



# WALD WISSEN



**PETER WOHLLEBEN  
PIERRE L. IBISCH**

# WALD WISSEN

**VOM WALD HER DIE WELT VERSTEHEN**

*Erstaunliche Erkenntnisse über den Wald,  
den Menschen und unsere Zukunft*

LUDWIG



Mit diesem Buch wird das Buchen-UrwaldProjekt von Wohllebens WALDAKADEMIE in der Eifel unterstützt.

Von Natur aus wäre Deutschland zu über 90 Prozent von Wald bedeckt, der größte Teil davon Buchen- oder Buche/Eichen-Mischwälder. Alte Buchenwälder sind die Regenwälder Europas, und ähnlich wie in den Tropen ist es auch um sie sehr schlecht bestellt. Buchenwälder ab Alter 180 haben nur noch einen Anteil von 0,16 Prozent an der Landfläche. Die Buchenwälder des UrwaldProjekts werden konsequent geschützt und für kommende Generationen erhalten.

In dem Wald-Schutzgebiet in der Eifel wird auf natürliche Weise CO<sub>2</sub> in alten Wäldern gespeichert und somit das Klima entlastet. Gleichzeitig übernimmt das Projekt auch eine wichtige Rolle im Erhalt der Biodiversität.



Durch das Einscannen dieses QR-Codes gelangen Sie auf die Website von Wohllebens WALDAKADEMIE und können den Buchen-Urwald, den Sie mit dem Kauf dieses Buches schützen helfen, live erleben.

Sollte diese Publikation Links auf Webseiten Dritter enthalten, so übernehmen wir für deren Inhalte keine Haftung, da wir uns diese nicht zu eigen machen, sondern lediglich auf deren Stand zum Zeitpunkt der Erstveröffentlichung verweisen.



Penguin Random House Verlagsgruppe FSC® N001967

Originalausgabe 2023

Copyright © 2023 by Ludwig Verlag, München,  
in der Penguin Random House Verlagsgruppe GmbH,  
Neumarkter Straße 28, 81673 München  
Redaktion: Angelika Lieke

Umschlaggestaltung: Eisele Grafik-Design, München,  
unter Verwendung der Fotos von Andreas Vitting/Mauritius Images und  
A\_nella/Bigstock (Cover) und Andreas Vitting/Mauritius Images (Rückseite)  
sowie Macrovector./Bigstock (Innenklappen)  
Layout und Gestaltung: Eisele Grafik-Design, München  
Illustrationen: Nadine Gibler  
Bildredaktion: Tanja Zielezniak  
Satz: Buch-Werkstatt GmbH, Bad Aibling  
Druck und Bindung: Alföldi Nyomda Zrt., Debrecen  
Printed in Hungary  
ISBN: 978-3-453-28149-3

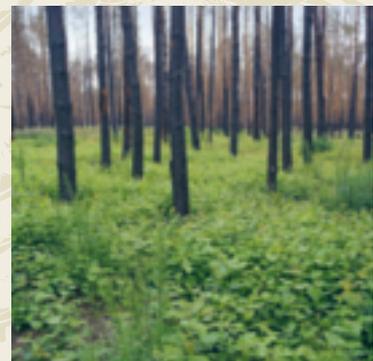
[www.Ludwig-Verlag.de](http://www.Ludwig-Verlag.de)





# INHALT

<b>Vorwort</b> .....	12
<b>Warum gerade Wald?</b> .....	15
<b>Wald ist mehr als die Summe seiner Bäume</b> .....	23
<b>Wälder sind Systeme</b> .....	24
<b>Wälder sind unberechenbar</b> .....	32
Viele Teile, noch mehr Wechselwirkungen.....	32
Biodivers: Die Vielfalt des Lebens.....	33
Der Einfluss von »untoten« Akteuren.....	36
Komplexität: unkalkulierbar, überraschend, unterschätzt.....	38
Alle sind wichtig, aber manche Komponenten sind wichtiger.....	44
Ordnung ist auch keine Lösung.....	47
Chaos und schöpferische Zerstörung.....	48
Weshalb Natur weder vorhersagbar noch steuerbar ist.....	53
<b>Der verschachtelte »Waldorganismus«</b> .....	61
<b>Symbiose: vom Gegeneinander zum Miteinander</b> .....	61
Das »Wood Wide Web«.....	65
Junkies und Drogendealer.....	70
Wir sind alle Flechten: Von Überorganismen und Holobionten.....	72
Unterschätzt und unfassbar: Pflanzen und ihre Mikrobiome.....	75
Mikroben können die Toleranz von Pflanzen gegenüber dem Klimawandel fördern.....	78
<i>E pluribus unum</i> : Ist der Wald ein Organismus?.....	81
<b>Vernetzte Computer:</b>	
<b>Informationsverarbeitung in Waldökosystemen</b> .....	85
Information zur richtigen Zeit am richtigen Ort.....	86
Leben als Informationsmanagement.....	86
Ein gutes Gedächtnis ist auch eine Frage des Alters.....	88
Viel hilft nicht immer viel.....	88
Information, Sex und Fitness.....	92
Von Kommunikation zu Funktion ... und Intelligenz.....	93
<b>Alles ist Energie</b> .....	96
Energie gewinnen, nutzen und speichern, ohne in Flammen aufzugehen.....	96
Ist am Ende alles nichts?.....	98
Wälder als Zeitmaschinen.....	99
Mit knapper Energie wirtschaften:	
Effizienz, Suffizienz und Resilienz.....	111
<b>Baumeister der Kohlenstoffwelt</b> .....	116
Warum eigentlich Kohlenstoff?.....	116
Schwer und hoch, jung und alt.....	117
Tot oder lebendig.....	118
Wenn Holz mulmig wird, lebt der Wald.....	118
<b>Waldphysik: Wälder als Wasserspeicher und Klimaanlage</b> .....	122



Am Anfang war das Wasser.....	123
Waldwasser(werke).....	125
Die Kraft des »grünen Wassers« .....	130
Regen- und Wettermacher:	
Fliegende Flüsse und Wald-Wasser-Pumpen .....	139
<b>Nachbarschaft und Fernbeziehungen im Ökosystem</b> .....	144
<b>Wälder für Menschen, Menschen für Wälder</b> .....	145
Sozialökologische Systeme: einfach nur sozial und ökologisch?.....	146
Ökonik: Vom Haushaltssystem Wald für das Wirtschaften lernen.....	149



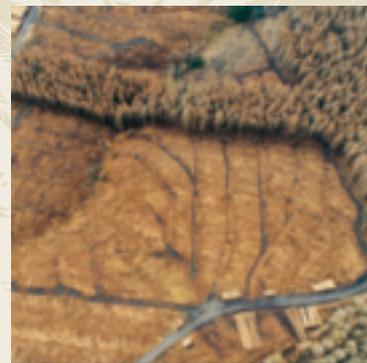
<b>Wald und Mensch – die kurze Geschichte einer langen Beziehung</b> .....	153
<b>Waldworte</b> .....	153
<b>Waldbilder</b> .....	156
<b>Waldbegriffe und die Frage des Systems</b> .....	161
Begriffe als Programm .....	161
Abteilungen und Bestände: vom Zergliedern und Bauen des Waldes.....	168
Naturnaher Waldbau – eine Nebelkerze?.....	169
Vom Waldorganismus zum Ökosystem .....	172



<b>Wohlergehen von Wald und Mensch</b> .....	179
<b>Was macht den Wald gesund?</b> .....	181
Zeit und Raum .....	181
Je wilder, desto besser .....	182
<b>Was macht den Wald krank?</b> .....	186
Holznutzung und Forstwirtschaft .....	189
Pflanzungen .....	195

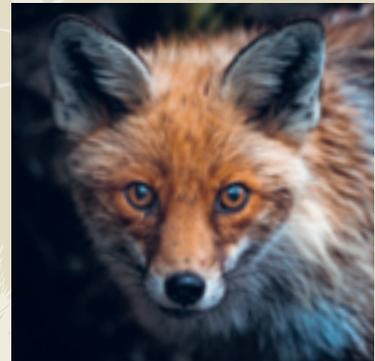
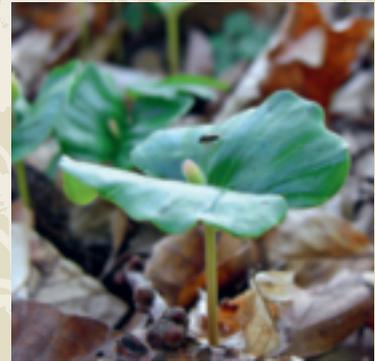


Brandgefährlich und mehr als das: Gefährdungen jenseits der forstlichen Nutzung .....	212
Menschengemachte Klimakrise und die vermeintliche Anpassung .....	232
<b>Die »Krankheiten« des Waldes – und ihre Ursachen</b> .....	244
Patient Wald – was ist mit seinen Pfleger:innen los?.....	246
Das Trauma der Forstwirtschaft: Bedeutungsverlust .....	252
Mein Wald, mein Eigentum, mein Recht? .....	254
Mangel an (Ge-)Wissen und Gewissheit .....	257
<b>Entwicklung neu definieren</b> .....	258
Wer wir sind und was wir wollen sollten.....	261
Was ist ein gutes Leben?.....	264
Ökosystemleistungen als wesentliche Grundlage menschlichen Wohlergehens .....	265
Mensch und Wald: vom Leben und Fühlen .....	266



<b>Warum Waldbewirtschaftung?</b> .....	273
<b>Wem dient die Waldbewirtschaftung?</b> .....	274
Verunsicherung als Herausforderung .....	275
Vom Wirtschaften und Wissen.....	276
<b>Sozialökologisches Wirtschaften und Haushalten</b> .....	278

Ziele und Messung von wirtschaftlichem Erfolg.....	282
Risikomanagement und Wirtschaften.....	288
Erfassung und Bewertung von Waldökosystem und Bewirtschaftung.....	290
Aus Erfahrung klüger werden: (Nicht-)Wissen und adaptives Management.....	292
Eine Frage der Gerechtigkeit: Sozialökologische Wald-Governance.....	293
Vier Grenzlinien, den Wald betreffend: Aktuelle Herausforderungen und Aufgaben.....	294
Organisation und Kontrolle des Waldbetriebs.....	297
Kommunikation und Teilhabe.....	299
Sozialökologische Waldpolitik.....	300
<b>Die 20 Prinzipien der sozialökologischen Waldbewirtschaftung – ein Manifest.....</b>	<b>303</b>
<b>Der neue Kompass für den Wald – eine Orientierung.....</b>	<b>309</b>
<b>Holz hunger: Förderung versorgender Ökosystemleistungen.....</b>	<b>311</b>
Wie kommt das Holz aus dem Wald?.....	313
Neue Bäume.....	314
Sündenkäfer und Sündenböcke.....	324
Pflegen mit der Säge?.....	330
Ernten, aber bitte maßvoll!.....	334
Von Wiesen und Plantagen zurück zu echtem Wald.....	337
<b>Holz ist nicht alles: Förderung regulierender Ökosystemleistungen.....</b>	<b>339</b>
Weg und Steg.....	341
Pflanzen.....	343
<b>Waldbaden und Co.: Förderung kultureller Ökosystemleistungen.....</b>	<b>346</b>
Erschließung und Technik.....	347
Pflanzen und pflegen.....	348
Jagdfrei – Waldtiere ohne Scheu.....	349
Motorsäge kontra Tourismus.....	350
Organisation von touristischen Angeboten.....	355
<b>Waldbewirtschaftung nur im Wald?.....</b>	<b>357</b>
<b>Zukunft: Wie kann und sollte es weitergehen?.....</b>	<b>361</b>
<b>Ohne Radikalität geht es nicht!.....</b>	<b>364</b>
<b>Für eine Klimaflurbereinigung.....</b>	<b>367</b>
<b>Angst und Trauer transformieren.....</b>	<b>370</b>
<b>Waldwissen und Waldfühlen: Hoffnung zum Schluss.....</b>	<b>371</b>
Anmerkungen.....	372
Bildnachweis.....	384





## VORWORT

Wälder sind nicht nur wunderbare, vielfältige Ökosysteme, sie haben auch eine zentrale Bedeutung für das Leben auf der gesamten Erde. Sie steuern aktiv die Wasserkreisläufe, kühlen die Landschaften und sind Heimat für eine erst ansatzweise erforschte Vielzahl von Arten.

Die zentrale Frage ist, ob wir genügend Wälder bewahren können, um all ihre Fähigkeiten zu erhalten. Dem steht unser Hunger nach Holz im Wege, den wir ebenfalls befriedigen wollen. Die einfachen Antworten, die die Forstwirtschaft bisher bereithielt, führen inzwischen endgültig in die Sackgasse. Nicht nur global, sondern auch direkt vor unserer Haustür sterben bereits jetzt Tausende von Quadratkilometern von Fichten- oder Kiefernplantagen. Sie wurden im Glauben gepflanzt, Wald bestehe im Wesentlichen aus Bäumen, und diese könne man so manipulieren, dass neben einer Menge Holz auch alle anderen Wohltaten der Wälder automatisch geliefert würden. Dem würden die Bäume und ihre Mitlebewesen heftig widersprechen, wenn sie denn nur könnten. Stattdessen stellen sie ganz still nach und nach ihre Arbeit ein, was wir meist erst bemerken, wenn es für die jeweiligen Flächen bereits zu spät ist.

Wir haben dieses Buch geschrieben, weil wir den Wald lieben – und weil wir uns Sorgen um ihn machen. Ein Leben ohne Bäume, ohne Vögel unter dem raschelnden Blätterdach alter Buchen, ohne moosbewachsene Stämme, ohne Pilze im modrigen Totholz, ohne die würzige Luft an warmen Sommertagen oder ohne knarzendes Holz, wenn der Wind durch den Wald fegt, ist für uns nicht vorstellbar. Deswegen möchten wir alles versuchen, diesen Quell des Lebens und der Freude für uns alle zu erhalten.

Und es gibt bereits Strategien, wie wir das gemeinsam erreichen können.

Dazu entführen wir Sie zunächst in die faszinierende

Welt des Allerkleinsten, um zu schauen, wie Moleküle, Bakterien und Pilze zusammen mit den Bäumen und allen anderen Lebewesen einen gewaltigen Organismus bilden, der über erstaunliche Fähigkeiten verfügt. Anschließend laden wir Sie zu einer Achterbahnfahrt ein: Es geht steil hinunter in die Tiefen der menschlichen Hybris, die im Gewand der Forstwirtschaft glaubt, Wald bauen zu können, und die katastrophalen Folgen dieser Handlungen ohne Bedenken anderen in die Schuhe schiebt. Im Looping der Klimakatastrophe kann uns Hören und Sehen vergehen.

Aber keine Sorge, es geht auch wieder bergauf. Wir denken über unsere Rolle in der Welt nach und lernen von der Natur, anders zu wirtschaften als bisher. Dabei versuchen wir uns an Lösungen, die keine starren Rezepte beinhalten, sondern flexibel und dauerhaft lernend mit (und nicht gegen den Wald) arbeiten.

Wald ist ein Bioreaktor mit zentraler Bedeutung für das globale Ökosystem, von dem wir Menschen nur eine abhängige Komponente darstellen. Deshalb kann Waldbewirtschaftung nur ökologisch erfolgen. Und sie muss mit den und für die Menschen erfolgen, ein Wirtschaften als soziale Leistung sein ... sozial-ökologisch!

Sozialökologische Waldbewirtschaftung unterscheidet sich grundsätzlich von der traditionellen Forstwirtschaft. Diese werden wir kräftig durchleuchten, um zu sehen, wie weit sich Anspruch und Wirklichkeit mittlerweile voneinander entfernt haben.

Unser Ausblick in die Zukunft gibt durchaus Anlass zur Hoffnung – wenn wir erkennen, dass wir immer noch Bestandteil der irdischen Ökosysteme sind. Deshalb muss der Schutz dieser Ökosysteme unseres Heimatplaneten oberste Priorität haben, um ein menschenwürdiges Leben für alle zu ermöglichen.



*Buchenurwald von Uholka-Shyrokyi Luh  
in den ukrainischen Karpaten  
(Pierre L. Ibisch, Juni 2019)*



# Warum gerade Wald?

Warum sollten wir uns überhaupt mit dem Thema Wald beschäftigen?

Diese Frage ist leicht zu beantworten: Weil wir erstens ohne Wald nicht existieren würden, und weil wir zweitens in der Lage sind, den Wald zu vernichten, dies auch fortgesetzt tun und bislang nicht besonders erfolgreich darin sind, dieser negativen Entwicklung Einhalt zu gebieten.

Aus dieser simplen Einsicht entstehen zwangsläufig viele neue komplizierte Fragen: Warum hat die Menschheit es trotz jahrtausendealter Einsicht, dass der Wald so bedeutsam ist, nicht geschafft, die gesellschaftliche Entwicklung ohne Waldzerstörung zu betreiben? Wäre die Entkopplung der Entwicklung vom Holzkonsum und von der Waldvernichtung überhaupt ein gangbarer Weg? Wieso ist es der Forstwirtschaft, die sich seit über 300 Jahren auch weltweit verbreitet hat, nicht gelungen, den Niedergang von Wäldern aufzuhalten? Ist die Walderhaltung eine Frage, die mit mehr Hintergrundwissen besser gelöst werden kann? Benötigen wir womöglich neues oder anderes Wissen? Oder geht es weniger um Wissen als vielmehr um Politik? Brauchen wir zur Walderhaltung eine »waldökologischere Politik« oder eine »politischere Waldökologie«?

Wälder faszinieren Menschen seit jeher. Der Wald ist ein Ort, an dem viele Lebewesen offenkundig größer und langlebiger sind als wir selbst. Das allein regt zum Nachdenken an. Alte Bäume verbinden uns mit der Vergangenheit und mit der Zukunft. Wälder sind unübersichtlich und vielfach immer noch unergründlich und ge-

heimnisvoll. Sie bilden damit einen Gegensatz zu unserer modernen Lebenswelt aus Menschengemachtem, unserer Umgebung, die von geraden Linien und rechten Winkeln geprägt ist, von Planung und Berechenbarkeit. Wälder können wild sein, das heißt, sie haben ihren eigenen »Willen«; was in ihnen geschieht, folgt eigenen Regeln. Wälder warten mit Überraschungen auf, sie können gefährlich sein für diejenigen, die sich nicht in ihnen auskennen. Sie können uns aber auch schützen und (ver)bergen. Wälder sind mal dunkel, mal licht, grün, bunt, kühl, feucht, riechen nach Holz, Erde oder Moder. Sie sprechen unsere Sinne an, stimulieren unsere Fantasie und Kreativität.

Dennoch: Die allermeisten Menschen auf diesem Planeten leben nicht im Wald und besuchen ihn auch nicht. Hat er womöglich mit der Alltagswelt gar nichts mehr zu tun, ist die dünne Nabelschnur gerissen, die noch unsere Großeltern mit ihm verband? Wie sehr dieser Eindruck trügt, werden wir im weiteren Verlauf des Buches sehen.

Wir leben nun im Zeitalter des Menschen, Wissenschaftler haben es Anthropozän genannt. Der Grund dieser Benennung ist beunruhigend: Die Menschheit kann die Entwicklung unseres Planeten beeinflussen,

wie es zuvor nur Asteroiden oder geologische Kräfte vermochten. Wir sind von der Evolution befähigt worden, erheblichen Einfluss auf die gesamte Biosphäre zu nehmen. Egal, wo sich das Leben befindet – in den Ozeanen, in den Wäldern oder auf den Bergen –, wir mischen uns ein. Unsere Aktivitäten verändern das Klima, und wir setzen Stoffe frei, die es zuvor niemals auf der Erde gab. Wir verursachen ein Aussterben von unzähligen Arten und beeinflussen den Kurs der Evolution auf der gesamten Erde. Diese Macht haben wir errungen, ohne dass wir es geplant hatten und ohne die Möglichkeit, uns zu verweigern. Immerhin sind wir nun auch in der Lage, die negativen Folgen unseres Tuns zu erkennen. Wir sind außerdem befähigt, nachzudenken und Verantwortung zu verspüren. Jetzt müssen wir daran arbeiten, das Verantwortungsgefühl in Handeln umzusetzen und die Biosphäre inklusive uns Menschen vor uns selbst zu schützen.

Unser durchaus legitimes Sehnen nach Wohlergehen und Entwicklung hat vielen Menschen Wohlstand beschert – und uns allen nunmehr auch gigantische Probleme. Große Krisen und Herausforderungen halten uns in Atem: Der globale Klimawandel, Versorgungsschwierigkeiten, Verknappung von Wasser, Energie und Böden, Hunger, Krankheiten, Konflikte und Kriege. Warum sollten wir uns eigentlich um den Wald scheren, wenn doch vielleicht viele andere Fragen deutlich dringlicher sind?

Zuweilen hört man heute schon Stimmen – sogar von ehrlich um die Zukunft besorgten Wissenschaftlern –, dass wir es leider so weit haben kommen lassen, dass die Weltrettung nun etwas »schlampig« passieren müsse.<sup>1</sup> Man habe einfach keine Zeit mehr für Purismus. Es wäre zwar ganz schön, auch viele natürliche Wälder zu erhalten, aber das ginge halt nicht mehr.

Weltrettung auf Kosten der letzten Wälder? Tatsächlich ist die Geschichte der menschlichen Zivilisationen in besonderem Maße davon geprägt, dass Wald weichen musste, damit immer mehr Menschen immer besser leben konnten. Wo Wald wächst, können meist nicht in intensiver Form Nahrungsmittel produziert werden. Wald konkurriert mit uns Menschen um Raum, den wir zu benötigen scheinen, um unsere Siedlungen zu bauen, unsere Äcker zu bestellen und unsere Nutztiere aufzuziehen. Aber Wald ist auch im Weg, wenn wir uns auf unseren Straßen und Schienen schnell durch die Landschaft fortbewegen wollen, und scheint selbst im mo-

dernen Zeitalter in industrialisierten Ländern zu viel Platz einzunehmen, den wir dringend benötigen, um mithilfe von Photovoltaik und Windkraftanlagen erneuerbare Energien zu gewinnen, um das gigantische Klimaproblem lösen zu können. Wald wird dabei so schlecht verstanden, dass wir meinen, ihn einfach versetzen zu können. Wird ein alter Baumbestand gerodet, so pflanzt man andernorts einen neuen. Aber die junge Plantage kann den beseitigten Wald nicht ersetzen, sondern lediglich das Gewissen beruhigen.

Eine wesentliche Rechtfertigung für den Wunsch, Wald zu bewahren, ist, dass wir von seinen Produkten profitieren wollen. Den allermeisten Menschen – und vor allem jenen, die mit der Bewirtschaftung von Wäldern Geld verdienen wollen oder müssen – würde in diesem Zusammenhang das Holz einfallen. Auch wenn uns Menschen die Wälder häufig im Weg standen, so hat uns das Holz der Bäume doch überhaupt erst ermöglicht, den Siegeszug um die Welt anzutreten.

Am Anfang war das Feuer. Es erlaubte uns, Nahrung besser verdaulich zu machen, ja, neuartige Nahrungsmittel, die ungekocht giftig oder unbekömmlich sind, für unsere Ernährung zur Verfügung zu stellen. Mithilfe von Feuer konnten wir jagen und unseren Lebensraum effektiv gestalten. Brennholz war der erste Garant dafür, dass wir uns von den Unbilden der Natur ein wenig unabhängig machen konnten. Es erlaubte uns, in kalte und bis dahin nicht für das menschliche Leben geeignete Weltgegenden vorzustoßen. Man konnte irgendwo von Bäumen eingefangene Sonnenenergie an andere Orte transportieren und die Wärme dort zeitverzögert wieder freisetzen. Brennholz ermöglichte, ausgeprägte kalte Jahreszeiten zu überstehen und Licht ins Dunkel von Höhlen und Häusern zu bringen.

Brennholz war auch der erste Treibstoff der Moderne. Die Verbrennung von Bäumen trieb Dampfmaschinen an und leitete somit den Beginn der Industrialisierung ein.<sup>2</sup> Nachdem das Verbrennen von Holz jenseits von Lagerfeuern und gemütlichen Öfen oder Kaminen in Industrieländern etwas aus der Mode gekommen war, wurde es gerade in jüngerer Zeit als vermeintlich umweltfreundlicher Brennstoff sogar zur Stromerzeugung in Holzkraftwerken wiederentdeckt.

Holz ebnete uns auch als Baustoff den Weg in die Zivilisation. Waffen, Ackergeräte, Behälter wie Fässer oder Eimer, Möbel und nicht zuletzt Häuser halfen Men-

schen dabei, sich das Leben zu erleichtern und etwas unabhängiger von der Natur und von einer unregelmäßigen Ressourcenversorgung zu werden. Tatsächlich müsste die Steinzeit vermutlich eher Holzzeit heißen,<sup>3</sup> da viele Instrumente und Werkzeuge wie Beile, Pfeile, Bögen und Hacken vor allem aus Holz bestanden und nur zu einem kleinen Teil aus Stein. Als die Menschen im Gebiet des heutigen England vor etwa 5000 Jahren tonnenschwere Steinblöcke bis zu 250 Kilometer durch die Landschaft bewegten und in Stonehenge eine einzigartige Kultstätte schufen, gelang ihnen dies nur mithilfe von Holz. Damals schon müssen gewaltige Eingriffe in Wälder erfolgt sein. Was viele nicht wissen: Ganz in der Nähe von Stonehenge wurde auch eine Holz-Kultstätte geschaffen, ihr Name ist Woodhenge.<sup>4</sup>

Während die Metalle irgendwann die Steine aus der menschlichen Werkzeug-Technologie verdrängten, blieb das Holz weiterhin präsent – nicht nur in Form von Betten, Regalen, Kisten und Paletten, sondern auch bei der Herstellung von Instrumenten der Hochkultur wie etwa Violinen oder Klavieren. Auch beim Gebäudebau gilt Holz aktuell als besonders modernes Material.<sup>5</sup> Einem großen Teil der Menschheit beschert es bis heute in Form von Balken und Latten ein Dach über dem Kopf, und es kommt selbst beim Errichten von Gebäuden aus Glas, Stahl und Beton als Verschalung oder Gerüst zum Einsatz.

Holz spielte auch auf unserem Weg in die Globalisierung schon früh eine zentrale Rolle. Es war der Baustoff der Flotten, mit denen einige Gesellschaften sich anschickten, andere Weltgegenden für sich zu entdecken und sie als Kolonien zu unterwerfen. Dies begann in der Antike, und die Mittelmeerregion gilt als warnendes Beispiel dafür, wie Schiffs- und Siedlungsbau sowie Landwirtschaft und Holzkohlegewinnung Waldökosysteme unwiederbringlich schädigen oder gar verschwinden lassen können.<sup>6</sup> Im Falle des Mittelmeerraums wird auch deutlich, wie die Zerstörung von Umweltressourcen zur Schwächung und zum Zerfall von politischen Systemen beitragen kann. Dass die dortige Geschichte trotz Waldzerstörung fortgesetzt wurde, lag allerdings nur daran, dass Ressourcen aus anderen Weltregionen herbeigeschafft werden konnten.

Holzknappheit hat vor allem in Europa Umweltgeschichte geschrieben. In mehreren Ländern waren nach dem Mittelalter Wälder in einem derartig schlechten Zustand, dass die wirtschaftlichen und politischen Kon-



*Woodhenge ist eine Kultstätte aus kreisförmig angeordneten Pfählen und nur 3 km entfernt vom weltberühmten Stonehenge gelegen.*

*Es zeigt, dass Holz auch für die kulturelle Entwicklung eine wichtige Bedeutung hatte. Da nur die Pfostenlöcher den Lauf der Zeit überdauert haben, wurde die Anlage rekonstruiert.*





*Bahia im Osten Brasiliens:  
Ein außergewöhnlich artenreicher  
Küstenregenwald wurde für die  
Rinderhaltung zerstört  
(Pierre L. Ibisch, April 2015)*

sequenzen bedrohlich erschienen. Der Bergmann Hans Carl von Carlowitz aus Sachsen erlangte dadurch Berühmtheit, dass er dazu aufrief, sich aus wirtschaftlichen Gründen systematisch der Holzproduktion zu widmen. Im Jahr 1713 schrieb er sein Werk *Sylvicultura oeconomica*. Damit schlug vielleicht nicht wirklich die Geburtsstunde der Nachhaltigkeit, aber es erfolgte die Erfindung der Forstwirtschaft im Sinne eines planvollen Anbaus von Bäumen ähnlich dem Getreide auf Feldern, um benötigte Holzressourcen »nachzuhalten«, also besser kontrollieren zu können.

Trotz dieser alten Bedenken und Lösungsansätze schreitet die Waldvernichtung weltweit vor allem wegen der Ausbreitung der Landwirtschaft, aber auch angetrieben von der Gier nach wertvollen Urwaldhölzern voran. Selbst in industrialisierten Ländern wie Deutschland, in denen es kein nennenswertes Bevölkerungswachstum gibt, werden nach wie vor Wälder für das Anlegen von Tagebauen oder den Straßenbau gerodet. Letztlich bedeutet dies, dass diese Wälder der Gesellschaft nichts – oder im Vergleich zu den alternativen Flächennutzungen nicht genügend – wert sind.

Allein aus der Holznutzungsperspektive liegt es nahe, sich intensiv für Wald und sein Fortbestehen einzusetzen. Inzwischen ist längst klar, wie sehr vor allem funktionstüchtige Wälder Teil unseres globalen Lebensraums sind und wir deshalb ohne sie gar nicht existieren könnten. Wenn ein solcher Garant der menschlichen Existenz und unseres Wohlergehens verloren geht, müssten Ökonom:innen und Politiker:innen eigentlich ein Marktversagen diagnostizieren und gegensteuern. Das ist bisher aber kaum der Fall. Damit ergeht es dem Wald nicht besser als den anderen Bestandteilen des globalen Ökosystems, die wir schon länger als Lebensgrundlagen erkannt haben, ganz gleich, ob es sich um Meere und Fische, fruchtbare Böden, biologische Vielfalt oder gar das Weltklima handelt.

Und was ist mit den jahrzehntelangen internationalen politischen Bemühungen, die Zerstörung unserer Le-

bensgrundlagen zu stoppen? Die Vereinten Nationen haben etwa 1992 zu einem Erdgipfel mit dem Thema »Umwelt und Entwicklung« eingeladen. Das Ergebnis waren globale Umweltgesetze, sogenannte Konventionen. Diese beschäftigen sich etwa mit dem Klima, der biologischen Vielfalt oder der Wüstenbildung. Auch eine Konvention zur Erhaltung der Wälder lag auf dem Verhandlungstisch, die allerdings nicht ernsthaft in Betracht gezogen wurde. Kann es tatsächlich eine Weltrettung ohne Wälder geben?

Leider hat die Erhaltung von Wäldern einen noch schlechteren Stand als andere Felder der Umweltpolitik. In Bezug auf den Wald scheinen die klar definierten, mehr oder weniger kurzfristigen ökonomischen Interessen mit den langfristigen »Nachhaltigkeitszielen« besonders unvereinbar. Das gilt in walddreichen Ländern wie Brasilien, Kanada oder Russland, die sich schwertun, eine effektive Walderhaltung auch nur zu beschließen, weil mit Waldumwandlung oder Holznutzung außerordentlich viele kurzfristige Entwicklungsoptionen und Gewinnmöglichkeiten verbunden zu sein scheinen. Aber dies ist selbst in Industrieländern der Fall, die nicht mehr über sehr viel Wald verfügen und schon gar nicht ihre Wirtschaftskraft aus dem Wald schöpfen. So wurde etwa die Bemühung der Europäischen Kommission, in der EU eine Waldstrategie auf den Weg zu bringen, von Mitgliedsstaaten wie Deutschland bekämpft, die dies mit einer Unausgewogenheit der Strategie begründeten. Die Betrachtung der Umweltziele (Klima und Biodiversität) sei zu einseitig, und der Beitrag bewirtschafteter Wälder und von Holz zur Bioökonomie würde vernachlässigt. Ohnehin wolle man sich nicht von der Staatengemeinschaft in den Umgang mit den Wäldern reinreden lassen. Dieselben Staaten kritisieren allerdings Länder wie Brasilien dafür, dass sie nicht genug für die Walderhaltung täten.

Kann dieses kurzsichtige Verhalten damit zu tun haben, dass viele Menschen Wald nicht wirklich kennen? Dem kann auf den folgenden Seiten abgeholfen werden!



Die Insel Vilm in der Ostsee steht seit 1936 unter Naturschutz, war ab 1959 ein abgeschirmter Ferienort der DDR-Regierung und gehört seit 1994 zum Biosphärenreservat Südost-Rügen. 1527 gab es den letzten großen Holzeinschlag, ab 1812 wurde die Holznutzung ganz eingestellt. Der kleine »Urwald« ist auch ein europäisches Vogelschutz- und Fauna-Flora-Habitat-Gebiet (Pierre L. Ibsich, Mai 2017)



# Wald ist mehr als die Summe seiner Bäume

Wälder sind Ökosysteme. Der Begriff leitet sich ab vom altgriechischen *Oikos*, Haushalt. Systeme sind ein organisiertes und geordnetes Ganzes.

---

Leicht zu verstehen ist das ohne Erläuterung tatsächlich nicht.

---

Was sollen denn Haushaltssysteme in der Natur sein?

---

Es ist fast paradox. Die irdische Natur umgibt uns ganz direkt, und unsere Existenz hängt komplett von ihr ab. Aber es fehlen uns immer noch die allgemein verständlichen Worte, die für alle widerspiegeln, worum es geht.

Es steckt so viel in diesem Begriff und im Konzept des Ökosystems, dass er oftmals vereinfacht wird, um ihn auch jenseits von Fachkreisen verwenden zu können.

Ein Ökosystem wird häufig darüber definiert, dass es aus lebenden Organismen, einer Lebensgemeinschaft oder Biozönose, und einem Lebensraum, dem Biotop, besteht. Diese Definition wird dem Schöpfer der Idee, Arthur Tansley, allerdings nicht gerecht, der ja just das Ökosystem erfand, um den Begriff Gemeinschaft zu vermeiden. Es ging dabei doch wesentlich um das System und das Systemische, also das Zusammenwirken, und nicht nur um das Ergebnis der Teile.

Zum einen gilt: »Wald ist mehr als die Summe seiner Bäume«, zum anderen ergibt sich nicht automatisch ein Ökosystem dadurch, dass man diverse Lebewesen zusammen an einem Ort hält. Zoologische oder Botanische Gärten sind keine Ökosysteme, sondern müssen

mühsam gepflegt und gewartet werden, damit sie erhalten bleiben. Was also macht einen Wald »Öko« und was zum »System«?

Das Ökosystemverständnis ist so wichtig, dass es sich lohnt, hier etwas genauer hinzuschauen. Dabei müssen nicht nur die zentralen Bestandteile von Ökosystemen verstanden werden, sondern vor allem auch die Prozesse in ihnen, der Treibstoff, der sie am Laufen hält, ihre Wirkungen und Funktionen. Ökosysteme wie Wälder zu verstehen und zu bewirtschaften, bedeutet daher weniger, die Einzelteile möglichst genau zu kennen und einzeln zu bearbeiten, als vielmehr, in Zusammenhängen zu denken. In den folgenden Abschnitten werden wir uns deshalb mit vielerlei physikalischen, chemischen und biologischen Zusammenhängen der Wälder vertraut machen. Wer von Bäumen und Wäldern leben will, darf Moleküle genauso wenig ignorieren wie das Phänomen des Lebens an sich. Und, keine Sorge, auch der Mensch kommt noch hinzu – als Teil der Ökosysteme.

## Die einzelnen Teile im Verhältnis zum Ganzen

Gedacht sei an dieser Stelle des herausragenden Forschers und Denkers Alexander von Humboldt. Folgen wir seinem »Bestreben, die Erscheinungen der körperlichen Dinge in ihrem allgemeinen Zusammenhange, die Natur als ein durch innere Kräfte bewegtes und belebtes Ganzes aufzufassen«. Auch wenn es scheinbar »nur« um den Wald geht, mögen wir uns einem kosmischen Humboldtschen Wissenschaftsverständnis verpflichtet sehen. »Es sind (...) die Einzelheiten im Naturwissen ihrem inneren Wesen nach fähig wie durch eine aneignende Kraft sich gegenseitig zu befruchten«,<sup>1</sup> und »in der Lehre vom Kosmos wird das Einzelne nur in seinem Verhältniß zum Ganzen, als Theil der Welterscheinungen betrachtet.«<sup>2</sup>

<sup>1</sup> A. von Humboldt (1845): Kosmos. Entwurf einer physischen Weltbeschreibung. Vollständige Ausgabe in 2 Bänden. Faksimile hrsg. von H.M. Entzenberger, Eichborn, Frankfurt, 2004. S. 3.  
<sup>2</sup> Ebenda. S. 25

## Wälder sind Systeme

*»Es ist an der Zeit, die rein reduktionistische molekulare Sichtweise durch eine neue und wirklich ganzheitliche Sichtweise der lebenden Welt zu ersetzen, bei der Evolution, Emergenz und die der Biologie innewohnende Komplexität im Vordergrund stehen.«*

Carl Woese (2004)<sup>1</sup>

Wir benutzen das Wort System recht häufig in der Alltagssprache. Im Altgriechischen bedeutet *systema* ein »organisiertes Ganzes, ein aus Teilen zusammengesetztes Ganzes«. Es geht aus dem Wortstamm *synistanai*, »zusammenfügen, organisieren, in Ordnung bringen«, hervor. Die Bedeutung gemäß einer »Reihe von zusammenhängenden Prinzipien, Fakten, Ideen usw.« kam erstmals in den 1630er-Jahren auf. Die Benutzung als »tierischer Körper als organisiertes Ganzes, Summe der Lebensprozesse in einem Organismus« ist seit den 1680er-Jahren belegt.<sup>2</sup>

Seit der Antike fragten sich Menschen, warum es in der Natur eine Ordnung gibt, wie Formen entstehen und alles zusammengehört. Erst im 20. Jahrhundert entstand eine allgemeine Systemtheorie, die von Ludwig von Bertalanffy vorgeschlagen wurde.<sup>3</sup> Sie hat viele Wissenschaften befruchtet und führte zu einem gänzlich neuen Denken in Zusammenhängen. Systemik ist eine Grundbedingung für die Wissenschaft vom Haushalt in der Natur, die Ökologie.

Systeme bestehen aus verschiedenen Komponenten, die miteinander in Wechselwirkung treten. Sie interagieren und tauschen etwas aus, was jeweils Wirkungen hervor-

bringt. Die wichtigste Konsequenz ist, dass diese Komponenten ein größeres Ganzes bilden, das ganz andere Eigenschaften hat als die Einzelteile. Dieses Phänomen nennt man Emergenz. Systeme haben neu entstehende, also emergente Eigenschaften. Systeme können lebendig sein, aber auch unbelebt. Unbelebte Systeme sind zum Beispiel die Atome oder Moleküle, die jeweils aus einzelnen Komponenten bestehen. Diese können sich anziehen und Bindungen eingehen. Wenn etwa zwei Wasserstoffatome und ein Sauerstoffatom miteinander reagieren und ein Molekül bilden, entsteht ein Wassermolekül. Aus unsichtbaren Gasen wird bei bestimmten Temperaturen eine sichtbare Flüssigkeit mit emergenten Eigenschaften, die nichts mit den Eigenschaften der beiden Gase zu tun haben.

Aus einzelnen Kohlenstoffatomen werden im Verbund Diamanten, Graphit oder Fullerene. Drei unterschiedliche Stoffe, weich, hart, löslich, elektrisch leitend oder eben auch nicht. Allein zwischen dem fast wertlosen Schmiermittel Graphit und den so wertgeschätzten Diamanten könnte der wahrgenommene Unterschied kaum größer sein. 20 Gramm Graphit kosten 50 Cent, 20-Gramm-Diamanten können schon mal Dutzende von Millionen Euro kosten. Im Falle des Kohlenstoffs entscheiden die räumliche Anordnung und die Art, wie die Kohlenstoffatome miteinander verbunden sind, über die emergenten Stoffeigenschaften. Hier gilt schon einmal die erstaunliche Einsicht: Nicht die Teile bestimmen die Eigenschaften dessen, was ist, sondern deren Wechselwirkungen!

Kohlenstoff ist für das Leben – im wahrsten Sinne des Wortes – von elementarer Bedeutung. Und wenn sich zu sechs Kohlenstoffatomen zwölf Wasserstoff- und sechs Sauerstoffatome hinzugesellen, kann Glucose bezie-



*Mit großer Kraft und Anpassungsfähigkeit können Wälder die unmöglichsten Standorte bezwingen. Eine »Felsenbuche« im Monte-Cimino-Urwald, Lazio, Italien, der zur UNESCO-Weltnaturerbebestätte »Alte Buchenwälder und Buchenurwälder der Karpaten und anderer Regionen Europas« gehört (Pierre L. Ibisch, September 2018)*

ungsweise Traubenzucker entstehen. In der Natur ist eine solche chemische Reaktion die Grundlage von fast allem Leben, das wir kennen. Es sind einzellige Algen oder die Chloroplasten in den grünen Pflanzen, die schrittweise zunächst Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen und dann Kohlendioxid, ein Molekül aus einem Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatomen, mit dem Wasserstoff reagieren lassen, sodass am Ende Glucose und wieder Wasser entsteht. Sie benötigen dafür Lichtenergie, die von der Sonne kommt. Außerdem wird der Sauerstoff als Abfallprodukt frei. Der Prozess heißt Photosynthese, also »Licht-Herstellung«.

Andere Organismen wie etwa die Tiere können eine Kette von chemischen Reaktionen in ihren Zellen ablaufen lassen, die die Photosynthese quasi umkehren können. Sie zerlegen Glucose mithilfe von Sauerstoff, produzieren dabei Wasser und Kohlendioxid und können so die Energie für ihr eigenes Leben gewinnen, welche zuvor von den Pflanzen im Zuckermolekül festgehalten wurde. Man bezeichnet den Vorgang als Atmung. Alle Lebewesen sind für sich genommen Systeme, die wegen der Zusammenarbeit ihrer Moleküle und Zellen existieren und funktionieren. In dem Moment, in dem diese Zusammenarbeit aufhört, sterben die Lebewesen und zerfallen in ihre Einzelteile.

Die streng organisiert ablaufenden Wechselwirkungen von Molekülen in Organismen, die etwas miteinander tun – in diesem Falle fressen die einen die anderen auf –, haben emergente Eigenschaften nicht nur des lebendigen Wesens, sondern auch des größeren Systems zur Folge. In diesem Falle bedeutet es, dass ein toter Lebensraum aus Gestein, Wasser und Gasen in der Atmosphäre belebt und damit zur Biosphäre wird. Die lebenden Organismen nehmen Einfluss auf ihre Umwelt. Wenn Pflanzen mehr Sauerstoff produzieren, als von den Tieren wieder veratmet wird, verändert sich die Zusammensetzung der Atmosphäre. Dies geschah zu Beginn der Evolution der Pflanzen auf ziemlich dramatische Weise. Nach der Entwicklung der Photosynthese reicherte sich vor etwa 2,2 Milliarden Jahren das zuvor unbekannte Gas Sauerstoff in der Atmosphäre an.<sup>4</sup> Sauerstoff ist sehr reaktionsfreudig: Er bringt etwa Eisen zum Rosten, und wenn er auf Wasserstoff trifft, kommt es zu einer explosionsartigen Reaktion, und es entsteht Wasser. Für die frühen Organismen war dieser aggressive Sauerstoff zunächst einmal ein Gift. Sie mussten sich erst auf ihn einstellen

und Strategien entwickeln, ihn unschädlich zu machen – bis sie dann sogar von ihm abhängig wurden.

Das ist typisch für Systeme: Die emergenten Eigenschaften können weitere Folgewirkungen und Kettenreaktionen auslösen, die oftmals auch auf die Auslöser zurückwirken. Das nennt man eine Rückkopplung. In diesem Fall »erfand« das Leben die Photosynthese und brachte mit dem Zucker Nährstoffe in Umlauf, welche neue Lebensformen wie zum Beispiel Tiere erst ermöglichten. Damit hat sich das Leben durch die Schaffung von Lizenzen für neue Organismen selbst verstärkt beziehungsweise vervielfältigt: eine positive Rückkopplung. Positiv war das allerdings nicht für die Alteingesessenen. Die Ur-Bakterien, die Archaeen, von denen die Evolution aller anderen Organismen ausging, wurden an Standorte verdrängt, an denen es keinen für sie giftigen Sauerstoff gibt. Sie leben beispielsweise in vulkanischen Quellen oder besiedelten nach der Evolution von Tieren deren Darm (was ein bisschen unfair für die »Erfinder« des Lebens klingt).

Der Sauerstoff wurde zum Motor der Evolution.<sup>5</sup> Das Leben hat sich durch seine Produktion nicht selbst vergiftet, sondern vielmehr die Grundlage für die schiere Explosion von Lebensformen geschaffen. Bis dato waren alle Wesen darauf angewiesen, durch das Zerlegen von anorganischen Molekülen wie etwa Sulfaten zu existieren. Dann hat die Entwicklung der beiden Schlüsselinnovationen Photosynthese und Atmung eine regelrechte Eskalation von Rückkopplungen ausgelöst.

Die verschiedenen Wechselwirkungen in Systemen – Reaktionen, Gegenreaktionen, Rückkopplungen – bewirken nebenbei eine zentrale Eigenschaft von Systemen, die man als gegeben hinnimmt. Systeme organisieren sich nämlich selbst, ohne dass es extern angeordnet werden müsste. Weil Einzelteile zusammentreffen und interagieren, entsteht eine Ordnung, und es entwickeln sich oft auch Prozesse, die diese Ordnung und die Organisation noch verstärken oder stabilisieren. Moment: Die Moleküle in unserem Körper arbeiten miteinander und halten uns am Leben, ohne dass das zentral und im Detail irgendwo befohlen und gesteuert wird? Braucht es dafür nicht organisierende Kräfte? Ein wenig Geduld, diesen Nebel werden wir noch lichten.

Ein Ökosystem entsteht aus verschiedenen Lebewesen, die geordnet miteinander in Wechselwirkung treten. Allerdings ist die Ordnung und Zusammenset-

zung des Systems weniger streng geregelt als in den einzelnen Lebewesen selbst. Dennoch können Ökosysteme zu einem größeren Ganzen werden. Ein Waldökosystem unterscheidet sich von einem Moorökosystem oder einem Steppenökosystem durch die teilnehmenden Arten, die äußere Erscheinung und die speziellen Funktionen. Weil die Komponenten in einem System viel intensiver miteinander wechselwirken als mit anderen Teilen außerhalb, entstehen mehr oder weniger sichtbare Grenzen. Diese sind dabei trotzdem offen. Ein Vogel kann vom Wald auf einen angrenzenden Strand fliegen, Sand eines Dünenökosystems kann vom Strand in den benachbarten Kiefernwald verblasen werden. Dennoch bleibt Wald Wald und Düne Düne. Auch hier taucht dieselbe Frage wie bei unserem Körper auf: Wie erhalten und organisieren sich solche Ökosysteme?

Schauen wir uns eines dieser Systeme, den Wald, einmal genauer an. Sein auffälligstes Merkmal sind die Bäume. Sie erheben sich hoch über die Landoberfläche und damit über andere Pflanzen, ein systemischer Prozess par excellence: Grüne Pflanzen benötigen Sonnenlicht; je mehr davon zu haben ist, desto besser. Insofern ist es schlüssig, dass im Zuge der Evolution Konstruktionsmaterialien entwickelt wurden, die es Pflanzen ermöglichten, größer zu werden, näher und unbeschattet am Licht zu sein und eine Krone zu entwickeln, die viel größer ist als der Fleck, an dem sie wurzelten.

Dank Zellulose und vor allem Lignine, also der Evolution von Holz, konnten Pflanzen regelrechte Türme bilden – es entstanden Bäume. Lignine (von lateinisch *lignum* = Holz) sind komplexe organische Moleküle, die aus mehreren Bauteilen bestehen. Sie werden in die Zellwände eingelagert und verleihen ihnen damit eine große Festigkeit. Sie machen bis zu einem Drittel der Trockenmasse von holzigen Pflanzen aus und gehören deshalb in der Natur zu den häufigsten von Lebewesen hergestellten Stoffen. Man kann sich die Entstehung von Bäumen als ein evolutives Wettrüsten vorstellen. Der Schattenwurf des ersten Bäumchens bedeutete eine Benachteiligung der am Boden gebliebenen Pflanzen. Diese wurden dadurch angeregt, ebenfalls hochwüchsige Konstruktionen zu entwickeln und vielleicht noch schneller zu wachsen. Schnelles Wachstum macht Pflanzen instabil, was nur durch mehr Materialeinsatz verhindert werden kann. All das kostet viel. Und schon damals galt: Wie kann man kostengünstigere Alternativen finden?

Einige Pflanzen wie die Lianen machten es sich leicht und begannen, an den Bäumen nach oben zu klettern. Andere, die sogenannten Aufsitzerpflanzen oder Epiphyten, machten es sich direkt oben an den Baumstämmen oder im Kronenraum auf den Ästen bequem. Weshalb Kraft in eine Stammbildung investieren, wenn das schon jemand anderes gemacht hat? Es gibt allerdings einen Haken: Die Lebensbedingungen sind hier deutlich extremer als am Boden. Pflanzen brauchen nicht nur Licht und Luft, sondern auch Wasser und Nährstoffe. Ohne Bodenkontakt ist an die beiden letztgenannten Stoffe kaum heranzukommen, außer, man ist besonders erfinderisch. Ein schönes Beispiel hierfür sind die Ananagewächse, die Bromelien. Einige bilden mit ihren Blättern einen riesigen Trichter, mit dem sie Regenwasser einfangen, je nach Art können es viele Liter sein. Und weil es nun quasi an der falschen Stelle sitzt, also nicht unten an den Wurzeln, sondern oben, wird das kühle Nass einfach über die Blätter aufgenommen.

Einige Pflanzen drehten im Laufe der Evolution den Spieß einfach um und starteten den Wettlauf um das Licht bereits im Ziel: Sie keimen zunächst oben auf einem Baum – die Samen können dort beispielsweise per Vogeltransport hingelangen –, senden Wurzeln zum Boden und erstarken dann. Solche Halb-Epiphyten können im Extremfall den ehemaligen Trägerbaum komplett umwachsen, ihn regelrecht erwürgen und dann seinen Platz einnehmen, wie etwa die Würgefeigen. Wer als Pflanze im Wald keinen Stamm bildet und einfach am Boden bleibt, muss sich mit wenig Licht begnügen oder die Zeit mit mehr Licht ausnutzen, in der Bäume – etwa im Frühjahr oder in einer Trockenzeit – keine Blätter haben.

All diese Innovationen in den Ökosystemen erfolgen durch das Zusammenspiel von Mutationen, also Veränderungen des genetischen Programms, welches die Lösungen für die verschiedenen Lebensleistungen in sich speichert, und die Selektion. Was sich bewährt, kommt voran. Je mehr Veränderungen und Herausforderungen es in einem System gibt, desto mehr müssen sich seine Komponenten daran »abarbeiten« und Lösungen finden. Die Entstehung der Bäume und der dreidimensionalen Struktur von Wäldern hat die Evolution der Wuchsformen- und Lebensstrategievielfalt von Pflanzen ungemein befeuert – wiederum ein Beispiel für die Eskalation von rückkoppelnden Prozessen.

Der Vorteil, Baum zu werden, ist so groß, dass der

Baumwuchs in der Evolution viele Male unabhängig voneinander entwickelt wurde. Die baumförmigen Lebewesen stammen nicht alle von einem einzigen Ur-Baum ab. Vielmehr entstanden Bäume bei Farnen und Farnartigen, Schachtelhalmen, Nadelbaumartigen und Blütenpflanzen unabhängig voneinander und mehrfach. Die ersten Bäume existierten im Devon vor ca. 400 Millionen Jahren (Cladoxylopsida).<sup>6</sup> *Eospermatopteris*, ein Gewächs mit farnartigen Wedeln, wurde bereits 30 Meter hoch oder höher. Im Karbon, vor ca. 300 bis 360 Millionen Jahren, existierten ausgedehnte Sumpfwälder aus *Sigillaria*- und *Lepidodendron*-Bäumen aus der Verwandtschaft der Bärlappartigen mit einer hübschen Rinde, die knopf- oder rautenförmige Muster aufwies. Ihre Überbleibsel sind noch heute unterirdisch massenhaft vorhanden und werden von uns ans Tageslicht geholt – als Kohle. Im Zeitalter der Dinosaurier, dem Jura, traten erste Nadelbaumartige auf, die schon heutigen Bäumen nahestanden. So ähneln einige bis 170 Millionen Jahre alte Fossilien von *Ginkgo*-Bäumen noch heute lebenden Verwandten.<sup>7</sup>

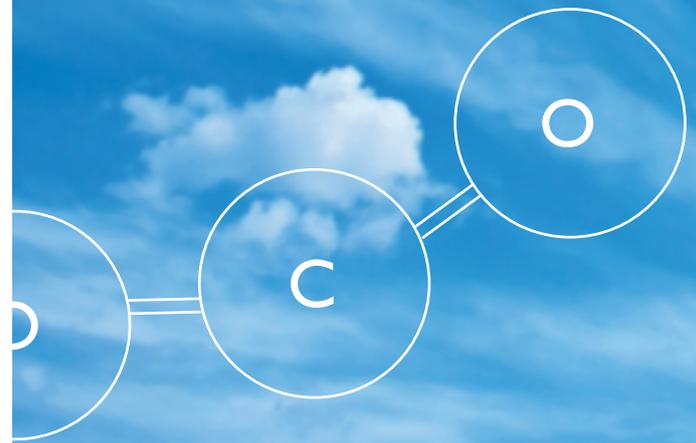
Die Entstehung von Bäumen gab der Evolution auf der Erde eine völlig neue Richtung: Wälder begannen, in das Weltklima einzugreifen. Im Karbon entstanden dadurch, dass die Bäume der ersten großen Wälder große Mengen Kohlendioxid aufnahmen und ihre Stämme schließlich in den Sümpfen nur unvollständig zersetzt wurden, erstmals große, von Landorganismen verursachte Kohlenstofflager. Kohlenstoff ist nicht nur als Bauelement für das Leben von zentraler Bedeutung, sondern nimmt – in Verbindung mit Sauerstoff oder Wasserstoff – in der Atmosphäre steuernden Einfluss auf die Lebensbedingungen. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) sind wichtige Treibhausgase, die dafür sorgen, dass auf der Erde eine für das Leben günstige Temperatur herrscht.

Die in der Erdgeschichte neu auftretende Ausbildung von kohlenstoffreichen durchwurzelteten Waldböden wird dazu beigetragen haben, dass der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre sank und sich damit das Klima veränderte. In der Silurzeit (vor 443,4 bis ca. 419 Millionen Jahren) waren die Böden schon beeindruckend dicht und tief von Wurzeln durchzogen. Im Devon (vor 419 bis ca. 359 Millionen Jahren) wurden dann Holzpflanzen und Bäume dominant, was zu einem noch höheren Kohlen-

## Kohlendioxid: kleines Molekül, große Klimawirkung

Das CO<sub>2</sub>-Molekül ist etwas ganz Besonderes, weil es in der Atmosphäre mit unterschiedlichen Licht- und Wärmestrahlungen jeweils anders umgeht. Licht- und Wärmestrahlung mit großen Wellenlängen werden absorbiert, kurzwelliges Licht nicht. Das führt dazu, dass energiereiches Licht aus dem Weltraum auf die Erdoberfläche wie von einer Glasscheibe durchgelassen wird. Aber ein großer Teil der von der Erde reflektierten Wärmestrahlung bleibt in dem die Erde umgebenden Treibhaus gefangen. Dies führt zur Erwärmung, und deshalb reguliert die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre die Temperatur. CO<sub>2</sub> wird aus dem Erdinnern etwa bei Vulkanausbrüchen freigesetzt.

Würde das Kohlendioxid nicht wieder eingefangen, wäre mit einer stetigen Erwärmung zu rechnen. Das Einfangen passiert unter anderem bei der Entstehung von Lebewesen mit Kalkschalen – Wasser, Calcium und CO<sub>2</sub> reagieren zu Calciumcarbonat, dem Kalk. Wenn die Kalkschalen von Meereslebewesen wie Foraminiferen oder Muscheln und anderen auf den Ozeanboden sinken, bildet sich Kalkstein, der den Kohlenstoff für Jahrmillionen aus der Atmosphäre fernhalten kann. Der andere Mechanismus des Kohlenstoff-Einfangens geschieht über die Photosynthese der Pflanzen, die aus Luft und Wasser Zucker produzieren und den Grundstein für sämtliche Biomassebildung legen.





In früheren Erdzeitaltern war die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre wesentlich höher: Vor etwa 60 bis 52 Millionen Jahren waren 2000 von jeder Million Teilchen in der Atmosphäre Kohlendioxid (also 2000 »Promillionstel« oder ppm beziehungsweise 2 Prozent). Als es viel CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre und eine überaus produktive Vegetation auf der Erde gab, lag auch der Sauerstoffgehalt höher. Das hatte zur Folge, dass etwa Insekten wie Libellen gigantisch groß werden konnten und eine Flügelspannweite von bis zu 70 Zentimetern erreichten.<sup>1</sup>

In dem Zeitraum vor 55 und 40 Millionen Jahren gab es einen sprunghaften Rückgang möglicherweise durch verringerte CO<sub>2</sub>-Ausgasung durch geologische Prozesse. Ab einer Zeit vor etwa 24 Millionen Jahren scheint die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre unter 500 ppm geblieben zu sein und blieb auch viel stabiler als vorher.<sup>2</sup>

Wissenschaftler haben im Rahmen der Klimawandelforschung die Zusammenhänge zwischen den globalen Temperaturen und der Kohlendioxidkonzentration intensiv untersucht. Dem Treibhaus-Bild folgend unterscheiden sie Heiß-, Warm- und Kühl- und Eiszeiten. Die verschiedenen Klimaperioden entstanden aus einem Wechselspiel unter anderem von geologischen Ereignissen, der Lage der Kontinentalplatten auf der Erde, der Sonneneinstrahlung, der Eis- und Glet-

scherbildung sowie der Vegetationsentwicklung. Auch die Klimaentwicklung ist ein systemischer Prozess, der sich aus den Wechselwirkungen der Komponenten ergibt. Das führte dazu, dass sich nicht ständig die gleichen Klimazustände wiederholten, sondern dass auch immer wieder gänzlich neuartige Situationen hervorgerufen wurden.

Ab der Zeit der Dinosaurier (Kreidezeit) gab es für viele Millionen Jahre Warm- und Heißhauszustände, die mehr als 5 bis 10 °C wärmer waren als heute. Vor 34 Millionen Jahren ging das Warmhaus Erde in einen Kühlhauszustand über. Die Temperaturen sanken stark ab, die Antarktis vergletscherte. Die später folgende Eiszeit war davon geprägt, dass auch die Nordhalbkugel mal mehr und mal weniger vergletscherte. Die periodisch wiederkehrenden Eiszeiten wurden ein wichtiger Treiber von biologischer Evolution und ökologischen Prozessen in Nordamerika und Eurasien. Sie hatten aber auch in den Tropen bedeutsame Auswirkungen, da in den kalten Zeiten weltweit weniger Niederschläge fielen.

Seit ca. 3,3 Millionen Jahren sind Klima, Atmosphäre und Biosphäre in einen Zustand eingetreten, den es vergleichbar in den 60 Millionen Jahren und wohl noch viel länger zuvor niemals gegeben hat.<sup>3</sup> Neben der Verteilung der Kontinente auf dem Globus dürfte unter anderem auch das Leben (vor allem in den Ozeanen) für den neuen Zustand bedeutsam gewesen sein.

<sup>1</sup> C. Barras (2019): Scientists have discovered the world's oldest forest—and its radical impact on life. *Science*, 10.1126/science.aba6333.

<sup>2</sup> P. Pearson & M. Palmer (2000): Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature* 406, 695–699. 10.1038/35021000.

<sup>3</sup> T. Westerhold et al. (2020): An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, 369, 1383–1387. 10.1126/science.aba6853.