



# Klimawandel im FREILANDEXPERIMENT

Wie wird sich das kommende Treibhausklima auf die Biosphäre auswirken?  
Mit Freilandversuchen messen Forscher die Effekte von veränderten Niederschlägen, Temperaturen oder Kohlendioxidkonzentrationen auf Pflanzen – und finden teils Überraschendes.

Von Stan D. Wullschleger und Maya Strahl

Die Erde erlebe gerade ein riesiges, unkontrolliertes Experiment – das äußerte vor 30 Jahren Charles F. Baes, Jr. Der Chemiker vom Oak Ridge National Laboratory (in Tennessee) des amerikanischen Energieministeriums warnte, die Folgen der zunehmenden Treibhausgase würden wir bald weltweit zu spüren bekommen. Inzwischen erkennen die Wissenschaftler, dass Waldrodung, Landverbrauch und die Nutzung fossiler Brennstoffe zur Erwärmung dieses Planeten beitragen. Doch wir wissen nicht genau, wie sich der Klimawandel auf Wälder oder Graslandschaften auswirken wird, auch nicht, welche Folgen dies für uns als Nutznießer der Ressourcen und Dienste der Natur hätte.

Vieles, was man hierzu hört oder liest, beruht allein auf Beobachtungen, jedoch nicht auf Experimenten. Wissenschaftler verfolgen inzwischen genau, wie sich die arktische Eisdecke oder die Gletscher verändern. Sie zeichnen akribisch die Verschiebungen auf, wann die Bäume im Frühjahr ausschlagen und dergleichen. Solche Daten sind zweifelsohne sehr wichtig. Doch mit dem Klimawandel befasste Biologen möchten die langsamen Veränderungen in der Tier- und Pflanzenwelt nicht einfach nur abwarten, sondern auch Vorhersagen für die Biosphäre treffen können. Deswegen konzipieren sie Feldstudien von oft recht großen Ausmaßen. So testen sie gezielt, was mehr – oder weniger – Regen,

mehr Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) oder steigende Temperaturen bewirken. Die Ergebnisse brauchen wir, um klar zu erkennen, wie die Ökosysteme unter dem Einfluss des Klimawandels in 10, 50 oder 100 Jahren aussehen werden. Die Tests zeigen auch Rückkopplungseffekte, die beobachtete Veränderungen noch verstärken. Auf die Weise lassen sich bloße Annahmen von Tatsachen trennen, was der emotionsgeladenen Klimadebatte zugutekommt.

Jahrelang pflegten Forscher für Klimastudien etwa das Verhalten von Einzelpflanzen zu untersuchen. Zumeist hielten sie ihre Versuchsobjekte über einige Monate in einem klimakontrollierten Raum. Diese experimentelle Ebene ist notwendig zum Verständnis von grundlegenden Mechanismen. Aber wir müssen die Pflanzen auch in ihrem natürlichen Umfeld testen, das heißt als Mitglieder von Ökosystemen. Viele Menschen wissen nicht, dass teils schon seit über zehn Jahren etliche groß angelegte Freilandexperimente laufen (auch in Deutschland), die veränderte Niederschläge oder höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen simulieren, darunter die im Folgenden beschriebenen Versuche. Auch Temperaturexperimente haben angefangen. Mittlerweile fließen Daten aus solchen Studien in Modelle für zukünftige Klima- und Vegetationsveränderungen ein – und lassen genauer abschätzen, was veränderte Niederschlagsmuster und mehr Kohlendioxid auf der immer wärmeren Erde für Wälder, Prärien oder auch Agrarpflanzen bedeuten.

## In Kürze

- ▶ Auf kleinen Flächen von Wäldern, Gras- und bebautem Agrarland verändern Wissenschaftler die Temperatur, den Kohlendioxidgehalt der Luft oder die Niederschlagsmenge; dann beobachten sie **die Reaktion der Pflanzen**.
- ▶ Höhere Temperaturen und mehr Kohlendioxid bewirken zwar meist ein **stärkeres Blattwachstum** und **höhere Ernteerträge**. Allerdings kann das den Insektenbefall verstärken sowie die Abwehrkräfte der Pflanze gegenüber Schädlingen und Krankheiten schwächen.



Durch den Klimawandel könnte der Kohlendioxidgehalt der Luft deutlich ansteigen. Wie wird die Pflanzenwelt darauf reagieren? Forscher wollen es in Experimenten herausfinden.

## EXPERIMENTE MIT WASSERMENGEN

**PROBLEM:** Ein weltweiter Temperatur- und Kohlendioxidanstieg verändert auch die Niederschläge, aber von Ort zu Ort ganz verschieden. In manchen Gebieten dürften sie zu-, in anderen abnehmen.

**EXPERIMENT:** Verschiedenste Konstruktionen, die einen Teil der Niederschläge auffangen und umleiten, vermindern beziehungsweise erhöhen die den Pflanzen in einer definierten Parzelle verfügbare Wassermenge. Dergleichen erproben Forscher in Gras- und Waldgebieten, in der (baumlosen) Tundra des Nordens sowie auf Agrarflächen. Meistens verwenden sie dafür Trog- oder Rinnenkonstruktionen oder entsprechend geformte Überdachungen, die teils veränderbar sind. Das aufgefangene Wasser wird entweder ganz fortgeleitet oder einer anderen Fläche zugeführt, wo es für zusätzliche Nässe sorgt. Gräben oder Barrieren im Boden können verhindern, dass Wasser von außen zufließt oder Wurzelwerk über die Parzelle hinauswächst.

Bei einer Studie in einem Wald bei Oak Ridge in Tennessee fangen ausgeklügelte Vorrichtungen das Wasser auf Höhe der Stämme auf und leiten es zu anderen Parzellen (siehe Bilder). So lassen sich Flächen von Fußballfeldgröße künstlich trockener halten oder nässen. Ähnlich manipulieren Forscher an anderen Orten locker stehende Bäume, etwa in New Mexico Kiefern-Wachholder-Bestände (*Pinus edulis* – *Juniperus monosperma*). Dort untersucht Nathan McDowell vom Los Alamos National Laboratory, wie sich Trockenheit und Insektenbefall auf das Sterben von Bäumen auswirken.

**ERGEBNISSE:** Die Effekte sind keineswegs überall gleich. Um Modelle zu Klimafolgen zu entwickeln, müssen Forscher die oft komplexen lokalen Bedingungen und Wechselwirkungen berücksichtigen.



Nur ein Teil des Niederschlags erreicht den Boden. Viel wird aufgefangen und weggeleitet.

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY

Eine Studie der Kansas State University in der Konza-Prärie ergab, dass manche Gräser Wassermangel besser aushalten als andere. Die Konkurrenz von Pflanzen um die Ressource Wasser dürfte zunehmen, wenn die Welt wärmer wird.

In gemäßigten Wäldern verkraften herangewachsene Bäume, die schon tief genug wurzeln, anhaltend verminderten Niederschlag. Das zeigte etwa Paul Hanson in einem 13 Jahre währenden Projekt. Dagegen überstanden von den jungen Bäumen und Keimlingen viele den Eingriff nicht. Am meisten litt der Wald bei Wasserknappheit im zeitigen Frühjahr, wenn der Stammdurchmesser wächst. Wasserentzug nach dem Ende der Wachstumsphase schadete kaum – solange sich die Bodenreserven vor der nächsten Wachstumsphase wieder auffüllten. Ganz anders im Amazonasregenwald: Dort beobachteten Forscher vom Woods Hole Research Center in Massachusetts, dass einige große Bäume im vierten künstlich trockeneren Jahr eingingen, hingegen jüngere Exemplare und Schösslinge dadurch weniger litten. Bei nur 40 Prozent des normalen Niederschlags fielen in diesem Regenwald tiefere Schichten des Untergrunds trocken, während die oberen Schichten feucht genug blieben. In gemäßigten Wäldern war es gerade umgekehrt.

## KÜNSTLICH MEHR ODER WENIGER REGEN

25 Meter hohe Eichen



Untergrund trockener (auf 80 m x 80 m)

Kontrollfläche, normale Regenmenge

Untergrund feuchter

1 Über einem Drittel der Fläche wird das Regenwasser aufgefangen.

2 Wasser wird in Rinnen weggeleitet.

3 Aufgefangenes Wasser speist Rohre.

4 Wasser fließt in den Rohren abwärts.

5 Löcher in den Rohren: Boden wird berieselt.

DAVID FLEISCHER

## CO<sub>2</sub>-EXPERIMENTE: MEHR WACHSTUM – MANCHMAL

**PROBLEM:** Nach Einschätzung von Forschern nehmen die Ozeane und terrestrischen Ökosysteme mindestens die Hälfte des von fossilen Brennstoffen freigesetzten Kohlendioxids auf. Pflanzen nutzen es bei der Fotosynthese zum Aufbau von Kohlenhydraten. Aber werden höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen diese Produktion verstärken? Und wird mehr CO<sub>2</sub> Art oder Zusammensetzung von aufgebauten Stoffen verändern, etwa von Abwehrsubstanzen – und sich damit auf Nutz- wie Schadinsekten und Krankheitserreger auswirken?

**EXPERIMENT:** Beim Oak Ridge National Laboratory läuft seit über zehn Jahren unter Leitung von Richard Norby das Experiment FACE (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment). Auf vier Flächen des Versuchsgebiets strömt aus einem Kreis aufragender Rohre zusätzliches Kohlendioxid zu den Bäumen in der Mitte (Bilder). Die Menge wird genau gesteuert. Ähnliche Langzeitversuche erfolgen weltweit an fast 35 weiteren, teils natürlichen, teils vom Menschen gelenkten Ökosystemen. Die kleinsten Parzellen in Sümpfen haben einen Meter Durchmesser; manche auf Ackerflächen betragen 23, die größten in Forstwäldern 30 Meter.

**ERGEBNISSE:** Die Daten bestätigen es: Mehr CO<sub>2</sub> verstärkt die Fotosynthese, so dass die Pflanzen mehr Kohlenstoff in Geweben fixieren, also mehr Biomasse bilden. Diese gesteigerte Nettoprimärproduktion erhalten sie über mehrere Vegetationsperioden aufrecht. Waldexperimente in Wisconsin, North Carolina, Tennessee und Italien ergaben bei einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von 550 ppm (millionstel) eine im Jahr um 23 Prozent erhöhte Biomasseproduktion; normal sind derzeit etwa 388 ppm (gegenüber

unter 300 ppm vor 150 und 360 ppm vor rund zehn Jahren). Innerhalb der nächsten 100 Jahre könnte die Konzentration auf den untersuchten Wert anwachsen, sofern wir die Emissionen nicht drosseln. Neueren Modellierungen zufolge würden die Pflanzen auf die höheren CO<sub>2</sub>-Werte günstig reagieren, zumindest dort, wo die Böden genügend Nährstoffe bieten, etwa Stickstoff.

Bei all diesen Studien stieg die Produktion etwa in gleichem Maß. Das zeigt allerdings nur an, wie viel Kohlenstoff eine Pflanze zusätzlich fixiert, nicht dessen späteren Verbleib. Die Weihrauchkieferwälder North Carolinas speichern ihn vor allem in Stämmen und Ästen, ein Platz für Jahrzehnte. Dagegen landet in Wäldern des Amerikanischen Amberbaums in Tennessee das meiste in feinen, neuen Wurzeln. Natürlich nutzt auch das dem Baum, doch die Würzelchen leben nur Wochen bis höchstens ein Jahr. Später werden sie von Mikroben zersetzt, und viel von diesem Kohlenstoff gelangt wieder in die Atmosphäre. Über den Grund für solche Unterschiede hoffen Forscher in nächster Zeit einiges zu erfahren, denn an verschiedenen Versuchsorten steht an, Bäume für Studienzwecke zu fällen und Bodenproben zu nehmen.

Schon jetzt zahlen sich die CO<sub>2</sub>-Experimente aus. Mitarbeiter verschiedener Forschungsstätten, darunter James Randerson von der University of California in Irvine, bewerten und verbessern mit den gewonnenen Daten eine der großen globalen Klimamodellierungen, das Community Climate System Model (CCSM). Es simuliert die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse, die das Klimasystem der Erde steuern.

### DAS FACE-EXPERIMENT



OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY

Kreisförmige Parzellen werden über aufragende Rohre kontrolliert mit CO<sub>2</sub> begast.



DAVID FIEBSTEIN

## TEMPERATUREXPERIMENTE: NOCH VERBESSERUNGSBEDARF

**PROBLEM:** Die Erderwärmung wird einzelne geografische Gegenden unterschiedlich stark treffen. Bis 2100 steigt die Temperatur in Nordamerika im Winter um 3,8 bis 5,9 Grad, im Sommer um 2,8 bis 3,3 Grad. Das wirkt sich auf den Stoffwechsel von Pflanzen aus, auf die Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen aus dem Boden, auf die Konkurrenz zwischen Pflanzen sowie die Bedrohung durch Pflanzenfresser, Insekten und Krankheitserreger.

**EXPERIMENT:** Um die Temperatur zu erhöhen, erproben Forscher an recht kleinen Parzellen verschiedene Verfahren – etwa Infrarot-Wärmelampen; elektrische Heizbänder im Boden; große, durchsichtige, oben offene Plastikzylinder, in die Warmluft bläst. Diese Verfahren haben Vor-, aber auch Nachteile. Bei den meisten können nur kleine Flächen oder nur Ausschnitte des Ökosystems manipuliert werden. Manche erwärmen den Boden im Verhältnis zu stark. Passiv funktionierende Wärmekammern sind von der

Tages- und Jahreszeit abhängig; Regen, Wind und Sonne wirken dann anders, was die Dateninterpretation erschwert.

**ERGEBNISSE:** Besonders empfindlich reagieren arktische Ökosysteme und die unmittelbar angrenzenden kaltgemäßigten Waldgebiete auf Temperaturänderungen. Beim International Tundra

Experiment unter Greg Henry von der University of British Columbia in Vancouver (Kanada) verwenden die Forscher in verschiedenen Ländern an über einem Dutzend Standorten passive Wärmekammern, um kleinen Flächen Wärme zuzuführen. Soweit sich das bisher sagen lässt, bewirken ein bis drei Grad Erwärmung, dass Sträucher und Gräser auf Kosten von Moosen und Flechten besser wachsen und mehr Bodenfläche einnehmen – passend zur These, dass die Biodiversität hoher Breiten unter der Erwärmung leiden wird. Bei mehr Gehölzen und weniger krautigen Pflanzen hielte die Erde zudem mehr Energie zurück,



Solche oben offenen Kammern bieten Setzlingen und jungen Bäumen das ganze Jahr über kontrolliert wärmere Bedingungen.

Sojapflanzen wuchsen bei mehr CO<sub>2</sub> und Ozon zwar stärker in die Höhe, litten aber auch mehr unter Schadinsekten – hier Japankäfern, mittlerweile in den USA eine Plage.



Experimentelle Studien an den verschiedensten Orten weltweit zeigen ein bemerkenswertes Potenzial von Pflanzen und Ökosystemen, sich an neue Verhältnisse anzupassen. Allerdings erwarten Biologen Grenzwerte, die nicht überschritten werden dürfen. Ansonsten drohen krasse, sogar katastrophale Folgen. Die Erforschung der Schwellenwerte wird noch manche Überraschung bringen, doch so viel lesen die Experten aus den Freilandstudien schon heraus.

### Die wichtigsten Befunde bisher

➤ Höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen können zwar die Erträge etwa von Weizen, Reis, Gerste, Soja oder Baumwolle steigern; andererseits wirkt eine Klimaerwärmung, und mancherorts eine hohe Ozonbelastung, dem »Düngeeffekt« entgegen, bis hin zu dessen Aufhebung. Der Klimawandel wird auch die Beziehungen zwischen Nutzpflanzen, Unkräutern, Krankheitserregern und Insekten verändern. Meist tragen dann die Schädlinge den Sieg davon.

➤ Die Laubwälder im Osten der USA sind gegen Trockenheiten eher unempfindlich. Dort speichern tiefere Bodenschichten genug Wasser, so dass große Bäume über das Jahr wachsen. Doch die oberen Schichten halten

nicht genug Wasser und trocknen schnell aus. Schösslinge und junge Bäume – unsere Wälder der Zukunft – überstehen das oft nicht.

➤ Ein stärkeres Wurzelwachstum durch einen höheren CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft könnte die Nährstoffversorgung der Pflanzen verbessern und somit die Produktivität junger Wälder steigern. Für Ökosysteme in trockenen und ariden Lagen wäre eine vermehrte Wurzelbildung in der Tiefe von Vorteil, weil die Pflanzen das im Boden gespeicherte Wasser besser nutzen könnten.

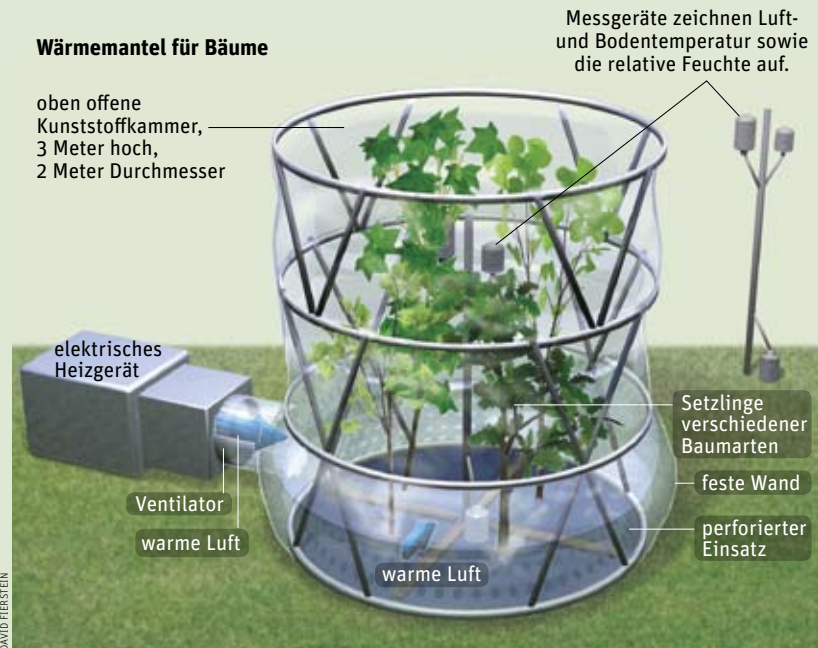
➤ In der Landwirtschaft könnten eine globale Erwärmung und steigende CO<sub>2</sub>-Konzentrationen die Ausbreitung vieler Unkräuter fördern, etwa Disteln, und somit die Ernteerträge mindern oder mehr Herbizide erfordern. Auch Exoten würden sich dann leichter breitmachen. Die Dach-Trespe etwa, ein Süßgras aus der Alten Welt, ist heute weltweit eine Plage. Bei einem CO<sub>2</sub>-Test in der Mojave-Wüste im Südwesten der USA von Stan Smith von der University of Nevada in Las Vegas verbreitete sich dieses Gras in einem besonders regenreichen Jahr bei erhöhtem CO<sub>2</sub>-Angebot stark. Die Pflanzenvielfalt litt darunter, die normale Nahrungskette war gestört, und die Brandgefahr wuchs.

die sonst in den Weltraum abstrahlt. Das würde die globale Temperatur weiter erhöhen.

Ähnliche Eingriffe, die in anderen Breiten stattfanden, lassen befürchten, dass Organismen mancherorts aussterben, abwandern und Artenzusammensetzungen sich verändern. Carla Gunderson vom Oak Ridge National Laboratory hat das Verhalten von vier Laubbaumarten untersucht, wenn die Temperatur um bis zu vier Grad steigt (Bilder). Die Keimlinge und Schösslinge konnten sich daran anpassen. Zumeist wuchsen sie stärker. Im Frühjahr schlugen die Bäume ein bis zwei Wochen früher aus, im Herbst behielten sie ihre Blätter länger, im Ganzen eine Verlängerung der Wachstumsphase um bis zu drei Wochen. Ob die Pflanzen nun mehr unter Spätfrösten leiden, weil sie früher »aufwachen«, bleibt abzuwarten.

Die bisherigen Ergebnisse sind zwar brauchbar, jedoch schwer auf Ökosysteme übertragbar. Nötig wäre es, größere Gebiete zu manipulieren. Diente als Wärmequelle bisher hauptsächlich Elektrizität, so eignet sich für abgelegene Orte vielleicht Erdgas oder Erdwärme besser.

## JUNGE BÄUME UNTER KÜNSTLICHEM ANPASSUNGSDRUCK



► Dass Gehölze in den letzten 200 Jahren zunehmend in Grasgebiete vorgedrungen sind, geht zwar hauptsächlich auf Überweidung und Brandbekämpfung zurück. Allerdings dürfte in den amerikanischen Prärien auch der CO<sub>2</sub>-Anstieg weiterhin dazu beitragen.

► Auf dem Weg über Pflanzen könnte der CO<sub>2</sub>-Anstieg unsere Gesundheit beeinträchtigen, zum Beispiel weil Pollenaufkommen ansteigen und mehr Allergien auftreten. Oder man denke an den hochallergenen Giftefeu, der sich in Nordamerika immer mehr ausbreitet und bei den meisten Menschen schwere Hautreaktionen verursacht.

### Endlich datengestützte Prognosen

Die meisten solchen Studien liefen bisher in mittleren Breiten, zudem hauptsächlich in Europa und den USA. Für Prognosen, was der Klimawandel in tropischen Ökosystemen, Tundren und Nadelwäldern der kalgemäßigten Zone anrichten wird, müssen Freilandexperimente auch diese Breiten abdecken. Wegen der in der Regel schwierigen Durchführung und der abgelegenen Standorte erfordert jedes einzelne Experiment jahrelange Vorbereitungen. Nur ein erhebliches Maß an technischer Planung stellt sicher, dass die Be-

dingungen bei einem Versuch einheitlich sind und die Vorrichtungen über Jahre halten.

In zukünftigen Projekten sollen nicht nur Einzelfaktoren manipuliert, sondern CO<sub>2</sub>, Temperatur und Niederschlag zugleich verändert werden. Hiermit steht die Forschung erst am Anfang. In der Nähe von Cheyenne in Wyoming begann jetzt eine Studie in einer nördlichen Prärie, die erfasst, wie die verschiedenen Gräser mit gleichzeitigen Temperatur- und CO<sub>2</sub>-Veränderungen zurechtkommen. Schon im ersten Jahr des Versuchs fand Jack Morgan vom Agrarforschungsdienst des US-Agrarministeriums Anzeichen dafür, dass wärmere Bedingungen zusammen mit einem CO<sub>2</sub>-Anstieg Sommergräser zunehmen lassen, die auch bei Trockenheit wachsen, auf Kosten von Gräsern, die im Frühjahr und Herbst sprießen und im Sommer ruhen.

Wie man am besten vorgeht, um eine Anzahl von Umweltfaktoren zugleich zu verändern, und wie das samt möglichen Rückkopplungen in Modelle einfließen kann, wirft komplexe Fragen auf. Trotzdem benötigen wir dringend experimentelle Belege, damit die Gesellschaft weiß, was sie angesichts des Klimawandels erwartet, der sich bereits vollzieht, und wie sie damit umgehen sollte. ◁



**Stan D. Wullschleger** ist Biologe und leitet am Oak Ridge National Laboratory (Tennessee) die Forschungsgruppe Plant Systems Biology. **Maya Strahl** arbeitet am Cold Spring Harbor Laboratory in New York.

**Ainsworth, E. A. et al.:** Next Generation of Elevated [CO<sub>2</sub>] Experiments with Crops: A Critical Investment for Feeding the Future World. In: Plant, Cell and Environment 31, S. 1317–1324, 2008.

**Ziska, L. H. et al.:** Rising CO<sub>2</sub>, Climate Change, and Public Health: Exploring the Links to Plant Biology. In: Environmental Health Perspectives 117(2), S. 155–158, Februar 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1034795](http://www.spektrum.de/artikel/1034795).