

**Wie Land- und Forstwirtschaft  
unser Klima verändern  
und wie wir damit umgehen**



**Wie Land- und Forstwirtschaft  
unser Klima verändern  
und wie wir damit umgehen**





### **Herausgeber**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Meteorologie und Klimaforschung  
Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU)  
Prof. Dr. Almut Arneth  
Abteilung Ökosystem-Atmosphäre Interaktionen  
Kreuzeckbahnstr. 19  
82467 Garmisch-Partenkirchen  
Deutschland

**[www.luc4c.eu](http://www.luc4c.eu)**

### **Redaktion, Gestaltung und Layout**

Dr. Mechtild Agreiter  
KIT/IMK-IFU

Garmisch-Partenkirchen 2016

Das Projekt LUC4C wurde innerhalb des 7. EU-Rahmenprogramms für Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration unter der Fördernummer 603542 gefördert.





## Inhalt

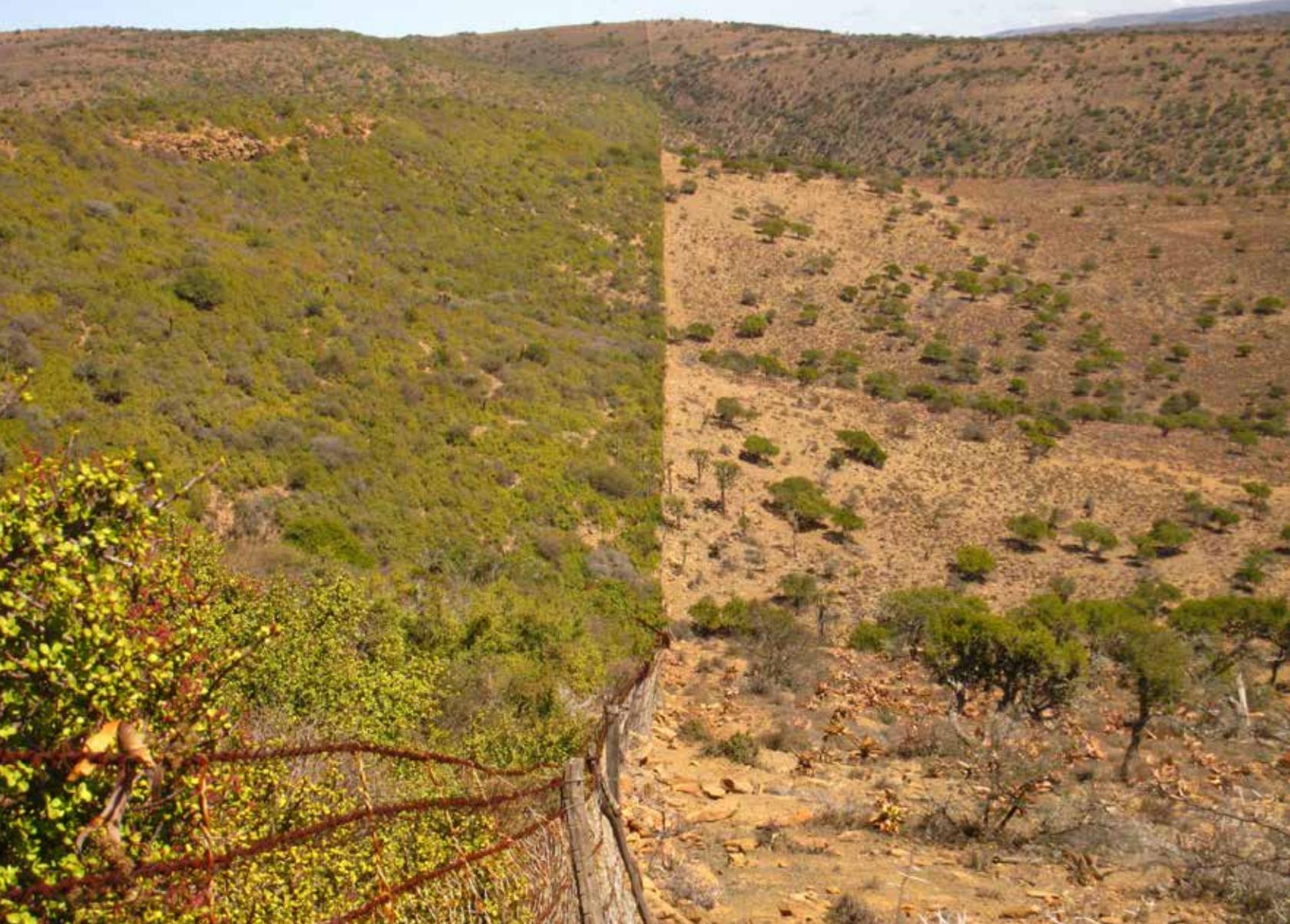
1. Landnutzungsänderung: Definition und Einfluss auf den Klimawandel 10
2. Landnutzungsänderung und internationale Klimapolitik 22
3. Analyse der Wechselwirkung zwischen Landnutzungsänderung und Klimawandel: Modelle und Verfahren 30
4. Sinn und Zweck sozioökonomischer Emissionsszenarien 36
5. Die Vernetzung zwischen Nahrungsmittelproduktion, Klima und Gesellschaft 46
6. Bioenergie, Landnutzungsänderung und Klima 54
7. Über die Anpassung von Land- und Forstwirtschaft an den Klimawandel 58
8. Nachhaltige Landnutzung: Elinor Ostroms Alternative 62

Diese Broschüre ist Teil des EU-geförderten Projekts LUC4C - *Land use change: assessing the net climate forcing, and options for climate change mitigation and adaptation*. Weitere Informationen hierzu auf der Website des Projekts [www.luc4c.eu](http://www.luc4c.eu).

LUC4C soll unsere Kenntnisse über die Wechselwirkung zwischen Landnutzungsänderung und Klimawandel vertiefen. Die beteiligten Wissenschaftler arbeiten an der Entwicklung komplexer Erdsystemmodelle, an Instrumenten für die integrative Beurteilung der Wechselwirkung zwischen Landnutzungsänderung und Klimawandel und an entsprechenden Richtlinien für politische und andere gesellschaftliche Akteure. LUC4C will die gesellschaftlichen und ökologischen Einflussfaktoren der Landnutzungs- und Bodenbedeckungsänderung ermitteln und verstehen und darüber hinaus deren Relevanz für den Klimawandel erforschen. Das Projekt bewertet sowohl verschiedene Anpassungs- und Vermeidungsstrategien im Hinblick auf ihren Einfluss auf wichtige Ökosystemprozesse als auch die durch diese Strategien unter Umständen (unbeabsichtigt) hervorgerufenen Konflikte mit anderen von der Landnutzungsänderung berührten Ökosystemleistungen.

Die enthaltenen Beiträge untersuchen u. a. die Wechselwirkungen zwischen Landnutzungsänderung und Klimawandel, klimapolitische Aspekte, aktuelle Klimamodelle und Klimaszenarien, den Bezug zur Nahrungsmittelproduktion und gesellschaftliche Wechselwirkungen.





## Landnutzungsänderung: Definition und Einfluss auf den Klimawandel

Almut Arneht

Seit Jahrtausenden bedient sich der Mensch natürlicher Ökosysteme zum Anbau von Nahrungsmitteln und Anpflanzen von Bäumen für Brenn- und Nutzholz. Heute sind ca. 40 % der eisfreien Fläche mit Kulturpflanzen oder Gras- und Weideland bedeckt. In vielen Teilen der Welt nimmt der so genutzte Boden aufgrund der wachsenden Weltbevölkerung und des damit wachsenden Bedarfs an Ressourcen immer mehr Raum in Anspruch.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen dieser Umwandlung der natürlichen Ökosysteme unterscheiden Wissenschaftler häufig zwischen Bodenbedeckungs- und Landnutzungsänderung. Während die Bodenbedeckungsänderung die Umwandlung eines Ökosystemtyps, etwa durch Ersetzen eines natürlichen Waldes oder einer natürlichen Wiese durch landwirtschaftliche Kulturen, beschreibt, wird unter Landnutzung bzw. Landnutzungsänderung die Art und Weise bzw. Änderung der Art und Weise der

Bewirtschaftung von Kulturen, Gras- und Weideland oder Wäldern verstanden. Eine solche Landnutzungsänderung kann beispielsweise in der Änderung der Dünger- oder Bewässerungsmenge, der Beweidungsdichte oder der Zusammensetzung der Baumarten eines bewirtschafteten Waldes bestehen.

Sowohl Bodenbedeckungs- als auch Landnutzungsänderungen stehen in Wechselwirkung mit dem Klimawandel und sollen in dieser Broschüre nicht unterschieden werden. Beide, und dies muss dennoch bedacht werden, sind jedoch Teil des hier ausschließlich als Landnutzungsänderung bezeichneten Prozesses.

Landnutzungsänderungen haben vielfältige Auswirkungen auf den Klimawandel. Die bekanntesten dieser Auswirkungen äußern sich im Treibhausgasgehalt der Atmosphäre. Treibhausgase wie Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Stickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ) beeinflussen das Klima der Erde und haben sich, insbesondere im Laufe der vergangenen 100 bis 200 Jahre, aufgrund menschlichen Handelns, in der Atmosphäre angereichert. Die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre kann direkt mittels einer Reihe weltweit installierter Beobachtungsstationen gemessen werden. Darüber hinaus können aber

beispielsweise auch in Gletschern eingeschlossene Gasblasen Auskunft geben und belastbare Aussagen über den Ausstoß von Treibhausgasen vor hundert und tausenden von Jahren machen. Die genaue chemische Signatur der Treibhausgasmoleküle (die sogenannte isotopische Zusammensetzung) zeigt menschliches Handeln als Hauptquelle der Zunahme der Treibhausgase an.

Beim Ersetzen von Wäldern durch Kulturpflanzen oder Gras- und Weideland gelangen große Mengen von  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre, das meiste davon direkt (während der Brandrodung des Waldes) oder über die Folgejahre verteilt (wenn die hergestellten Holzprodukte nicht mehr gebraucht und daraufhin verbrannt werden oder wenn sie beginnen zu verrotten). In den Stämmen der Bäume werden große Mengen Kohlenstoff gespeichert. Gleichzeitig aber sterben die verbleibenden Wurzeln ab und werden von Bodenorganismen zu  $\text{CO}_2$  zersetzt. Da Kulturpflanzen und Gräser keine Stämme und weniger Wurzelbiomasse als Bäume besitzen, enthalten landwirtschaftliche Ökosysteme und Wiesenökosysteme insgesamt weniger Kohlenstoff als die Wälder. Somit geht nach Abholzung eines Waldes Kohlenstoff an die Atmosphäre verloren. Umgekehrt kann beim Ersetzen von Kulturpflanzen durch Wälder

Kohlenstoff aus der Atmosphäre wieder aufgenommen werden. Weltweit ist allerdings nur eine relativ geringe Zunahme der Waldgebiete zu verzeichnen. Es wird geschätzt, dass ca. ein Drittel des gesamten gegenwärtigen anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes durch Flurbereinigungen im Verlaufe der vergangenen Jahrzehnte bis Jahrhunderte verursacht worden ist.

Neben  $\text{CO}_2$  sind  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$  als Treibhausgase maßgeblich. Ca. 50 % des derzeit in der Atmosphäre messbaren Stickstoffdioxids stammen aus der Landwirtschaft und sind hauptsächlich auf die Verwendung von Dünger zurückzuführen. Stickstoffhaltige Düngemittel werden zur Wachstumsunterstützung partiell von den Pflanzen aufgenommen. Teile des Stickstoffs aber verbleiben im Boden und werden dort von Mikroorganismen in stickstoffhaltige Gase, einschließlich  $\text{N}_2\text{O}$ , umgewandelt, welche später zurück in die Atmosphäre gelangen.  $\text{CH}_4$  ist ein Nebenprodukt der Aktivität von Bodenorganismen auf Reisfeldern und wird durch sogenannte Methanbildner erzeugt. Diese Mikroorganismen nutzen totes Pflanzenmaterial, um sich zu ernähren und unter sauerstoffarmen Bedingungen zu wachsen (Beispiel: Reisanbau auf gefluteten Feldern).  $\text{CH}_4$  ist das Endprodukt ihres Stoffwechsels. Darüber hinaus wird

CH<sub>4</sub> in den Mägen von Wiederkäuern, insbesondere in Kuhmägen, produziert. Nahezu die Hälfte der gesamten jährlichen anthropogenen Methanemissionen stammt derzeit aus der Viehzucht und dem Reisanbau.

Die genannten Treibhausgase tragen zur Erderwärmung bei. Ihre Auswirkungen sind für das globale Klima relevant, denn sie verfügen über eine geringe chemische Reaktivität und sind langlebig, d. h. haben sehr viel Zeit, sich in der Atmosphäre zu vermischen und verbleiben dort für Jahrzehnte bis Jahrhunderte bis sie schließlich durch physikalische oder chemische Prozesse abgebaut werden.

Landnutzungsänderungen beeinflussen das Klima daneben durch Prozesse, die nicht in Verbindung mit der Emission von Treibhausgasen stehen. Diese Prozesse werden häufig unter dem Begriff „biophysikalisch“ zusammengefasst und beruhen auf ihren Auswirkungen auf Strahlung und Evapotranspiration: Beim Auftreffen von Sonnenlicht auf die Landoberfläche wird ein Teil des Lichts direkt zurück in die Atmosphäre reflektiert und die verbleibende Strahlung absorbiert. Der Anteil der Reflexion wird als Albedo bezeichnet. Die Albedo einer dunklen ist geringer als die einer hellen Oberfläche. Eine Forst-



landschaft hat somit eine geringere Albedo als eine landwirtschaftlich genutzte Fläche oder Weideland. Während das absorbierte Sonnenlicht in Wärme umgewandelt wird, beeinflusst also die Albedo die Oberflächentemperatur des Waldes. In für die Nahrungsmittelproduktion bewirtschafteten Ökosystemen wird mehr Sonnenlicht reflektiert, d. h. die Oberflächentemperatur solcher Ökosysteme ist geringer im Vergleich zu der eines Waldes.

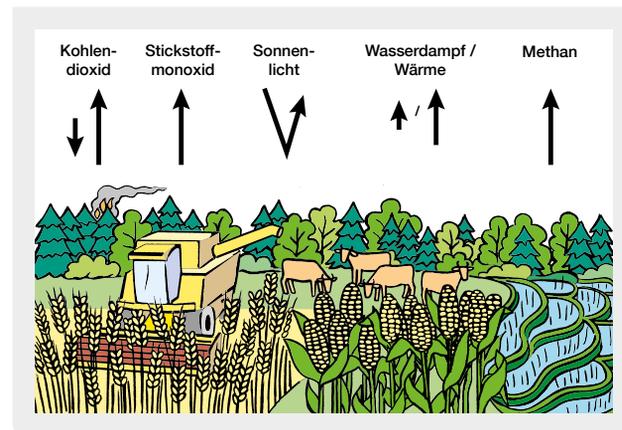
Doch damit nicht genug: Die absorbierte Strahlung wird nur zum Teil in Wärme umgewandelt und dient darüber hinaus dazu, Wasserdampf aus den Ökosystemen in die Atmosphäre zu transportieren. Dieser Prozess wird als Evapotranspiration bezeichnet und setzt sich zusammen aus dem Wasserdampfverlust der Böden (Verdunstung) und dem Wasserdampfverlust der Pflanzen über die grünen Blätter (Transpiration). Eine hohe Evapotranspiration hat Abkühlung zur Folge.

Ob natürliche Waldökosysteme einen höheren Grad an Evapotranspiration als landwirtschaftlich genutzte Flächen oder Weidesysteme aufweisen, ist schwer zu sagen. Dies ist abhängig u. a. von dem Teil der Welt, in dem die Pflanzen wachsen, von der Wurzeltiefe der natürlichen im Vergleich zu der der kul-

tivierten Vegetation und von der Bewässerung bzw. Nichtbewässerung der genutzten Fläche. In einigen Regionen ist das Auftreten von Dürreperioden mit biophysikalischen Landnutzungsänderungsprozessen in Verbindung gebracht worden. In anderen Regionen hingegen können Landnutzungsänderungen aber sogar zu lokaler Abkühlung führen.

An dieser Stelle ist es wichtig anzumerken, dass neben den oben beschriebenen langlebigen Treibhausgasen und biophysikalischen Prozessen noch ein dritter Effekt der Landnutzungsänderung existiert.

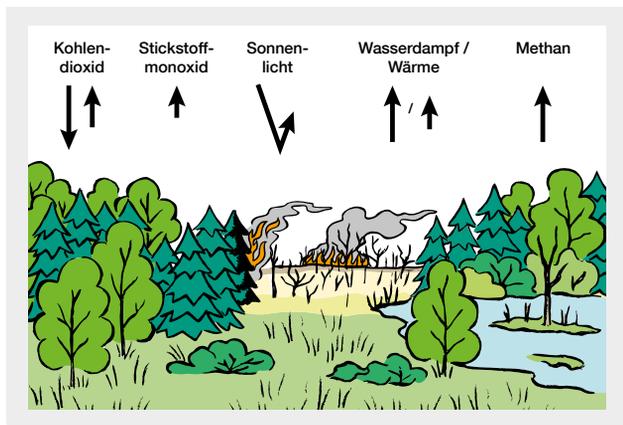
Landnutzungsänderungen stehen auch in Bezug zur Emission von Spurengasen, den Vorläufern bei der Bildung von Ozon in den unteren Bereichen der Atmosphäre. In den unteren Luftschichten ist Ozon ein die Klimaerwärmung verstärkendes Treibhausgas. Aerosole und ihre Vorläufer schließlich sind klimaverändernde Substanzen, die entweder zur Erwärmung oder zur Abkühlung führen. Im Gegensatz zu den Auswirkungen der Treibhausgasemissionen bleiben die Auswirkungen biophysikalischer Prozesse und reaktiver Spurengase und Aerosole daher meist beschränkt auf die Region, in der die Änderung erfolgt und tragen entweder zur Erwärmung oder Abkühlung bei.



Austausch klimarelevanter Gase zwischen Landoberfläche und Atmosphäre.

Links: Ursprüngliche, unverfälschte Landschaften zeigen im allgemeinen keine (oder nur geringe) Netto- $\text{CO}_2$ -Aufnahmen bzw. -Verluste. Die photosynthetische Kohlenstoffaufnahme und Kohlenstoffverluste durch (beispielsweise) Atmung und Verbrennung befinden sich im Gleichgewicht. Kleine Mengen der Treibhausgase Methan und Stickstoffoxid stammen insbesondere aus Feuchtgebieten und Savannen. Von der Landoberfläche wird im Vergleich zu den landwirtschaftlich genutzten Flächen mehr Sonnenlicht absorbiert, und es wird mehr der durch diese Absorption erzeugten Energie zum Transport von Wasserdampf verwendet.

Oben: In einer durch den Menschen genutzten Landschaft wird  $\text{CO}_2$  durch Landnutzungsänderungen ausgestoßen. Der Ausstoß von Methan verursacht durch Reisanbau und Viehzucht und von Stickstoffoxid verursacht durch Düngemittel ist bei weitem höher als die Emission dieser Treibhausgase in natürlichen Ökosystemen. Von der Landoberfläche wird im Vergleich zu natürlichen Ökosystemen weniger Sonnenlicht absorbiert, und es wird häufig mehr der durch diese Absorption erzeugten Energie zur Erwärmung der Landoberfläche verwendet.



Sollen alle Auswirkungen vergangener, gegenwärtiger und zukünftiger Landnutzungsänderungen auf das Klima verstanden werden, so stellen die zahlreichen erörterten klimabezogenen Aspekte der Landnutzungsänderung und die Tatsache, dass sie über verschiedene Zeit- (Tage bis Jahrhunderte) und Raumskalen (regional bis global) wirken, eine große Herausforderung dar. Darüber hinaus werden Emissionen und biophysikalische Vorgänge nicht nur durch die Art und Weise der Landnutzung, sondern viel mehr vom Klimawandel selbst und dessen Rückkopplungen bestimmt: Wärmere Temperaturen fördern die zugrundeliegenden biologischen und chemischen Prozesse. Dies wiederum fördert Emissionen und biophysikalische Prozesse.

Beeinflusst der Klimawandel jedoch umgekehrt auch die Landnutzung oder Landnutzungsänderung? Eindeutig ja: In allen Regionen ist das Klima eine wichtige Determinante für die Art der jeweils angebauten Nahrungsmittel oder Nutzhölzer. Es bestimmt die verfügbare Bewässerungsmenge und übt etwa durch Dürre, Frost und Überschwemmung einen Einfluss auf Erträge aus. Der Klimawandel beeinflusst Ernten somit sowohl lokal als auch regional in positiver oder negativer Weise und ist damit ein Faktor, der die Art der Kultivierung durch

den Menschen mitbestimmt. Trotz dieser Tatsachen ist aber unser Klima nur ein Aspekt der menschlichen Entscheidungen, und auch andere Faktoren, wie der wirtschaftliche, soziale und politische Wandel, sind für das Verständnis der Landnutzungsänderung von fundamentaler Bedeutung.



## Landnutzungsänderung und internationale Klimapolitik

Joanna House & Annalisa Savaresi

Strategien und Entscheidungen zur Art und Weise der Bewirtschaftung von Land haben einen Einfluss auf die Emission von Treibhausgasen. Die international verfolgte Linie im Hinblick auf die Messung und Handhabung des Ausstoßes von Treibhausgasen durch die Landwirtschaft hat sich allmählich etabliert. Fast alle Staaten der Welt haben der 1992 verabschiedeten United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) zugestimmt und sind damit aufgefordert,

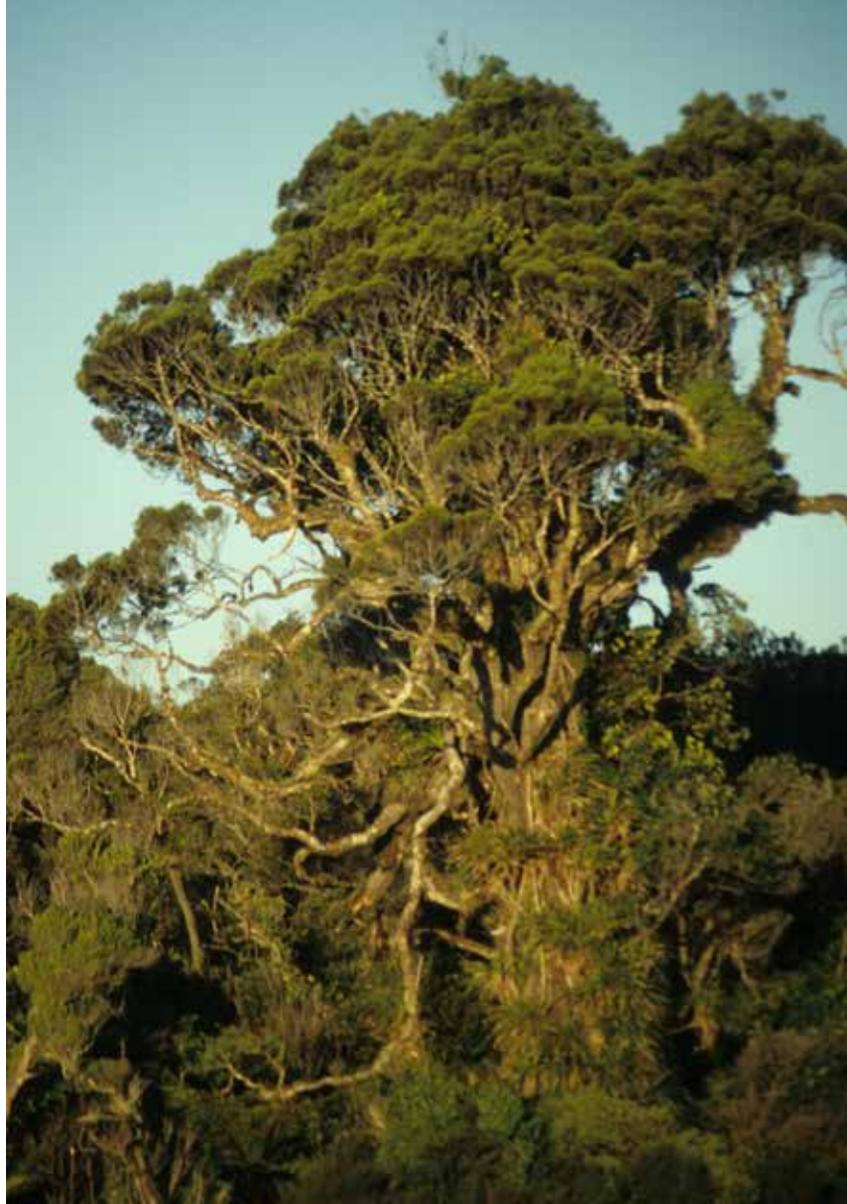
- nationale Strategien zur Begrenzung des anthropogenen Ausstoßes von Treibhausgasen anzuwenden und die Speicherung von Treibhausgasen in Treibhausgasenken und –speichern zu schützen, zu erhalten und zu erweitern.
- mittels der vereinbarten Methoden regelmäßig nationale Bestandsaufnahmen der Treibhausgasemissionen und –senken zu veröffentlichen.

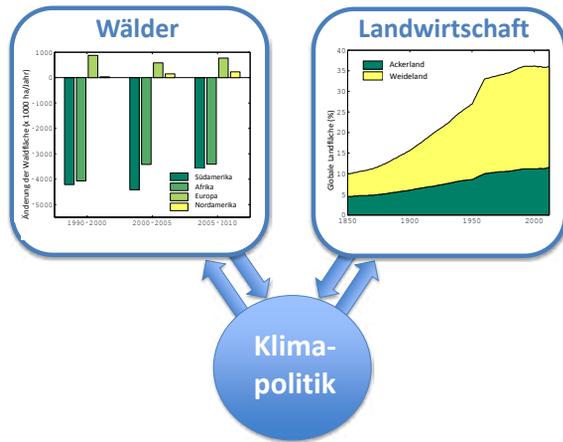
Der Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) bezieht sich u. a. auf Treibhausgasemissionen und -speicherungen im Zusammenhang mit der Umwandlung von Landnutzungskategorien (etwa der Umwandlung von forstwirtschaftlich in landwirtschaftlich genutzte Flächen oder der Umwandlung von Feuchtgebieten in Siedlungen) und als Ergebnis von Maßnahmen auf bewirtschaftetem Land innerhalb einer Kategorie. Die LULUCF-Definitionen und –Verfahren im internationalen Klimarecht sind das Ergebnis eines langen und komplexen Prozesses mit den besonders schwierigen Problemen (a) des Umgangs mit der Permanenz (ein neu aufgeforsteter oder bestehender Wald kann beispielsweise durch zukünftiges menschliches Handeln, Umweltveränderungen, Krankheiten oder Brände gefährdet werden) und (b) des Umgangs mit Verlagerungen (das Bewahren oder Aufforsten eines Waldes an einem Ort kann beispielsweise indirekt zur Rodung eines Waldes für landwirtschaftliche Zwecke an einem anderen Ort führen).

Schwierigkeiten liegen ferner in der Tatsache begründet, dass in manchen Ländern, etwa in Australien und Neuseeland, der LULUCF-Bereich eine große Treibhausgasquelle infolge intensiver Viehhaltung und der damit verbundenen Methanemissionen

(siehe Kapitel 1) darstellt. Im Vergleich dazu finden sich in anderen Ländern Treibhausgasenken, etwa dann, wenn, wie in vielen EU-Mitgliedstaaten, landwirtschaftliche Flächen in Wald zurückverwandelt werden oder wenn, wie beispielsweise in Brasilien, ein großes Potential besteht, Abholzung in Zukunft zu vermeiden.

Die meisten UNFCCC-Teilnehmerstaaten haben darüber hinaus 1997 das Kyoto-Protokoll mit rechtlich verbindlichen Klimazielen für einige der entwickelten Länder für den Zeitraum 2008 bis 2012 unterzeichnet. Neue Klimaziele einer etwas kleineren Gruppe entwickelter Länder folgten nach langwierigen Verhandlungen für den Zeitraum 2013 bis 2020. Unter dem Kyoto-Protokoll können die entwickelten Länder LULUCF-Aktivitäten zur Erreichung ihrer Ziele nutzen. Während es verpflichtend ist, Emissionen und Senken von Treibhausgasen durch Aufforstung, Wiederaufforstung, Abholzung und Waldbewirtschaftung auszuweisen, ist es den Ländern freigestellt, für andere bodengebundene Emissionen, etwa die von Ackerland, Weideland und Feuchtgebieten, Rechenschaft abzulegen.





Landnutzungsänderungen tragen zum Klimawandel bei und haben somit einen Einfluss auf die Klimapolitik. Die Landnutzung kann jedoch auch Möglichkeiten bieten, den Klimawandel mittels passender Strategien abzuschwächen.

Oben links: Entwicklung der bewaldeten Fläche (in 1000 ha/Jahr) ausgewählter Regionen (Quelle: Forest Resources Assessment 2010). Während die tropischen Wälder immer noch starker Abholzung unterliegen, expandiert die Waldfläche in einigen Gebieten Europas und Nordamerikas, etwa infolge der Aufgabe landwirtschaftlicher Flächen.

Oben rechts: Anteil der weltweit landwirtschaftlich oder als Weideland genutzten Landfläche (Klein Goldewijk et al. 2011, Glob. Ecol. Biogeogr. 20, 73-86). Die Umwandlung von natürlichem in landwirtschaftlich genutztes Land hat historisch betrachtet sehr stark zugenommen, zeigt aber in den vergangenen Jahrzehnten eine abnehmende Tendenz.

Ebenso wie die entwickelten Länder können sich auch die Entwicklungsländer an Emissionsminderungsmaßnahmen in der Landwirtschaft beteiligen. Unter dem Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism – CDM) können in Entwicklungsländern einige LULUCF-Aktivitäten (begrenzt auf Aufforstung und Wiederaufforstung) mit Hilfe von finanzieller Unterstützung durch entwickelte Länder durchgeführt werden. Die für die Reduktion der Treibhausgasemissionen ausgestellten Gutschriften können dann von den entwickelten Ländern verwendet werden. Ferner haben die Entwicklungsländer unter dem Mechanismus REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation including conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks/Reduktion von Emissionen aus Entwaldung und Waldschädigung sowie die Rolle des Waldschutzes, der nachhaltigen Waldbewirtschaftung und des Ausbaus des Kohlenstoffspeichers Wald in Entwicklungsländern) seit kurzem Zugang zu finanziellen Mitteln für die Aufforstung, Wiederaufforstung, die Verhinderung von Abholzung und die Waldbewirtschaftung.

Viele Entwicklungsländer haben sich darüber hinaus zur freiwilligen Reduktion von Emissionen im LU-LUCF-Bereich verpflichtet:

- Brasilien will seine Emissionen bis 2020 um ca. ein Drittel gegenüber den Business-as-usual-Emissionen reduzieren. Die Abholzung in der Amazonas-Region soll dabei im Vergleich zum Jahr 2005 um 80 % verringert werden.
- China hat sich dazu verpflichtet, bis 2020 seine Waldfläche um 40 Millionen Hektar und das Waldbestandsvolumen um 1,3 Milliarden Kubikmeter im Vergleich zu 2005 zu vergrößern.
- Indonesien möchte seine Emissionen bis 2020 um 26 bis 41 % im Vergleich zu den Business-as-usual-Emissionen verringern. Gegenwärtig werden ca. 80 % der Gesamtemissionen Indonesiens durch die Abholzung von Wald und durch Torffeuere verursacht.
- Mexiko plant, seine Emissionen bis 2020 um 30 % gegenüber den Business-as-usual-Emissionen u. a. durch REDD+-Programme und Aufforstung zu verringern.

Die neue Vereinbarung kann einen dedizierten REDD+-Mechanismus sowie neue Regeln zur Landnutzungsänderung und für einige Entwicklungsländer eventuell sogar rechtlich verbindliche Verpflichtungen zur Reduktion von Emissionen aus LULUCF-Aktivitäten beinhalten.



## Analyse der Wechselwirkung zwischen Landnutzungsänderung und Klimawandel: Modelle und Verfahren

Nathalie de Noblet-Ducoudré

Das Messen der Auswirkungen der Landnutzungsänderung auf die Atmosphäre (und das Klima) in Bezug auf den Treibhausgasgehalt, andere für die Landnutzungsänderung relevante Stoffe sowie Temperatur und Wasser stellt eine Herausforderung dar. Eine denkbare Option besteht in der Durchführung der Messungen an zwei Versuchsstandorten mit zunächst gleicher Wettersituation. Durch Erzeugen von Landnutzungsänderungen an einem der beiden Standorte können die entsprechenden Situationen im „ursprünglichen“ und „gestörten“ Gebiet miteinander verglichen werden. In der Praxis ist es allerdings äußerst schwierig, Standorte zu finden, die für solche kontrollierten Versuche geeignet sind. Da Veränderungen des atmosphärischen Zustands und/oder der Beschaffenheit des gestörten Standorts eventuell auch zu Veränderungen in der Atmosphärenbewegung (und somit zu Veränderungen des Wetters) führen, die dann wiederum den natürlichen ursprünglichen Standort beeinflussen würden,

reichen lokale Änderungen aber möglicherweise nicht aus. Die Schwierigkeit (oder gar Unmöglichkeit) des lokalen Messens klimatischer Einflüsse auf die Landnutzungsänderung hat zur Entwicklung verschiedener Modelle geführt. Mathematisch gesehen repräsentieren diese Modelle unser Wissen über die relevanten Faktoren und befähigen uns, die Unterschiede zwischen zwei voneinander abweichenden Situationen miteinander zu vergleichen und die zukünftigen (oder vergangenen) Wechselwirkungen zwischen Landnutzungsänderungen und Klimawandel zu untersuchen.

Zur vollständigen Erklärung dieser Wechselwirkungen werden drei Modelle benötigt, die insofern miteinander in Beziehung stehen als eine von einem der Modelle erzeugte Information in der Folge jeweils von den übrigen der Modelle verwendet wird.

- **Das globale Klimamodell** berechnet den Austausch von Wärme, Energie, Wasser, Treibhausgasen und anderen chemischen Verbindungen zwischen den terrestrischen und ozeanischen Biosphären und der Atmosphäre, die Wasserströme von den Kontinenten zu den

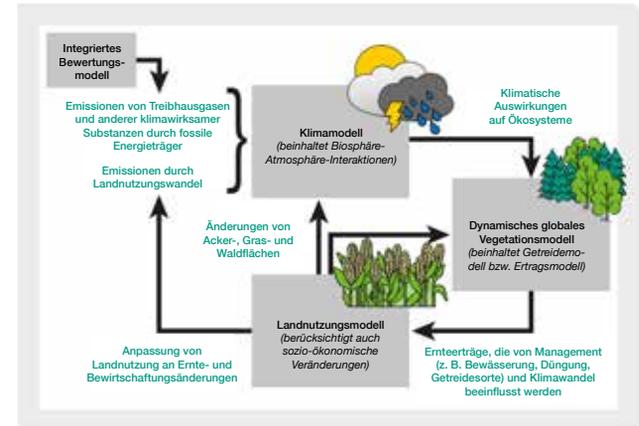
Ozeanen, die atmosphärischen Windströmungen und ozeanischen Strömungen und den chemischen/physikalischen/thermischen Zustand der Atmosphäre. Zur Berechnung des Klimawandels im Zeitablauf, etwa als Antwort auf menschliche Aktivitäten wie die Verbrennung fossiler Brennstoffe, werden a) atmosphärische Konzentrationen von Treibhausgasen und Aerosolen sowohl aus natürlichen als auch aus anthropogenen Quellen und b) Daten zur geographischen Verteilung von Landökosystemen und Informationen bezüglich ihrer Nutzung (Bewässerung ja oder nein, Ernte ja oder nein, etc.) in das Klimamodell eingegeben. Landnutzungsänderungen dienen als Input in das Klimamodell, das dann die durch die Landnutzungsänderungen verursachten Klimaveränderungen (tägliche und saisonale Schwankungen von Temperatur, Niederschlag, Wind, etc.) als Output erzeugt.

- **Das dynamische globale Vegetationsmodell (DGVM)** ahmt die Funktionsweise der terrestrischen Biosphäre nach. Es bindet die Darstellung natürlicher und bewirtschafteter Ökosysteme ein und berechnet den Lebenszyklus der Biosphäre: Photosynthese der Pflanzen, Atmung, Pflanzenwachstum und Kon-

kurrenz um Wasser, Sonnenlicht und Stickstoff. Bezogen auf geographische Standorte mit bewirtschafteten Ökosystemen können Dünger und Bewässerung angewendet und jährliche Ernteerträge berechnet werden. Zum Simulieren der Biosphäre benötigt das DGVM eine gewisse Anzahl atmosphärischer Variablen aus dem Klimamodell (z. B. Strahlung, Lufttemperatur und Feuchtigkeit, CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, Regen, Wind). Das Klimamodell stellt Änderungen der Landnutzungsänderung als Input bereit für das DGVM.

- **Das Landnutzungsmodell (LUM)** untersucht die Art und Weise der land- und weidewirtschaftlichen Nutzung der Erde durch den Menschen. Landnutzungsänderungsmodelle berücksichtigen sowohl Veränderungen der Bevölkerungsdichte und Einkommenshöhen als auch Einschätzungen zur Entwicklung der Technik und den Lebensstil der Menschen (etwa bestimmte Ernährungsvorlieben). Eine Darstellung allgemeiner wirtschaftlicher Grundsätze wird gekoppelt mit gesellschaftlichen und natürlichen Systembeschränkungen (z. B. den laut der DGVMs in einer bestimmten Region aufgrund

des lokalen Klimas und der lokalen Böden erzielbaren Ernteerträgen). LUMs erfordern darüber hinaus Informationen über die voraussichtliche Entwicklung menschlicher Gesellschaften (siehe Kapitel 4) und simulieren die von den beschriebenen Klima- und Vegetationsmodellen benötigten Daten zu Veränderungen in der Landnutzung. Derzeit werden zur Bereitstellung der erforderlichen Landnutzungsänderungsprojektionen im entworfenen Modellrahmen (Kapitel 4) integrierte Bewertungsmodelle (Integrated Assessment Models – IAM) verwendet. Alternative LUM-Ansätze zur detaillierteren Berücksichtigung der zu Landnutzungsänderungen führenden menschlichen Entscheidungen werden jedoch ebenfalls entwickelt.



Die Abbildung zeigt den Informationsfluss zwischen den verschiedenen Teilmodellen zur Bewertung der Wechselwirkung zwischen Landnutzungsänderung und Klimawandel. Der grün dargestellte Text fasst die von den einzelnen Modellen erzeugten Informationen zusammen. Die schwarzen Pfeile zeigen die Richtung des Informationsflusses zwischen den Modellen an.

LUM-simulierte Landnutzungsänderungen beeinflussen das Klima u. a. durch Änderungen des Treibhausgasausstoßes oder Änderungen der Oberflächeneigenschaften, etwa der Albedo (siehe Kapitel 1). Das Klimamodell berücksichtigt diese Vorgänge ebenso wie das Klima selbst, d. h. den Einfluss von Wasser, Energie und Wärme an der Grenzfläche zwischen Biosphäre und Atmosphäre.

## Sinn und Zweck sozioökonomischer Emissionsszenarien

Detlef van Vuuren & Elke Stehfest & Alexander Popp

In Anbetracht der dem Klimasystem innewohnenden Trägheit kommt der Bewertung der potentiellen Langzeitkonsequenzen heutiger Entscheidungen eine große Bedeutung zu. Es wurde eine Szenarioanalyse als Instrument für die Untersuchung und Bewertung der mit den möglichen zukünftigen Entwicklungen verbundenen großen Unsicherheiten entwickelt. Die entsprechenden Szenarien können Annahmen zum Wachstum der Bevölkerung, zur wirtschaftlichen und technologischen Entwicklung und zu Handelsstrukturen miteinander verknüpfen.

Die vergangenen Jahre haben den Bedarf an unter Beteiligung der verschiedenen mit der Erforschung des Klimawandels befassten Communities entwickelten Szenarien verdeutlicht. Mittels solcher Szenarien kann die Forschung zum Verständnis des Klimasystems, der Einflüsse des Klimawandels, der Anpassungsprozesse, der Verwundbarkeit der sozioökonomischen und ökologischen Systeme sowie der zukünftigen anthropogenen Treibhausgasemissionen und Optionen zu deren Vermeidung

beitragen. Die sich aus diesen Szenarien ergebenden Emissionen werden u. a. in den in Kapitel 3 vorgestellten Modellen verwendet. Die Szenarien bewegen sich derzeit im Umfeld zweier wichtiger Größen: Die repräsentativen Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways - RCPs) beschreiben eine Reihe möglicher Emissionswege, deren jeder zu einem spezifischen Strahlungsantrieb führt, welcher wiederum das Ausmaß und die damit verbundenen Auswirkungen des Klimawandels bestimmt. Die möglichen zukünftigen sozioökonomischen Bedingungen, die mit einzelnen dieser RCPs übereinstimmen, werden dann in den gemeinsamen sozioökonomischen Pfaden (Shared Socio-economic Pathways - SSPs) beschrieben.

Die Landnutzung spielt innerhalb dieser Szenarien eine Schlüsselrolle. Die SSPs liefern fünf mögliche zukünftige sozioökonomische Entwicklungen einschließlich denkbarer Trends in der Landwirtschaft und Landnutzung. Die beschriebenen SSPs könnten beispielsweise zukünftige Investitionen in Umwelttechnologien, ein moderates Bevölkerungswachstum, hohe Bildungsstandards sowie eine geringere wirtschaftliche Ungleichheit beschreiben oder auch einem Zukunftspfad folgen, der sich kaum von dem der Vergangenheit unterscheidet

und ein anhaltendes Bevölkerungswachstum und den Verbrauch fossiler Brennstoffe mit einbezieht. Auf sämtliche SSPs können Klimastrategien zur Verringerung der Emissionen und zum Erreichen von mit den beschriebenen RCP-Szenarien übereinstimmenden Konzentrationen angewendet werden. Hier nehmen landnutzungsbezogene Strategien einschließlich etwa der Nutzung von Bioenergie, der Durchführung forstwirtschaftlicher Maßnahmen und der Verringerung der Nicht-CO<sub>2</sub>-Treibhausgase aus der Landwirtschaft eine wichtige Stellung ein.

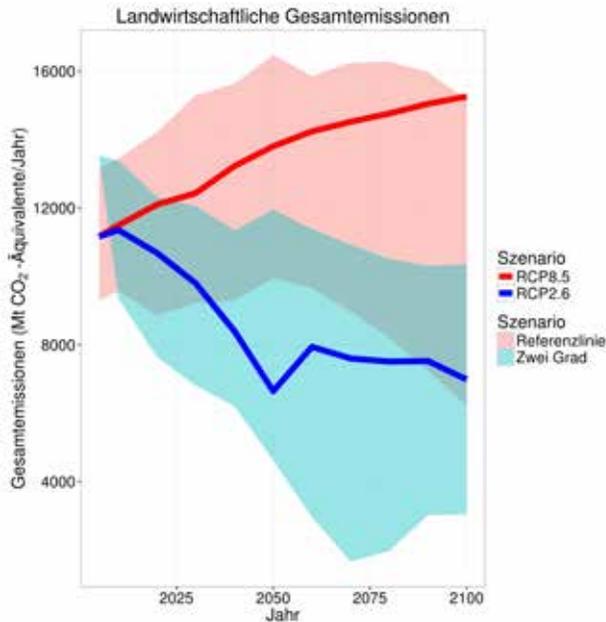
### **Welche Modelle werden zur Entwicklung von RCPs und SSPs verwendet?**

Zukünftige Emissionen unterliegen komplexen Wechselwirkungen zwischen diversen sozioökonomischen Faktoren einschließlich der Bevölkerungsdynamik, der wirtschaftlichen Entwicklung, des technologischen Wandels sowie kultureller und institutioneller Veränderungen und Strategien.

Mit dem Hauptgewicht auf Energiesystemen, landwirtschaftlichen Systemen und Landnutzungssystemen sowie den damit verbundenen Emissionen wurden für diese Einflussfaktoren die sogenannten integrierten Bewertungsmodelle (siehe Kapitel 3) als einheitliche Bezugsstrukturen zur Untersuchung möglicher zukünftiger Pfade entwickelt.

### **Ungewisse Zukunft der Landnutzung**

Einige Studien haben sich in der Vergangenheit mit der möglichen Zukunft der Landnutzung beschäftigt. Die Mehrheit der diesbezüglichen Ansätze zeigt ein weiteres langsames Wachstum der Landnutzung und Landwirtschaft innerhalb der kommenden Jahrzehnte. Dies liegt darin begründet, dass der erhöhte Bedarf an Lebens- und Futtermitteln den gleichzeitig erwarteten Anstieg der landwirtschaftlichen Erträge überholt.



Das Diagramm veranschaulicht die weltweiten LUC-Emissionen (in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) der in der AR5 IPCC-Datenbank enthaltenen Szenarien für den Fall eines Basisszenarios („Business as usual“) im Vergleich zu einem Szenario mit Zwei-Grad-Ziel (die rot und grün schraffierten Bereiche stehen für IAM-Outputs, die die Szenarien repräsentieren). Die entsprechenden RCPs (RCP8.5 und RCP2.6) sind als Linien dargestellt. Die Verringerung der landnutzungsbezogenen Emissionen kann ein Beitrag zur Klimapolitik, beispielsweise zur Erreichung des Zwei-Grad-Ziels, sein. Allerdings ist klar, dass Emissionen nicht auf null reduziert werden können (Daten basierend auf der IPSS AR5-WG3-Szenario-Datenbank und RCP-Szenarien).

Das Ausmaß vermehrter Landnutzung ist abhängig von unsicheren Trends in Bezug auf das Wachstum der Bevölkerung, Veränderungen der Ernährung, die mögliche Nachfrage nach Non-Food-Produkten, z. B. nach Bioenergie, und die zukünftige Entwicklung landwirtschaftlicher Erträge (die wiederum von technologischen Faktoren und Umwelteinflüssen wie dem Klimawandel bestimmt werden). Im Laufe der Zeit können diese Unsicherheiten zu sehr unterschiedlichen Landnutzungsänderungsmustern führen.

Während viele Szenarien in Abwesenheit klimapolitischer Maßnahmen in der Tat eine Stabilisierung der Landnutzung zeigen, kann die zukünftige Nachfrage nach Bioenergie bei Anwendung solcher Maßnahmen (siehe Kapitel 2) weitere fruchtbare landwirtschaftliche Nutzfläche fordern. Dies wiederum kann zu einem weiteren Verlust natürlicher Flächen aber auch zu höheren landwirtschaftlichen Erträgen als Antwort auf die Landknappheit führen.

Ebenso unsicher sind offenbar die Einflüsse des Klimas. Während die biochemischen Einflüsse der Landnutzungsänderung in den vergangenen Jahren in verschiedenen Szenarien mittels modellbasierter Studien untersucht wurden, sind die genauen Veränderungen im Kohlenstoffzyklus der Erde immer noch unbekannt.

Darüber hinaus wenig untersucht sind die biophysikalischen Einflüsse zukünftiger Landnutzungsänderungen, etwa auf die Absorption und Reflexion von Licht (siehe Kapitel 1 und 3). Diese Einflüsse können auf lokaler Ebene bedeutend sein. Die Kopplung von IAM-Modellen, biophysikalischen Mo-

dellen (z. B. DGVMs) und Klimamodellen nach dem Vorbild von LUC4C erlaubt es, die relevanten Beziehungen zwischen Landnutzung und Klimawandel auf einzigartige Weise zu erforschen.





## Die Vernetzung zwischen Nahrungsmittelproduktion, Klima und Gesellschaft

Thomas Pugh

Alle Organismen verändern das sie umgebende Umfeld und passen es so an ihre Bedürfnisse an. Seit den Anfängen der Landwirtschaft vor ca. 10.000 Jahren hat der Mensch jedoch eben diese Anpassung verhältnismäßig tiefgreifend betrieben. Landwirtschaftliche Systeme können sich deutlich von den durch sie ersetzten Ökosystemen unterscheiden: Im Extremfall treten ausgedehnte Monokulturen an die Stelle artenreicher Wälder. Wie bereits beschrieben, werden 12 % der Landfläche weltweit landwirtschaftlich und weitere 25 % weidewirtschaftlich genutzt. Der Mensch nutzt heute insgesamt etwa 25 % der von den Pflanzen aufgenommenen Sonnenenergie.

Die zur Versorgung menschlicher Gesellschaften benötigte landwirtschaftliche Nutzfläche ist abhängig von der die Versorgung beanspruchenden menschlichen Bevölkerung, deren bevorzugter Ernährung und der Produktivität der Anbauflächen. Mit dem dramatischen Anwachsen der Weltbevölkerung

im Verlauf der vergangenen 500 Jahre hat sich die landwirtschaftlich genutzte Fläche immer weiter ausgedehnt. In der jüngsten Vergangenheit allerdings haben moderne landwirtschaftliche Verfahren wie Düngung, Mechanisierung, Züchtung ertragreicherer Getreidesorten und Schädlingsbekämpfung zur Deckung eines Großteils des enormen Mehrbedarfes beigetragen. Viele Prognosen zur Ernährung der Weltbevölkerung im 21. Jahrhundert (siehe Kapitel 4) basieren auf der Vorstellung, dass sich der technische Fortschritt mit der gleichen Geschwindigkeit wie in den vergangenen fünfzig Jahren weiterentwickelt oder dass überall dort (häufig in Entwicklungsländern), wo noch keine effektive Umsetzung des Fortschritts erfolgen konnte, hohe Steigerungen der landwirtschaftlichen Produktion durch entsprechenden Technologietransfer realisiert werden können. Allerdings ist bei weitem noch nicht klar, ob die getroffenen Vorhersagen und ihre zugrundeliegenden Annahmen realistisch sind.

Temperaturanstiege oder Niederschlagsveränderungen infolge des Klimawandels können einen tiefgreifenden Einfluss auf das Pflanzenwachstum haben. Zusätzlich zu den bekannten Auswirkungen von Dürreperioden können Hitzewellen während der Blütezeit die Erträge ganz beträchtlich reduzieren

und extreme Ereignisse wie Überschwemmungen oder Hagelstürme, deren Intensität aufgrund des Klimawandels zunehmen wird, die Ernten zerstören. Das Zusammenwirken der genannten Faktoren kann sowohl zur Verringerung der Erträge als auch zur Verringerung der Zuverlässigkeit von Ernten beitragen. Erwartungsgemäß und wie so oft werden sich die negativen Folgen nicht gleichmäßig stark auf die Erde auswirken, sondern sich stattdessen auf tropische Regionen mit ohnehin bereits geringem Pflanzenbau konzentrieren.

Es gibt aber nicht nur schlechte Nachrichten. In der Tat ist davon auszugehen, dass die landwirtschaftlich genutzten Flächen in den meisten Regionen der mittleren Breiten als Ergebnis der die Wachstumsphasen verlängernden steigenden Temperaturen ertragreicher werden. Kohlendioxid bewirkt einen Temperaturanstieg und erhöht darüber hinaus die Geschwindigkeit der Photosynthese der Pflanzen. Möglicherweise können höhere Ernteerträge aufgrund der direkten Auswirkungen von Kohlendioxid auf das Pflanzenwachstum somit die aufgrund der Auswirkungen von Kohlendioxid auf das Klima geringer werdenden Ernteerträge ausgleichen.

Kohlendioxid verringert daneben den Wasserbedarf der Vegetation. Dies kann für wasserarme Regionen oder unter dem Einfluss des sich ändernden Klimas immer trockener werdende Regionen von großer Bedeutung sein. Die Gesamtauswirkungen des Kohlendioxids und des Klimawandels auf die Ernteerträge sind jedoch sehr ungewiss. In Versuchen zeigen sich unterschiedliche Reaktionen, und niemand kann sicher sagen, wie die Ernten sich entwickeln werden. Es bestehen ferner Fragen bezüglich des Einflusses des Kohlendioxidausstoßes auf die Qualität der Ernten. Es gibt Hinweise darauf, dass Kohlendioxid den Protein- und Mineralstoffgehalt von Pflanzen senken könnte.

Klimabedingte Veränderungen der Ernteerträge haben eindeutig einen hohen Einfluss auf den Bedarf an landwirtschaftlicher Nutzfläche und die Wahl ihrer Standorte. Angesichts der sich verringerten Erträge kann die einzige Möglichkeit zur Steigerung der Nahrungsmittelproduktion in der Expansion der Landwirtschaft oder der Verlagerung von Ackerland bestehen. Allerdings gibt es wenig ungenutzte Fläche auf diesem Planeten.

Die Verlagerung oder Erweiterung landwirtschaftlicher Nutzflächen wird sich stets auf Kosten anderer durch Ökosysteme bereitgestellter Vorgänge, z. B. der Kohlenstoffspeicherung (siehe Kapitel 1), vollziehen. Natürliche Ökosysteme speichern große Mengen an Kohlenstoff, d. h. zwei- bis dreimal so viel wie die Atmosphäre. Ungeachtet einiger Ausnahmen speichern landwirtschaftlich genutzte Flächen sowohl in den Pflanzen als auch in den Böden generell weniger Kohlenstoff als die durch sie ersetzten natürlichen Systeme. Durch die Ernte gehen Stoffe verloren, die im Boden andernfalls verbleiben würden. Zudem wird der Boden etwa durch Maßnahmen wie das Pflügen aufgebrochen.

Die Wahrscheinlichkeit der Erosion des Bodens wird so erhöht und die kohlenstoffhaltigen Substanzen werden schneller zu Kohlendioxid zersetzt. Die tatsächliche Menge an verloren gegangenem Kohlenstoff variiert je nach Klima, Bodenart, Bepflanzung und gewählter Maßnahmen. Die Verluste können beispielsweise durch eine nichtpflügende Bewirtschaftung mit Belassen der Non-Food-Kulturen auf dem Feld erheblich verringert werden.

Die genannten Auswirkungen der Landwirtschaft auf den Treibhausgasausstoß können darüber hinaus zu Rückkopplungen führen. Der Rückgang von Ernteerträgen aufgrund des Klimawandels beispielsweise kann zur Expansion von Anbauflächen führen.



Diese Expansion verringert wiederum die Speicherung von Kohlenstoff und führt zu vermehrten Emissionen anderer Treibhausgase, welche ihrerseits den Klimawandel verstärken und dadurch zu weiteren Ertragsverlusten führen. Denkbar ist auch eine gegenteilige Entwicklung. Zum Verständnis des zukünftigen landwirtschaftlichen Flächenbedarfs der Menschen ist die Kenntnis der Entwicklung des sich unter dem Einfluss des Klimawandels und der damit einhergehenden sozioökonomischen Veränderungen entwickelnden Pflanzenbaus daher von entscheidender Bedeutung. Um den Klimawandel zu verstehen, muss jedoch gleichzeitig bekannt sein, wie Nutzflächen vergrößert und verkleinert werden oder wie sich die Bewirtschaftung der Flächen in der Zukunft ändert.

Es stellt sich ferner auch die Frage, ob sozioökonomische Systeme in der Lage sind, Nahrungsmittel von den Orten optimaler Produktion hin zu Orten des größten Bedarfs zu transportieren oder ob die wirtschaftlichen Realitäten einen Kurs der landwirtschaftlichen Landnutzung abseits des theoretisch optimalen Weges diktieren werden.

Das grundsätzliche Verbinden dieser vielen menschlichen und natürlichen Systeme stellt die Forscher vor eine enorme Herausforderung. Das Entwirren dieses komplexen Bildes ist der Schlüssel zum Verstehen unserer Möglichkeiten der Anpassung an die unvermeidbaren Auswirkungen des Klimawandels und der wirkungsvollen Entschärfung der extremsten Änderungen. Ohne ein derartiges ganzheitliches Verständnis werden alle Anstrengungen zum Erhalt der Nahrungsmittelversorgung oder zur Begrenzung des Klimawandels auf ein vertretbares Maß mehr auf Glück als auf Urteilsvermögen beruhen.



## Bioenergie, Landnutzungsänderung und Klima

Almut Arneith & Kerstin Baumans

Der Begriff „Bioenergie“ bezieht sich auf die zahlreichen Arten von Biomasse zur Erzeugung von Energie in Form von Brennstoff, Elektrizität oder Wärme. Biokraftstoffe wie Ethanol, Biodiesel und Biogas werden mit Hilfe stärkereicher (z. B. Mais) oder ölhaltiger (z. B. Palmöl, Raps) Pflanzenmaterialien hergestellt. Holzbewuchs ist naturgemäß die traditionellste Form von Bioenergie, und bis vor ca. hundert Jahren stellte die zum Heizen und Kochen verwendete Biomasse die weltweit größte Energiequelle dar. Mit der intensivierten Nutzung fossiler Brennstoffe, insbesondere in der industrialisierten Welt, war der Anteil der Bioenergie drastisch zurückgegangen. Im Verlauf der vergangenen Jahre ist die Nutzung von Bioenergie jedoch durch Strategien zur Minderung des Klimawandels (siehe Kapitel 2 und 4) wieder gefördert worden. Als Folge davon ist die Produktion von Bioenergie in Regionen und Ländern wie China, der EU, den USA und Brasilien seit Beginn des 21. Jahrhunderts bis auf das Dreifache angewachsen.

Es ist schwer abzuschätzen, wie viel des gesamten weltweiten Energiebedarfs durch Energie aus Pflanzen gedeckt werden könnte. Bis 2050 könnten optimistisch geschätzt bis zu 400 Exajoule (EJ) pro Jahr erzielt werden. Dieser für die meisten Menschen relativ nichtssagende Wert entspricht einer Energieversorgung biologischen Ursprungs von mindestens zwei Dritteln der gegenwärtigen jährlichen weltweiten Primärenergieerzeugung. Andere Schätzungen allerdings sprechen von einem wesentlich geringeren Wert (ca. 100 EJ pro Jahr). Dieser großen Spannweite liegen Unsicherheiten in Bezug auf die erreichbare Energiemenge aus Biomasse zugrunde. Sie sind abhängig von den Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Pflanzenproduktivität, zur Effizienz der Umwandlung von Pflanzenmaterial in verschiedene Brennstoffarten und zur für die Produktion von Biomasse zur Verfügung stehenden Fläche.

Die Förderung der Bioenergieerzeugung zur Milderung des Klimawandels beruht auf der Vorstellung eines geschlossenen Kreislaufs. Einzig der während des Pflanzenwachstums aufgenommene Kohlenstoff wird während des Umwandlungs- und Verbrennungsvorgangs freigesetzt. Allerdings jedoch sollte bei der Untersuchung des Klimaeffekts von Bioener-

gie in Betracht gezogen werden, wie viel Energie zur Umwandlung von Pflanzenmaterial in flüssige oder gasförmige Energieformen oder Aerosolpartikel als Nebenprodukt der Verbrennung benötigt wird. Bedenklich ist, dass  $N_2O$ -Emissionen aus Stickstoffdüngern, insbesondere von intensiv bewirtschafteten Feldern mit Biokraftstoffpflanzen wie Zuckerrohr oder Mais, die Bilanz der Treibhausgase aus Bioenergie offenbar mehr als ursprünglich angenommen beeinträchtigen.

Es bestehen zudem Bedenken darüber, dass die Produktion von Bioenergie, insbesondere von Biokraftstoffen aus stärke- und zuckerhaltigen Pflanzen, direkt mit der Produktion von Nahrungsmitteln konkurrieren und somit zu hohen Lebensmittelpreisen beitragen und die Umwandlung natürlicher Flächen beschleunigen könnte.

Gemäß einer Studie zur Feststellung der zum Anbau von Biomasse für Biokraftstoff oder zur Erzeugung von Strom benötigten Flächen haben strombetriebene Fahrzeuge auf die gleiche Fläche bezogen durchschnittlich eine 80 Prozent höhere Fahrleistung als mit flüssigen Biokraftstoffen betriebene Fahrzeuge. Entstehen für die Nahrungsmittelproduktion neue Flächen als Ausgleich für den verringerten Ertrag

anderer Flächen, kann die verstärkte Nutzung von Bioenergie aus gezielt kultivierten Biomassepflanzen zu Landnutzungsänderungen einschließlich sogenannter indirekter Landnutzungsänderungen führen.

Sowohl direkte als auch indirekte Landnutzungsänderungen können den Verlust des in der ursprünglichen Vegetation und den ursprünglichen Böden gespeicherten Kohlenstoffs zur Folge haben. Dies steht den durch die Verbrennung von Bioenergie anstelle von fossiler Energie eingesparten  $CO_2$ -Emissionen entgegen. Dieser Effekt hängt entscheidend ab von der Art des umgewandelten Ökosystems und der Effizienz der Nutzung von Pflanzenbiomasse für die Energieproduktion.

Die negativen Auswirkungen können durch die Nutzung von Abfallprodukten anstelle von gezielt kultivierten Energiepflanzen drastisch verringert werden. Bei umsichtiger Durchführung können Bioenergie- und Nahrungsmittelproduktion erfolgreich gleichzeitig betrieben werden und für die ländliche Entwicklung und die Einkommen im ländlichen Raum von Vorteil sein.

## Über die Anpassung von Land- und Forstwirtschaft an den Klimawandel

Mark Rounsevell

Seit Erbringen der ersten wissenschaftlichen Beweise für den Klimawandel liegt der politische Schwerpunkt auf der Verringerung der Treibhausgasemissionen und damit auf der Entschärfung des Problems (siehe Kapitel 2). Gleichzeitig wird zunehmend klar, dass die Welt dem Klimawandel bereits zu einem gewissen Grad ausgeliefert ist, dass die Auswirkungen des Klimawandels verstanden und Anpassungen an die Auswirkungen geplant werden müssen. Es gibt viele Möglichkeiten der Anpassung des Einzelnen und der Gesellschaft an den Klimawandel. Einige dieser Möglichkeiten sind mit Chancen und vielfachen Vorteilen verbunden.

Landwirte und landwirtschaftliche Betriebsleiter können sich verschiedener Maßnahmen zur Anpassung an das sich verändernde Klima bedienen. So kann beispielsweise verstärkt auf hitzeresistentere Pflanzenarten oder andere, besser mit dem sich ändernden Wettergeschehen übereinstimmende Saat- und Erntezeiten umgestellt werden. Auch ist

es möglich, durch Landnutzungsänderung die Anbauart selbst zu ändern (etwa von Weide- zu Ackerwirtschaft zu wechseln). Darüber hinaus können die mit einem unbeständigeren Klima verbundenen Risiken durch die Diversifizierung der Arten und Mengen kultivierter Pflanzen minimiert und somit durch Bereitstellung vielfältigerer Lebensräume für natürliche Arten potentielle Vorteile erzielt werden. Eine Anpassung an wärmere und trockenere Bedingungen kann zudem durch den Einsatz von Bewässerungssystemen, insbesondere auch durch Wasserspeicherung auf den Flächen und Höfen vor Ort, erreicht werden. Hierdurch werden die durch Fluss- und Grundwasserentnahme hervorgerufenen Auswirkungen auf das hydrologische System weitgehend minimiert. In der Tat können wärmere Klimabedingungen in manchen Fällen sogar bessere Erfolge bringen, etwa durch die Steigerung des Potentials für den Weinbau und die Weinherstellung und den Anbau anderer Früchte in höheren Breiten.

Auch für Forstwirte bieten wärmere Temperaturen in höheren Breiten die Möglichkeit des Anpflanzens einer größeren Vielfalt von Baumarten. Voraussetzung hierfür ist das rechtzeitige Erkennen eines solchen Bedarfs, denn Bäume haben entsprechend dem Fortschreiten des Klimawandels in der Zukunft

sehr lange Rotationszeiten. In Naturgebieten können Tiere bei der Anpassung durch Translokation, d. h. dadurch unterstützt werden, dass weniger mobile Arten an einen anderen, geeigneteren Ort verbracht werden.

Naturmanager können die Zusammengehörigkeit bestehender Naturschutzgebiete durch die Entwicklung ökologischer Korridore („grüne Infrastruktur“) verbessern. Überschwemmungen gehören zu den bedeutendsten potentiellen Auswirkungen des Klimawandels. Wiederhergestellte natürliche Feuchtgebiete können jedoch durch ihre Wirkung als Puffer gegen überschüssiges Wasser sowohl einen Schutz gegen zukünftige klimaverursachte Überschwemmungsereignisse als auch einen Lebensraum für Tiere der Feuchtgebiete, etwa Zugvögel, bieten. Eine solche Win-Win-Situation kann sowohl an Flussufern als auch an Küsten immer dort verwirklicht werden, wo die Neuausrichtung von Küstenlinien durch Rückverlegung durch das Entfernen von Strandmauern und die Nutzung salztoleranter Wiesenvegetation als natürliche Barriere gegen Überschwemmungen und den Anstieg des Meeresspiegels gegeben ist.

Alle oben genannten Beispiele der Anpassung be-

ruhen auf Aktionen von Einzelpersonen oder deren Gemeinschaften, die den potentiellen Auswirkungen des Klimawandels mit geeigneten Strategien begegnen. Die Implementierung der entsprechenden Maßnahmen erfordert neben gewissen Kenntnissen zu den Auswirkungen des Klimawandels auch den Willen und die Bereitschaft, sich mit langfristigen Raumnutzungsstrategien zum Vorteil aller auseinanderzusetzen.



## Nachhaltige Landnutzung: Elinor Ostroms Alternative

Mechtild Agreiter

„Der Weg, den wir seit langem eingeschlagen haben, ist trügerisch bequem, eine glatte moderne Autobahn, auf der wir mit großer Geschwindigkeit vorankommen. Doch an ihrem Ende liegt Unheil. Der andere Weg, der abzweigt, ist weniger befahren, doch er bietet uns die letzte und einzige Möglichkeit, ein Ziel zu erreichen, das die Erhaltung unserer Erde sichert.“

So schreibt Rachel Carson 1962 in ihrem Buch *Der stumme Frühling*. Sie betonte damals schon, dass „man von uns verlangt, uns sinnlosen und furchtbaren Gefahren auszusetzen.“ Rachel Carson ist der Ansicht, dass wir selbst sehen müssen, welche anderen Wege für uns möglich sind. Was könnte dies in Bezug auf Landnutzung und Klimawandel bedeuten?

Heutige Landnutzung und das sich zu schnell wandelnde Klima stellt uns vor Herausforderungen, denen wir oft mit technischen Neuerungen zu begegnen versuchen. Dabei scheint dies nur eine Frage der Naturwissenschaften zu sein und hat

wenig oder nichts mit menschlichen Werten und Ethik und somit gesellschaftlichen Veränderungen zu tun. Dass technische Lösungen alleine jedoch nicht reichen, sondern auch geänderte gesellschaftliche Handlungsweisen von Nöten sind, hat Elinor Ostrom in eindrucksvoller Weise bewiesen. Dabei sieht sie neben Verstaatlichung und Privatisierung eine dritte Möglichkeit: sie zeigte, dass kooperatives Verhalten möglich ist, auch in komplexen Systemen. 2009 erhielt sie für ihre Forschungen zur nachhaltigen Nutzung von Gemeingütern als erste Frau den Wirtschaftsnobelpreis. Ihr Verdienst war der Beweis dafür, dass Gemeingüter nicht zwangsläufig ökonomisch und ökologisch destruktiv genutzt werden müssen. In vielen Studien zeigte Ostrom, dass die Beteiligten Regeln für eine gemeinsame, nachhaltige Nutzung finden können.

Ostrom nennt acht Design-Prinzipien, die eine Art Anleitung zur nachhaltigen Nutzung von Gemeingütern, also z. B. von Land und Klima, darstellen können.

## **Elinor Ostroms Design-Prinzipien erfolgreicher, nachhaltiger Nutzung von Gemeingütern:**

1. Abgrenzbarkeit
2. Kongruenz mit lokalen Bedingungen
3. Gemeinschaftliche Entscheidungen
4. Monitoring der Nutzer und der Ressource
5. Abgestufte Sanktionen
6. Konfliktlösungsmechanismen
7. Anerkennung von Rechten
8. Polyzentrische Governance-Strukturen, verschachtelte Institutionen



Ostrom geht davon aus, dass Menschen sich in bestimmten lokalen Kontexten freiwillig an Regeln halten und nicht an ihrer Nutzenmaximierung festhalten – gerade wenn sie damit soziale Dilemmata lösen können. Dies könnte auch beim Klimawandel und der Landnutzung greifen. Entscheidend ist dabei, dass sich Menschen organisieren und Lösungen finden, die lokale Besonderheiten berücksichtigen und alle Stakeholder einbinden.

Eine der größten Herausforderungen ist dabei, die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung zu schaffen. So etwa für eine nachhaltige Selbstorganisation der Akteure, oder für ein gelebtes Mitspracherecht für Individuen, das zu erhöhtem Verantwortungsbewusstsein und somit zu einer nachhaltigeren Nutzung der Ressource Land führt.

Denkt man nun an die Abholzung von Regenwäldern oder das massive sogenannte ‚Land grabbing‘ der letzten Jahre mit seinen oft verheerenden Folgen, so wird schnell klar, dass Landnutzung einen gravierenden Wandel erfahren könnte, würde man Ostroms Prinzipien für eine nachhaltige Landnutzung konsequent anwenden.

Viele kleine Initiativen an vielen Orten der Erde

könnten sinnvoller sein als auf globale Patentlösungen oder internationale Abkommen zu warten. Es erklärt sich von selbst, dass die Politik hier unterstützend wirken sollte. Oder, wie es das Nobelpreis-Komitee formulierte: Die Zukunft des Menschen gehört der „Organisation von Kooperation“. Damit der Wandel gelingen kann, müssen die Menschen und nicht technische Neuerungen und selektive Interessen einiger weniger im Mittelpunkt stehen. Dabei ist offensichtlich, dass schnelles Handeln notwendig ist, gerade in Anbetracht des fortschreitenden Klimawandels, der sozialen Disparitäten und des Hungers in der Welt.



## **Mitwirkende:**

### **Prof. Dr. Almut Arneth**

#### **Dr. Mechtild Agreiter**

#### **Dr. Thomas Pugh**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Meteorologie und  
Klimaforschung, Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU)  
Garmisch-Partenkirchen, Deutschland  
[http://imk-ifu.fzk.de/plant\\_atmosphere\\_interactions.php](http://imk-ifu.fzk.de/plant_atmosphere_interactions.php)

#### **Dr. Joanna House**

Cabot Institute School of Geographical Sciences, Universität Bristol,  
Großbritannien  
<http://www.bristol.ac.uk/geography>

#### **Dr. Annalisa Savaresi**

Edinburgh Law School, Universität Edinburgh, Großbritannien  
<http://www.law.ed.ac.uk/>

#### **Nathalie de Noblet-Ducoudré**

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Centre national  
de la recherche scientifique, Frankreich  
<http://www.lsce.ipsl.fr>

#### **Dr. Alexander Popp**

Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Deutschland  
<https://www.pik-potsdam.de>

### **Prof. Dr. Detlef van Vuuren**

#### **Dr. Elke Stehfest**

Department of Climate, Air and Energy, Umweltagentur PBL Netherlands  
Environmental Assessment Agency, Niederlande  
<http://www.pbl.nl/en/aboutpbl/departments/climate-air-and-energy>

#### **Kerstin Baumanns**

Universität Lund, Dept. Physical Geography and Ecosystem Science,  
Schweden  
<http://www.nateko.lu.se>

### **Prof. Mark Rounsevell**

David Kinloch Michie Chair of Rural Economy and Environmental Sustainability,  
School of GeoSciences, Universität Edinburgh, Großbritannien  
<http://www.ed.ac.uk/schools-departments/geosciences>

## **Bildnachweis**

© S. Rösner | pixeldiversity.com (cover; p. 1; 4; 42/43; 53; 66; 67), © Almut  
Arneth (p. 2; 21; 25), © Delphine Deryng (p. 7), © Anita Bayer/DLR (p. 8/9),  
© Nadine Rühr (p. 15), © Andreas Gast (p. 29; 44/45; 50/51; 61), © Ines  
Bamberger (p. 64; 70/71)

## **Abbildungen**

Almut Arneth (p. 18/19); Thomas Pugh (p. 26); Nathalie de Noblet & Almut  
Arneth (p. 35)



Diese Broschüre ist Teil des von der Europäischen Kommission innerhalb des 7. Rahmenprogramms geförderten Projekts LUC4C - *Land use change: assessing the net climate forcing, and options for climate change mitigation and adaptation*. Die enthaltenen Beiträge untersuchen u. a. die Wechselwirkungen zwischen Landnutzungsänderung und Klimawandel, klimapolitische Aspekte, aktuelle Klimamodelle und Klimaszenarien, den Bezug zur Nahrungsmittelproduktion und gesellschaftliche Wechselwirkungen.

