungsfeld Landwirtschaft, in Vorbereitung
- 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, S 2
- van Meijl H, Havlik P, Lotze-Campen H et al (2018) Comparing impacts of climate change and mitigation on global agriculture by 2050. *Environ Res Lett* 13(6):064021
- Wang S, Zhang Y, Ju W et al (2020) Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science* 11(370) (6522):1295–1300
- Walter K, Löpmeier FJ (2010) Fütterung und Haltung von Hochleistungskühen 5. Hochleistungskühe und Klimawandel. *Landbauforschung – vTI. Agric Forest Res* 1(60)
- Wechsung F, Gerstengarbe FW, Lasch P, Lüttger A (2008) Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel. PIK-Report. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung Potsdam
- Wehner G, Lehnert H, Balko C, Serfling A, Perovic D, Habekuß A, Mitterbauer E, Bender J, Weigel HJ, Ordon F (2017) Pflanzenzüchterische Anpassung von Kulturpflanzen an zukünftige Produktionsbedingungen im Zeichen des Klimawandels. *J Kulturpflanzen* 69
- Weigel HJ (2011) Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. *Landbauforsch SH* 354
- Weigel HJ, 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
- Weigel HJ, Manderscheid R, Fangmeier A, Högy P (2014) Mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre: Wie reagieren Kulturpflanzen? In: Lozán JL, Grassl H, Karbe L, Jendritzky G (Hrsg) *Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen*, 2. Aufl. Elektron. Veröffent (Kap. 4.6)

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.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

