

NATUR UND LANDSCHAFT

Zeitschrift für Naturschutz und Landschaftspflege

97. Jahrgang 2022 Heft

Seiten

DOI:

Ein ökosystembasierter Ansatz für den Umgang mit der Waldkrise in der Klimakrise

An ecosystem-based approach for addressing the forest crisis amid the climate crisis

Pierre L. Ibisch

Zusammenfassung

Die vorherrschenden Strömungen in Diskurs und Praxis forstlicher Klimawandelanpassungen stehen einem ökosystembasierten Ansatz entgegen. Es wird auf Baumarten fokussiert; aktive Anpassung bedeutet oftmals das Anpflanzen ökosystemfremder Arten. Die Bemühungen, zukünftige Waldtypen möglichst artenscharf zu definieren, offenbaren ein deterministisches Gestaltungsparadigma. Dieses kann darauf zurückgeführt werden, dass die bioenergetisch bzw. thermodynamisch untermauerte Nichtgleichgewichtsökologie nicht rezipiert wurde. Auf der Grundlage aktueller systemökologischer Theorien und Befunde wird in zehn Prinzipien ein Ansatz ökosystembasierten Waldmanagements skizziert. Ökosystemfunktionalität kann thermodynamisch beschrieben und quantifiziert werden; im Mittelpunkt steht die Energiedissipation(sfähigkeit). Ökosystembiomasse und -informationsgehalt sowie ein kohärentes holarchisches Netzwerk sind die Grundlage für die physikalische Arbeitsfähigkeit, aber auch für Resistenz und Resilienz. Aus den thermodynamischen Eigenschaften und der Komplexität ergeben sich ontische Offenheit und Unbestimmtheit von Waldökosystemen. Ein ökosystembasiertes Waldmanagement fokussiert auf Strukturen und Prozesse, die Kühlung und Wasserrückhaltung sowie Selbstregulation im System vermitteln.

Waldkrise – Waldbewirtschaftung – ökosystembasiertes Waldmanagement – komplexe Systeme – Funktionalität – Systemtheorie

Abstract

The prevailing discourse and practice of forestry-related climate change adaptation runs counter to an ecosystem-based approach. There is a focus on tree species; active adaptation often means planting species alien to the ecosystem. Efforts to define future forest types in a species-specific manner as possible reveal a deterministic design paradigm. This can be attributed to the fact that bioenergetically or thermodynamically underpinned non-equilibrium ecology has not been taken up. Based on current systems ecology theories and findings, this article presents 10 principles outlining an approach towards ecosystem-based forest management. Ecosystem functionality can be described and quantified thermodynamically; the focus is on energy dissipation (or the capacity for energy dissipation). Ecosystem biomass and information content and a coherent holarchic network are the basis for physical working capacity, but also for resistance and resilience. Thermodynamic properties and complexity give rise to ontic openness and indeterminacy of forest ecosystems. Ecosystem-based forest management focuses on structures and processes that mediate cooling and water retention as well as self-regulation in the system.

Forest crisis – Forest management – Ecosystem-based forest management – Complex systems – Functionality – System theory

Manuskripteinreichung: 9.9.2021, Annahme: 7.4.2022

DOI: 10.19217/NuL2022-07-02

1 Einleitung

Nach den durch extreme Hitze, Trockenheit und andere Extremwetterereignisse gekennzeichneten letzten Jahren herrscht Konsens, dass es den Wäldern in Deutschland und in weiteren Teilen Mitteleuropas nicht gut geht. Zwischen 2013 und 2020 zeigten ca. 15 % der Wälder einen Rückgang der Vitalitätswerte auf; im Falle der Nadelbaumforsten sogar über 20 % (Ibisch et al. 2021). Ganze Landstriche sind von toten Bäumen geprägt, auf Abertausenden von Hektar entstehen nach Räumung des „Schadholzes“ Kahlflächen. In den komplex interagierenden biologischen und ökologischen Systemen werden kritische Kipppunkte erreicht; die Situation scheint sich beschleunigt zuzuspitzen und einem kritischen Wendepunkt zuzustreben, der entsprechende Entscheidungen erfordert. Deshalb kann im Einklang mit dem altgriechischen Begriff „krisis“ von einer „Waldkrise“ gesprochen werden. Im medizinischen Kontext bedeutet eine Krise eine plötzliche schlagartige Verstärkung der Symptome einer Krankheit. Bezüglich des sich zuspitzenden anthropogenen Klimawandels wurde die Bezeichnung „Klimakrise“

längst eingeführt (Archer, Rahmstorf 2010). Waldkrise und Klimakrise stehen miteinander in Verbindung und müssen gemeinsam betrachtet werden (Ibisch et al. 2021).

Eine wichtige Frage im Kontext der Waldkrise betrifft den Umgang mit toten bzw. absterbenden Baumbeständen. Viele Waldbewirtschaftenden und -bewirtschafter betreiben – oft mit der Absicht der Borkenkäferbekämpfung, selbst in Schutzgebieten und mit Unterstützung staatlicher Förderprogramme sowie mit juristischer Rückendeckung (Staatsanwaltschaft Koblenz 2021) – eine vollständige Ernte der geschädigten Bäume und die Räumung der entsprechenden Waldflächen, um hernach durch Pflanzung neuer Bestände zu begründen (Abb. 1, S. 326). Dies geschieht auch auf der Grundlage eines anthropogenen Waldverständnisses. „Unser Wald“ sei „Natur aus Försterhand“ (BMEL 2019) und könne ohne Betreuung und Pflege durch den Menschen nicht produktiv bestehen. Eine häufig geäußerte Annahme ist, dass der menschengemachte Klimawandel das Anpassungspotenzial der Natur überstrapazierte und deshalb eine aktive Anpassung nötig sei. Das Verständnis einer solchen aktiven Anpassung bezieht sich in vielen forstlichen Debatten meist auf die Baumarten (z. B. de Avila et al. 2021).



Abb. 1: Kahlschläge und Biomasserräumungen reduzieren u. a. durch Erwärmung und Austrocknung des Bodens die Funktionstüchtigkeit und Regenerationskapazität von Waldökosystemen (Fichtenkalamitätsfläche im Fauna-Flora-Habitat- und Wasserschutzbereich Montabaurer Höhe, Rheinland-Pfalz). (Foto: [Pierre Ibisch](#), 21. April 2021)

Fig. 1: Clear-cutting and biomass clearing reduces the functionality and regeneration capacity of forest ecosystems, among other things by warming and drying out the soil (spruce calamity area at Montabaurer Höhe, Rhineland-Palatinate; Special Area of Conservation and Water Conservation Area).

Dies führt vielerorts sogar zum Anlegen neuer Monokulturen – statt der heimischen Fichte (*Picea abies*) werden nun vermehrt eingeführte Arten wie Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) oder Japanische Lärche (*Larix kaempferi*) angepflanzt, um den „klimaresilienten Wald von morgen“ zu gestalten (Abb. 2).

Ein kontrastierender Ansatz geht davon aus, dass ökosystemare Prozesse besser genutzt werden müssten und dass diese durchaus geeignet seien, kostengünstig die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit von Ökosystemen zu fördern. Hierbei spielt z. B. die natürliche Verjüngung, aber auch das Totholz auf Kalamitätsflächen eine wichtige Rolle. Entsprechende Vorschläge, den Waldökosystemen mehr Zeit und Raum für die natürliche Erholung zu geben, werden von einigen Akteuren als nicht wissenschaftsbasierte Romantik oder gar Ideologie abgetan. Entsprechend äußern sich etwa Waldbauwissenschaftler in der Öffentlichkeit: Der Wissenschaftliche Beirat für Waldpolitik könne „es sich nicht leisten, mit evidenzfreien Narrativen, wie über Selbstheilungskräfte der Natur, Politikberatung zu betreiben“ (Baier, Weiss 2020); viele Naturschützer ließen „keine evidenzbasierte Sicht“ zu, das erinnere „an das weit verbreitete Faible für Homöopathie“ (Kollenbroich et al. 2021).

Angesichts des Diskurses forstlicher Klimawandelanpassung, der einem ökosystembasierten Ansatz entgegenzustehen scheint, stellt sich die Frage, ob die Erkenntnisse der Ökosystemökologie hinreichend rezipiert worden sind. Deshalb ist es das Ziel dieser Arbeit, auf der Grundlage der systemökologischen Theorien und Befunde einen ökosystembasierten Ansatz für einen Umgang mit der Waldkrise zu skizzieren.

2 Ignoriert die Betrachtung von Bäumen im Klimawandel das Waldökosystem und dessen Unberechenbarkeit?

Seit der Jahrtausendwende werden die Folgen des anthropogenen Klimawandels für die Ökosysteme und die Waldbewirtschaftung immer intensiver diskutiert (vgl. [Ibisch 2005, 2006; Bolte, Ibisch 2007; Spathelf et al. 2008](#)). Besonders der Jahrtausendsommer 2003 führte zu einem verstärkten Nachdenken bei Wissenschaftlerinnen



Abb. 2: Nach Kahlschlag und Totholzräumung kommt es zum Absterben der gepflanzten Douglasien (*Pseudotsuga menziesii*) und zur Vergrasung (Fauna-Flora-Habitat-Gebiet bei Königshütte, Harz, Sachsen-Anhalt). (Foto: [Pierre Ibisch](#), 28. Mai 2021)

Fig. 2: After clear-cutting and deadwood clearance, the planted Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) die and the area becomes overgrown with grass (Special Area of Conservation near Königshütte, Harz, Saxony-Anhalt).

und Wissenschaftlern sowie in der Praxis darüber, wie und wann theoretisch denkbare Szenarien zu ernsthaften Schädigungen führen könnten und wie damit umzugehen sei. Auch in forstlichen bzw. waldökologischen Kreisen verstärkte sich die Klimawandelfolgenforschung.

Zunächst war ein logischer Impuls, die Gefährdung, also Sensitivität und Vulnerabilität, besser zu erfassen. Zwar war frühzeitig klar, dass die Unsicherheit bzgl. plausibler Verläufe des Klimawandels und der Ökosystemreaktionen unfassbar groß sein könnte, doch folgte eine Periode des intensiven Modellierens, das auch von der sich rasch verbessernden Rechenleistung getrieben wurde. Entsprechend wurde kritisiert, dass die Ansätze, die sich mit dem Modellieren zukünftiger Artenareale beschäftigten, der Komplexität der Veränderungen oft nicht gerecht würden ([Bolte et al. 2008; Sieck et al. 2011](#)). Nach den Ansätzen der „bioklimatischen Hüllen“, die aus einigen Klimaparametern die Arealtauglichkeit für einzelne Arten ableiten, wurden auch komplexere Vegetationsmodelle vorgeschlagen. Den Modellen war gemein, dass sie mit vertretbarem Aufwand hypothesenbasierte, aber flächenscharfe Karten erzeugten, die eine starke Suggestionskraft entfalten können. Da einzelne Baumarten für die Forstwirtschaft eine herausragende Bedeutung haben, ist nachvollziehbar, dass immer wieder modelliert wird, ob diese zu den Gewinnern oder Verlierern des Klimawandels gehören könnten (z. B. [Dyderski et al. 2018](#)). [Pecchi et al. \(2019\)](#) legen eine Übersicht über die modellierungsbasierten Arbeiten vor und stellen immerhin die Nebenbedingung heraus, auf die seit Jahrzehnten verwiesen wird, für die aber nicht immer verantwortungsvoll Sorge getragen wird: einen angemessenen Umgang mit der Unsicherheit.

Die Notwendigkeit, bei jeder Bewertung von Szenarien der biologischen Vielfalt die damit verbundenen Unsicherheiten ausdrücklich anzugeben, wird auch von [Thuiller et al. \(2019\)](#) prominent hervorgehoben – allerdings erfolgt auch das Eingeständnis, die Bandbreite der Arten von Biodiversitätsmodellen, Algorithmen, Eingabedaten oder Parametrisierungen sei so groß, dass es „derzeit“ unmöglich erscheine, die Variabilität auch nur zwischen den Arten von Biodiversitätsmodellen anzugeben. Dass sich aus der übergroßen Komplexität und ontischen Offenheit ([Nielsen, Ulanowicz 2011](#)) natürlicher Systeme eine inhärente Nichtmodellierbarkeit ergibt, wird nicht zugegeben. Problematischer als die nicht

eliminierbare Unsicherheit bei der Projektion des zukünftigen Verhaltens der Natur ist aber vermutlich der Wunsch vieler Akteure, dennoch konkrete quantitativ unterlegte Handlungsanweisungen zu erhalten. Dabei müsste Unsicherheit nicht nur kommuniziert, sondern vielmehr zur Grundlage des Handelns werden. Dies fällt in einem Zeitalter aufwendig computerisierter Annahmen allerdings immer schwerer.

In einzelnen Arbeiten wurden Klima und Vegetation sogar für die nächsten Jahrhunderte modelliert (Hickler et al. 2012). Zwar wurde von den Autoren präzise formuliert, dass alle Ergebnisse nur unter vielerlei Annahmen gelten würden, aber gleichzeitig gibt es sehr explizite Abbildungen etwa zur modellierten Artenzusammensetzung in Bezug auf die oberirdische Biomasse für einen Wald in Südmittelschweden oder zur langfristigen Gleichgewichtsvegetationsverteilung in Europa für die Jahre von 2101 bis 2500 (unter Verwendung eines einzigen Klimaszenarios und unter Annahme eines zukünftigen stabilen Klimas). Dies ist als akademische Übung natürlich vertretbar, erzeugt in diesem Falle aber Ergebnisse, die von Praktikern missverstanden werden könnten. Allemal wird signalisiert, man könne die zukünftigen Waldzustände berechnen.

Bemerkenswert war im Falle des angesprochenen Artikels, dass mit dem Konzept der **potenziellen natürlichen Vegetation** (PNV) gearbeitet wurde. Dieses von Tüxen (1956) eingeführte Konstrukt basiert auf Vorstellungen der europäischen Pflanzensoziologie und geht davon aus, dass die Vegetation an einem bestimmten Ort, wenn denn der Einfluss des Menschen aufhörte, einem bestimmten und im Grunde bestimmbaren Zustand zustreben würde. Über Sinn und Unsinn dieser Idee ist in der Vergangenheit bereits viel diskutiert worden (z. B. Leuschner 1997; Kowarik 2016). Implizit beruht sie auf vielerlei Annahmen – etwa, dass Klima und weitere Umweltbedingungen mehr oder weniger stabil bleiben und vorhersagbar auf die Lebensgemeinschaften wirken sowie dass die Arten, die die Vegetation gestalten, an dem gegebenen Ort langfristig zur Verfügung stehen – und auch nicht um weitere ergänzt werden. In der Forstwirtschaft wurde die PNV recht spät als Leitbild eingeführt. Die Anwendung führte zur Definition „baumartenscharfer“ Zielbestandstypen (oder Zielwald- bzw. Waldentwicklungstypen; z. B. Landesbetrieb Forst Baden-Württemberg 2014). Kaum waren diese definiert, wurde die Vorstellung der PNV von der Entfaltung des schnellen anthropogenen Klimawandels erschüttert. Eine Reaktion der (Forst)wissenschaft war die Entwicklung der Idee einer **zukünftigen potenziellen natürlichen Vegetation** (zPNV), die sich also einstellen würde, wenn der Klimawandel „vorüber“ wäre, sowie klimawandelangepasster Zielbestandstypen. Auch im Naturschutz wird das Konzept der PNV weiterhin genutzt. Das konzeptionelle Fundament ruht dabei mutmaßlich auf Vorstellungen der „Gleichgewichtsökologie“ und einem entsprechenden Determinismus sowie einem Steuerbarkeits- und Gestaltungsparadigma.

Ein zentrales Problem scheint darin zu bestehen, dass viele Akteure die Waldbewirtschaftung selbst im Klimawandel zwingend von den Produkten (wie etwa Nadelbaumholz) und den Baumarten her konzipieren. Auch forstökologische Studien fokussieren oftmals auf die Baumarten und deren Interaktionen, ohne andere Ökosystemkomponenten zu betrachten. Beispielhaft ist in diesem Zusammenhang etwa eine Übersichtsarbeit von Ammer (2018) zur Produktivität und Vielfalt von Wäldern im Klimawandel, die sich mit Fragen der Baumarteninteraktion und Baumartenwahl beschäftigt, ohne dass andere Arten, die Interaktion von Lebewesen mit Bodenbildung und Wasserhaushalt oder emergente ökosystemare Eigenschaften zur Sprache kommen. Folgerichtig scheint dann auch ein Ansatz der Klimawandelanpassung zu sein, Bäume gegen Trockenheit manipulativ durch Durchforstung vor Konkurrenten zu schützen (Ammer 2017), wobei u. a. Konsequenzen für das Mikroklima außer Acht gelassen werden (Blumröder et al. 2021).

Werden Wälder wirklich als Ökosysteme begriffen oder wird das waldökologische Verständnis auf autökologische Konzepte reduziert, wie sie u. a. durch das Lehrbuch Alfred Denglers „Waldbau auf ökologischer Grundlage“ Generationen von Forstleuten nahe-

gebracht wurden? Der Eberswalder Wissenschaftler wandte sich mit seiner Arbeit auch gegen holistische Ansätze seines Vorgängers Alfred Möller (vgl. Bode 2021): „Die Bezeichnung Organismus [für den Wald] ist abzulehnen, weil sie falsch ist und zu falschen Schlussfolgerungen führt. Die Ökologie hat die Aufgabe, den natürlichen standortsgemäßen Typ des Waldes als solchen zu erkennen und seine ursächlichen Zusammenhänge mit den äußeren Bedingungen zu erforschen“ (Dengler 1930).

3 Was ist ein Ökosystem?

Arthur Tansley (1935) verabscheute die Idee eines „Überorganismus“, der aus verschiedenen Lebewesen bestehen könnte, oder auch die „Lebensgemeinschaft“, akzeptierte aber die Idee eines „Quasiorganismus“. Sich kritisch an den Begriffen der Pflanzensoziologie abarbeitend gelang ihm die Schaffung des wegweisenden Begriffs „Ökosystem“, nach der Erfindung der „Ökologie“ ein folgerichtiger und kongenialer Schritt, der das Nachdenken über das Gefüge des Lebenden in eine neue Richtung lenkte.

Die Ökosysteme „weisen eine Organisation auf, die das unvermeidliche Ergebnis der Wechselwirkungen und der daraus resultierenden gegenseitigen Anpassung ihrer Bestandteile ist. Wenn die Organisation der möglichen Elemente eines Systems nicht zustande kommt, bildet sich kein System oder ein beginnendes System zerbricht. Es gibt in der Tat eine Art natürliche Auslese der sich entwickelnden Systeme, und diejenigen, die das stabilste Gleichgewicht erreichen können, überleben am längsten. [...] Im Vergleich zu den stabileren Systemen sind die Ökosysteme extrem verwundbar, sowohl aufgrund ihrer eigenen instabilen Komponenten als auch weil sie sehr anfällig für die Invasion von Komponenten anderer Systeme sind. [...] Diese relative Instabilität des Ökosystems, die auf die Unzulänglichkeit seines Gleichgewichts zurückzuführen ist, ist von unterschiedlichem Ausmaß, und unsere Mittel, sie zu bewerten und zu messen, sind noch sehr rudimentär“ (Tansley 1935, wörtliche Übersetzung aus dem Englischen).

Bevor die zugrunde liegenden Mechanismen des Lebens in Ökosystemen entdeckt, das Haushalten in den „Oikos-Systemen“ quantifiziert und die Nichtgleichgewichtsökologie theoretisch und empirisch untersetzt waren, formulierte Tansley also eine Kritik des „ökologischen Gleichgewichts“ und skizzierte zudem, dass sich die ergebnisoffene Entwicklung von Ökosystemen weder modellieren noch erzwingen lässt. Um das eigentliche Wesen der Interaktion in Ökosystemen, die Unbestimmtheit des Lebens sowie die Triebkräfte der Evolution besser zu erkennen, mussten erst jene revolutionären Fortschritte in der Physik in der Ökologie rezipiert werden, zu denen v. a. Einsteins Energie-Masse-Äquivalenz, die Quantenmechanik und die Theorie komplexer Systeme gehören.

3.1 Ökosystem, Komplexität und Chaos

Sehr früh befruchteten die Komplexitäts- und Chaostheorien die Ökologie (z. B. May 1974; Hastings et al. 1993). Es wurde deutlich, dass Modelle, die Komplexität ausblenden, der Realität zuwiderlaufen (May 1974). Da das Verhalten von Populationen nicht selten von Chaos geprägt ist, sind langfristige genaue Vorhersagen nicht möglich (Beddington et al. 1975; Rogers et al. 2021).

Die Berechnung der kombinatorischen Möglichkeiten der Interaktion zwischen den Komponenten eines heterogenen, komplexen Systems führt zu numerischen Explosionen und einer entsprechenden „ontischen Offenheit“ (Nielsen, Ulanowicz 2011). Die Neigung komplexer Systeme zu überraschendem und nichtlinearem Verhalten wird zudem durch die typischen Systemphänomene der positiven und negativen Rückkopplungen und Synergien gesteigert – umso mehr, je stärker Teilsysteme auch noch zu Selbstreferenzialität befähigt sind (vgl. Miller et al. 2019). Diese Befähigung zur Reaktion auf sich selbst ist eine fundamentale Eigenschaft lebender Systeme,

Kasten 1: Das „Lübecker Modell“ der naturnahen Waldnutzung.

Box 1: The „Luebeck Model“ of near-nature forest use.

Im Jahr 1994 gab das Stadtforstamt Lübeck das **Konzept der naturnahen Waldnutzung** für seinen rund 5.000 ha großen Stadtwald in einer Pressekonferenz gemeinsam mit Greenpeace bekannt. Dieses Konzept gilt als eine ideale Umsetzung der Verpflichtungen Deutschlands aus der Umweltkonferenz von Rio 1992 und erhielt hierfür bereits 1998 eine Auszeichnung durch die damalige Bundesumweltministerin Merkel. Unter dem Eindruck der Klimakrise und des Verlusts an biologischer Vielfalt erlangt der Stadtwald Lübeck heute als Referenz für einen ökosystemorientierten Umgang mit Wirtschaftswäldern eine gesteigerte Bedeutung. Die naturnahe Waldnutzung richtet sich an der natürlichen Walddynamik aus und nicht an theoretischen Strukturzielen.

Das Konzept berücksichtigt besonders die hohe Komplexität des Ökosystems Wald. Es gründet sich auf wenige Prinzipien und ist offen für Erfahrungen und Anpassungen als lernendes Managementsystem in einem mit vielen Unsicherheiten versehenen Handlungsraum. Es weist als Führungsinstrument messbare Ziele aus und gibt für die operationale Ebene Durchführungshilfen. Mit diesem Konzept wurde 1996 der Standard der ersten Waldzertifizierung in Deutschland nach „Naturland“ definiert. Im Jahr 1998 erhielt Lübeck auch die ökologisch-soziale Zertifizierung durch den Forest Stewardship Council (FSC). Das Konzept wird heute besonders in Kommunalwäldern befolgt, so etwa in Berlin, München, Saarbrücken, Bonn, Wiesbaden, Boppard, Düsseldorf, Hannover, Göttingen, Meiningen und anderswo.

Die **Grundsätze** des Konzepts sehen vor, dass der Forstbetrieb

- den Wald als fast unbekannte „Blackbox“ auffasst und deshalb nach dem Vorsichtsprinzip agiert,
- ökologisches Funktionieren als Voraussetzung für ökonomisch positive Ergebnisse sicherstellt,
- eine umfassende Daseinsvorsorge für Menschen und Natur betreibt,
- partizipativ auch die Kenntnisse von Externen einbezieht und
- ein leistungsfähiges Monitoring unterhält und auswertet.

Einzelkomponenten des Konzepts beziehen sich darauf, dass

- 10 % der Waldfläche repräsentativ als Prozessschutzflächen aus der Bewirtschaftung genommen werden; sie sind betriebliche Lernflächen für natürliche Waldentwicklung;
- mindestens 10 % des lebenden Baumvorrats Biotopbäume und Totholz sein müssen;
- Baumarten der natürlichen Waldgesellschaften gefördert werden und der Anteil nicht standortheimischer Baumarten reduziert wird;
- Eingriffe zur besseren Entwicklung und zur Holzernte nach dem Minimumprinzip erfolgen, ohne flächige Nutzung und ohne spezielle Struktur- und Mischungsziele;
- die Walderneuerung fast ausschließlich über Naturverjüngung erfolgt;
- die Jagd so gestaltet wird, dass naturnahe Entwicklungen im Wald nicht verhindert werden.

Verbote bestehen in Bezug auf Kahlschläge (maximale Lichtung von 0,25 ha), Monokulturen, Ansiedlung nicht standortheimischer Baumarten, Pestizide, Bearbeiten oder Verdichten des Mineralbodens, flächige Räumungen, Entwässerungen im Wald, störende Arbeiten während ökologisch sensibler Jahreszeiten sowie Füttern von Wildtieren.

Das **Prinzip der höchstmöglichen Naturnähe** wird mit zahlreichen Kriterien beschrieben. Die theoretisch angenommenen natürlichen Waldgesellschaften definieren z. B. das Kollektiv der standortheimischen Baumarten. Die Wirtschaftswälder sollen Baumvorräte auf der Fläche erreichen, die 80 % der natürlichen Vorräte nicht unterschreiten. Die Ernte einzelner Bäume erfolgt in hohen Altern mit großen Stammdurchmessern.

Das **Minimumprinzip** reduziert z. B. regulierende Eingriffe in den naturnahen Laubmischwäldern auf etwa drei Eingriffe im Jahrhundert auf derselben Fläche. Die Infrastruktur der Wirtschaftswege wird auf weniger als 10 % der Fläche reduziert.

Die **Erfahrungen** aus fast 30 Jahren Umsetzung in Lübeck sind ermutigend:

- Die Baumvorräte sind von 290 auf 470 m³/ha angestiegen.
- Die Referenzflächen zeigen an, dass weitere Extensivierung der Eingriffe sinnvoll ist.
- Baumschäden im Klimawandel sind in den dichten, kühlen und naturnahen Wäldern nur marginal.
- Große Signalarten wie Seeadler und Schwarzstorch haben sich angesiedelt.
- Der Reinertrag hat sich verdoppelt.
- Ökosystemleistungen wie CO₂-Absenkung, Kühlung, Abflussminderung, Erholungswirkung u. a. sind angestiegen.

Die 2016 in Lübeck angesiedelte **Naturwald Akademie** unterstützt die wissenschaftliche Erforschung ökosystemorientierter Waldnutzung und wertet die dort im Monitoring gesammelten Informationen aus. Daraus zeigt sich, dass viele Zusammenhänge in naturnahen Waldökosystemen anders verlaufen, als bisher in der traditionellen Forstwirtschaft gelehrt wurde. Naturnahe (Wirtschafts-)Wälder bergen geringere Produktionsrisiken und sind anpassungsfähiger als naturferne Forsten. Die nachhaltig mögliche ökonomische Leistung steigt mit der Naturnähe. Ökologie sichert in der Urproduktion die Ökonomie.

Autor

Dr. Lutz Fäher

Forstgehöft 2

23896 Ritzerau

E-Mail: lutz.faeher@posteo.de

die zur Selbstregulation beiträgt. Gleichzeitig erschwert Komplexität das Verständnis von Kausalität. (Mutmaßliche) Beziehungen zwischen Variablen können sich in nichtlinearen Systemen auf Grund von Scheinkorrelationen oder einem Schwellenwechsel im Regime spontan ändern, und eine Korrelation kann zu falschen und widersprüchlichen Hypothesen führen (Sugihara et al. 2012).

Die Komplexität und Unberechenbarkeit von Systemen steigt weiter an, wenn die Interaktion von Systemkomponenten zeitlich variieren kann und unterschiedliche Ebenen von ineinander verschachtelten Systemen einbezieht. Ökosysteme sind weniger streng integriert als etwa Zellen, Organismen oder obligate Supraorganismen (mehr oder weniger fixierte, symbiotische Kombination verschiedener Arten). Das bedeutet, dass sie in einem gewissen Maße neue Komponenten aufnehmen oder alte verlieren können, ohne deshalb ihre Funktionstüchtigkeit zu verlieren. Ihnen wohnt grundsätzlich auch die Möglichkeit des Kollabierens und der Neuorganisation inne. Dieses Prinzip wurde als Panarchie auf

der Grundlage von genesteten adaptiven Zyklen beschrieben, eine wichtige Grundlage für Resilienz und Weiterentwicklung (Holling, Gunderson 2002). Sundstrom, Allen (2019) argumentieren, dass, obwohl die Theorie des adaptiven Zyklus und der Panarchie konzeptioneller und qualitativer Natur sei, wichtige Aspekte empirisch validiert worden seien. Der adaptive Zyklus spiegelt die unvermeidliche Dynamik komplexer adaptiver Systeme als Ergebnis der internen Prozesse der Selbstorganisation und der Evolution im Laufe der Zeit wider.

3.2 Ökosysteme als thermodynamische, Arbeit verrichtende Systeme

Der Ökologe Eugene Odum (1969) brachte die Ökosystementwicklung mit bioenergetischen Sachverhalten in Verbindung. Ilya Prigogine erhielt 1977 den Nobelpreis für seine Theorie der dissipativen

Systeme. Dabei ging es zunächst um die Selbstorganisation in chemischen Systemen, die auf der Aufnahme und Dissipation von Energie beruht. Diese bedeutet, dass Energie im thermodynamischen Sinne entwertet und Entropie produziert wird. Die Theorie wurde auch auf Ökosysteme angewendet (Nicolis, Prigogine 1977). Somit verloren Ökosysteme ihren Charakter als beliebige, vom Menschen konstruierte Einheiten; sie konnten nun als energetisch begründete und energiewandelnde Systeme höherer Ordnung mit offenen Grenzen beschrieben, abgegrenzt und bzgl. ihrer Leistungsfähigkeit quantifiziert werden. Die Grenze eines Ökosystems bestimmt sich dadurch, dass die Komponenten innerhalb desselben intensiver miteinander energetisch interagieren – und dabei systemtypische emergente Eigenschaften hervorbringen – als mit anderen Teilsystemen außerhalb.

Auch die Funktionstüchtigkeit von Ökosystemen wurde objektiv messbar. Das Verhältnis zwischen der Entropieerzeugungsrate und der in den Strukturen enthaltenen Entropie kann als Indikator für die Fähigkeit eines sich selbstorganisierenden, dissipativen Systems angesehen werden, sich durch „Abpumpen“ von Entropie weit vom thermodynamischen Gleichgewicht entfernt zu halten (Ludovisi et al. 2005). Die spezifische Dissipation, das Verhältnis zwischen der biologischen Entropieproduktion und der in der lebenden Biomasse gespeicherten hochwertigen Exergie (Energie, mit der noch physikalische Arbeit verrichtet werden kann), wurde als Indikator für den Reifegrad ökologischer Systeme vorgeschlagen. Die Maximierung der Speicherung von Biomasse und Information, die zusammen wesentlich den Exergiegehalt und die Arbeitsfähigkeit des Systems bedingen, sowie die Minimierung der spezifischen Entropieproduktion scheinen sich als die zuverlässigsten Prinzipien der Ökosystementwicklung zu bestätigen (Ludovisi 2014; Fath 2017; Nielsen et al. 2020). Die Zunahme biologischer Vielfalt in Ökosystemen und damit auch die wachsende Komplexität begünstigen – bis zu einem gewissen Punkt – die Fähigkeit zu Selbstorganisation und -regulation sowie zur Verrichtung von Arbeit (Kay 2000). Die Energiedissipation nimmt mit zunehmendem Natürlichkeitsgrad der Vegetation und mit zunehmendem Alter der Waldbestände zu (Maes et al. 2011). Zum Befund passt, dass ältere Bäume einen stärkeren Zuwachs als jüngere sowie Wachstum bis ins hohe Alter zeigen (Pretzsch 2020; Pretzsch et al. 2021).

In diesem Zusammenhang gilt es, den ökohydrologischen Sachverhalt hervorzuheben, dass die thermodynamisch beschreibbare Funktionstüchtigkeit von Ökosystemen von der Verfügbarkeit und Speicherung von Wasser abhängt – und umgekehrt gehört zu den emergenten Eigenschaften von exergie-, kohlenstoff- bzw. biomassereichen Ökosystemen, dass die Wasserrückhaltefähigkeit ansteigt. Grundsätzlich wirkt sich die biotische Aktivität im globalen Ökosystem auf alle grundlegenden thermodynamischen Antriebskräfte aus, indem sie die Geschwindigkeit der hydrologischen und geochemischen Kreisläufe verändert (Kleidon 2010).

Die thermodynamische Konzeption von Ökosystemen als dissipative Systeme, die der permanenten Zufuhr hochwertiger Exergie bedürfen, um scheinbar den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik außer Kraft zu setzen und fortgesetzt zu reifen, ist nicht leicht vermittelbar und entzieht sich einem intuitiven Verständnis. In der schulischen und akademischen Lehre wird das Konzept des Ökosystems weiterhin überwiegend als Wirkungsgefüge von Lebensgemeinschaft und Biotop eingeführt. Während dies nicht falsch ist, werden die thermodynamischen Grundlagen der Funktion und Entwicklung von Ökosystemen sowie die daraus resultierende Nichtgleichgewichtsökologie in der Regel nicht thematisiert (z.B. Deutscher Bildungsserver et al. 2021). Mutmaßlich gibt es sogar einen unbewussten Widerstand dagegen, sich vom Narrativ des ökologischen Gleichgewichts zu verabschieden und „Mutter Erde“ als ein System aufzufassen, das immerzu am Rande zwischen Ordnung und Chaos operiert (Hastings et al. 1993). Schließlich bedeutet nicht nur die Komplexität, sondern auch die inhärente Irreversibilität und Instabilität in Ökosystemen das „Ende der Gewissheit“ (vgl. Prigogine, Stengers 1997).

4 Prinzipien der Ökosystemfunktionalität und ökosystembasierter Umgang mit Wald- und Klimakrise

Jenseits der Einsichten zur Unberechenbarkeit von Ökosystemen ergeben sich aus dem ökosystemaren Konzept (und der dasselbe stützenden Evidenz) vielfältige Konsequenzen für das Ökosystemmanagement. Es erscheint deshalb sinnvoll, diese Konsequenzen durch die Formulierung von Prinzipien zu strukturieren und für die Praxis aufzubereiten (vgl. Kasten 1). Jørgensen entwickelte sukzessiv grundlegende Gesetze bzw. Vorschläge für eine Ökosystemtheorie (vgl. u.a. Jørgensen 2012). Inspiriert von diesem Ansatz werden hier zehn veränderte und weiterentwickelte Prinzipien vorgeschlagen, die Ökosysteme sowie deren Attribute bzw. Funktionalität beschreiben und aus denen sich Handlungsanweisungen für das Waldökosystemmanagement ableiten lassen (Tab. 1, S. 330 f.).

Die Ökosystemprinzipien sind durch eine integrierte, naturwissenschaftlich fundierte Ökosystemtheorie abgesichert sowie empirisch beleg- oder überprüfbar. Zusammenfassend lautet die aus ihnen abzuleitende Empfehlung für den Umgang mit Wald- und Klimakrise: „Die Natur Ökosystem sein lassen!“ Dies bedeutet keineswegs einen Verzicht auf Management, sondern v.a. das Tolerieren und Fördern von Strukturen sowie Prozessen, die die Arbeitsfähigkeit von Ökosystemen ausmachen. Es heißt deshalb insbesondere auch, die regulierenden Ökosystemfunktionen und -leistungen auszunutzen, die sich im Zuge der ökologischen Evolution herausgebildet haben. Selbst in den vergangenen extremen Jahren 2018 – 2020 zeigten geschädigte Wälder Resilienzreaktionen (vgl. Abb. 3 und 4, S. 331). Erst wenn die ökosystemare Entwicklungs- und Anpassungsfähigkeit nachgewiesenermaßen erschöpft sein sollte, könnte immer noch über technische Unterstützung nachgedacht werden. Es erscheint aber nicht schlüssig, etwa aufkommende natürliche Verjüngung zu unterdrücken, um andere Baumarten zu pflanzen, oder einen über lange Zeit entstandenen Oberboden abzuschleifen und zu pflügen (siehe Ibisch et al. 2021), statt seine Weiterentwicklung zu fördern.

Keinerlei Evidenz spricht dafür, dass ein deterministisches „Einzelteilmanagement“, das Prinzipien der Ökosystemfunktionalität ignoriert und Systemkomponenten ohne Kenntnis des Systems höherer Ordnung manipuliert, langfristig Erfolg haben kann, ohne fortgesetzten Managementbedarf mit entsprechendem Ressourcen- und Energieeinsatz nach sich zu ziehen. Dies gilt entsprechend umso mehr, je stärker Ökosysteme gestresst sind und etwa klimawandelbedingten Kippunkten entgegengetrieben werden.

Der grundlegende Auftrag für ein effektives Ökosystemmanagement muss sein, Ökosystemen zu erlauben, durch das Wachstum von Biomasse, Information und Netzwerk zu reifen und die Arbeitsfähigkeit bestmöglich zu bewahren bzw. zu fördern. Erzeugung und Speicherung von Biomasse und biogener freier Energie (Exergie) im Ökosystem – einschließlich Totholz, Humus oder organischen Molekülen im Mineralboden – sind die physikalische Grundlage aller **potenziellen natürlichen ökologischen Prozesse** im Ökosystem. Diesen muss sämtliche Aufmerksamkeit gelten. Gekoppelt an die Entwicklung der biophysikalischen Leistungsfähigkeit ist auch eine Zunahme der ökohydrologischen Kapazität der Waldökosysteme – also der Fähigkeit, Wasser aufzunehmen, zurückzuhalten und zu speichern sowie Schwankungen auszugleichen. Grundlegend sind – nicht allein in diesem Zusammenhang – alte Böden und ihre (Rhizo)mikrobiome (Fichtner et al. 2014; Mausolf et al. 2018; Thomashaw et al. 2019). Die Bewahrung des von Ökosystemen gespeicherten und mobilisierten „Grünen Wassers“ sowie alle Aspekte der Ökohydrologie (Ellison et al. 2017; Sheil 2018; te Wierik et al. 2021) und die mikroklimatische Regulation (Blumröder et al. 2021) verdienen bei der Bewirtschaftung höchste Priorität.

Zu den grundlegenden ökologischen Schlüsselattributen „Information“ und „Netzwerk“ (Schick et al. 2019) gehören in Wäldern v.a. auch die Nichtbaumorganismen, allen voran die Mikroorganismen und Pilze. Die sich mehrenden Befunde zur Relevanz der

Tab. 1: Prinzipien der Ökosystemfunktionalität und des Waldökosystemmanagements.

Table 1: Principles of ecosystem functionality and forest ecosystem management.

Prinzipien der Ökosystemfunktionalität	Prinzipien des ökosystembasierten Waldmanagements
I. Thermodynamik	
1. Ökosysteme sind offene, energiewandelnde Systeme und unterliegen den Gesetzen der Thermodynamik. Wie in allen anderen Systemen werden Materie und Energie erhalten, aber alle Prozesse in Ökosystemen sind irreversibel. Ökosysteme sind dissipative Systeme, d. h., sie entwerfen freie Energie (Exergie) und produzieren Entropie. Sie benötigen freie Energie, mit der Arbeit verrichtet werden kann (Exergie), um ihre Funktionstüchtigkeit zu erhalten.	1. Die Waldbewirtschaftung zielt darauf ab, dass das Ökosystem thermodynamisch möglichst effizient arbeiten und möglichst viel freie Energie aufnehmen und umsetzen kann. Unter anderem ist bedeutsam, im Waldökosystem eine möglichst große photosynthetisch aktive Fläche entwickeln zu lassen (z. B. Förderung alter Bäume, funktionelle und strukturelle Vielfalt, Schichtung). Biologische Vielfalt und komplexe Nahrungsnetze erhöhen die Verweilzeit von Energie im System sowie die Entropieproduktion und damit die Leistungsfähigkeit.
2. Wenn Ökosysteme zusätzliche freie Energie erhalten, wird jeglicher Überschuss, der nicht zur Aufrechterhaltung der Grundfunktionen benötigt wird, genutzt, um dissipative Strukturen zu bilden und das System weiter vom thermodynamischen Gleichgewicht zu entfernen.	2. Die Waldbewirtschaftung erlaubt Waldökosystemen, mehr Biomasse (und biogene Stoffe) zu speichern, als nachwächst. Ein fortgesetztes Nettowachstum von lebender Biomasse, Totholz, Humus und Bodenkohlenstoff ist anzustreben und wird in der Bewirtschaftung als „Rücklage“ freier Energie und Investition in die Leistungsfähigkeit des Waldes verstanden.
II. Ökohydrologie	
3. Da Leben auf der Grundlage wässriger Lösungen funktioniert, sind Ökosysteme offene ökohydrologische Systeme, deren entsprechende Kapazität, mit Wasser zu haushalten, auf allen Systemebenen einen entscheidenden selektierenden Einfluss auf die Systementwicklung nimmt. Im Laufe der Ökosystementwicklung besteht die Tendenz der Zunahme der ökohydrologischen Kapazität (inkl. Wasseraufnahme, -rückhaltung bzw. -speicherung). Aufnahme bzw. Beschaffung, Rückhaltung und Umsatz von Wasser sind direkt mit dem Energiehaushalt gekoppelt. Je mehr Wasser im Ökosystem umgesetzt werden kann, desto größer die Energiedissipation und Leistungsfähigkeit des Ökosystems. Je mehr materialisierte Energie im Ökosystem gespeichert wird, desto größer sind Wassergehalt und Wasserspeicherfähigkeit in Biomasse bzw. im Boden und desto geringer die Schwankungen der Produktivität.	3. Die Förderung der ökohydrologischen Kapazität ist ein vorrangiges Ziel der Waldbewirtschaftung. Maßnahmen und Infrastruktur, die zu Verlust von Wasser, Luft- und Bodenfeuchtigkeit oder der Wasserspeicher- bzw. Wasserrückhaltefähigkeit beitragen bzw. zur Erwärmung von Wald führen, sind zu verhindern oder zu reduzieren (z. B. keine Drainage, keine Kahlfliächen; Bewahrung eines relativ hohen Kronenschlussgrads; Reduktion von Wegen und Gassen). Es sind zudem Strukturen und Mechanismen zu fördern, die die Aufnahme und den Umsatz von Wasser vergrößern (u. a. tiefe Durchwurzelung, ältere Bäume, Landschaftskühlung, Verdunstung) sowie die Verbleibzeit im Wald verlängern (u. a. humusreicher Boden, Klein- und Kleinstgewässer inkl. Wurzelteilermulden umstürzender Bäume, Totholz, Strukturvielfalt, Schichtung).
III. Organisation, Wachstum und Funktion	
4. Die Grundlage für die ökosystemare Funktion, das System weiter vom thermodynamischen Gleichgewicht zu entfernen, sind drei Formen des Wachstums bzw. der Reifung: Wachstum der Biomasse, Wachstum des Netzwerks, Wachstum der Information. Im Zuge der Ökosystementwicklung spielt Biomassewachstum v. a. zu Beginn eine dominierende Rolle, während in reiferen Systemen – bei Abwesenheit größerer Störungen – qualitatives Wachstum bedeutsamer wird (massesuffizientes Wachstum).	4. Die Waldbewirtschaftung fördert die Reifung von Waldökosystemen, die mit der Zunahme von Biomasse, biologischer Vielfalt und Interaktionen der Ökosystemkomponenten verbunden ist. Die Biomasseakkumulation im Wald ist zu fördern; möglichst komplexe Nahrungsnetze mit möglichst vielen trophischen Ebenen sind zu bewahren bzw. entwickeln zu lassen (u. a. alte Bäume, biologische Vielfalt, Strukturvielfalt, Schichtung); Zerschneidung von Wald aller Art ist zu reduzieren bzw. Konnektivität ist wiederherzustellen und zu fördern (u. a. Rückbau von Wegen/Gassen, Gehölze und Waldinseln arrondieren/verbinden).
5. Die Reifung von Ökosystemen benötigt zeitliche und räumliche Kontinuität bzw. Konnektivität. Vor allem das Wachstum von Information und Netzwerk in Ökosystemen benötigt mehr oder weniger lange Zeiträume. Es erfolgt u. a. durch stetige Akkumulation und Integration von Ökosystemkomponenten im Rahmen der Evolution und des Austauschs mit anderen Ökosystemen. Die biologische Reifung terrestrischer Ökosysteme steht rückkoppelnd mit der strukturell-funktionellen Reifung von Böden in Verbindung. Reife Böden kennzeichnen sich durch ausgeprägte Horizonte sowie v. a. einen gut ausgebildeten, biologisch aktiven Oberboden.	5. Die Waldbewirtschaftung unterstützt insbesondere die Bewahrung angemessener großer Anteile reifer Wälder und alter Waldböden. Das Zurücksetzen der Waldökosysteme in initiale Pionierzustände durch die Vernichtung alter Strukturen und alter Böden ist zu unterlassen (u. a. keine Kahlschläge, Entfernung alter Bäume, Totholz, Pflügen, Entblößen oder [Zer]störung von Oberböden). In angemessenen großen Anteilen von Waldgebieten sind anthropogene Störungen langfristig auf ein Minimum zu reduzieren.
6. Ökosysteme sind verschachtelte (genestete) Systeme, die holarchisch organisiert sind und zusammen das globale Ökosystem bilden. Die Ökosystemkomponenten arbeiten in einem Netzwerk zusammen, in dem – im Zuge der biologischen und ökologischen Evolution – die zunehmende horizontale und vertikale Komplexität zum Wachstum von Kooperation, Kohärenz und Integrität des Systems beiträgt. Eine besondere Rolle spielt die Ausbildung funktionaler Systemkomponenten mittlerer Ordnung auf der Grundlage von Symbiosen und Holobiosen.	6. Das Waldmanagement erfolgt im Bewusstsein der ausgeprägten ökosystemaren Integration von Organismen bzw. Holobiosen und zielt in besonderem Maße auf die Bewahrung und Förderung von Symbiosen ab. Strukturelle und funktionelle Komplexität sowie die diese fördernde Selbstorganisation im Waldökosystem sind zu unterstützen. Insbesondere sind Strukturen und Mechanismen zu fördern, die ein funktionstüchtiges Mikrobiom und eine artenreiche Pilzflora bewahren (u. a. durch Bewahrung humusreicher, feuchter Böden). Der Verlust von Integrität durch ökosystematypische Störungen ist zu minimieren (u. a. Pestizide, Flächenverluste durch Wege/Gassen, Randeffekte).
7. Die Komplexität der Ökosysteme führt zusammen mit den thermodynamisch bedingten Eigenschaften wie Irreversibilität und Instabilität zu einer ontischen Offenheit des Systems und damit zu einer inhärenten Unbestimmtheit. Biologische Systeme unterscheiden sich von rein physikalischen Systemen durch ihre Heterogenität. Die Berechnung der kombinatorischen Möglichkeiten zwischen den Komponenten eines heterogenen Systems erreicht Größenordnungen, die physikalisch keinen Sinn mehr ergeben – d. h., solche komplexen Systeme sind grundsätzlich unberechenbar.	7. Eine ergebnisoffene Entwicklung von Waldökosystemen wird im Rahmen eines adaptiven Managements zugelassen bzw. gefördert. Von deterministischer Planung wird abgesehen, und dem Verlust möglicher Entwicklungspfade wird entgegengewirkt. Sich von selbst einstellende biologische Vielfalt und Sukzession sowie Geo- und Habitatdiversität sind zu bewahren bzw. zu fördern (u. a. durch Zulassen von Störungen und deren Folgen wie Windwurf oder aufgeklappten Wurzelteillern; Akzeptanz verzögerter und heterogener Naturverjüngung). Homogenisierende Eingriffe (wie die Pflanzung gleichaltriger Bäume weniger Arten in gleichmäßigen Abständen) sind zu unterlassen.
IV. Suffizienz, Effizienz, Resistenz und Resilienz	
8. Wachstum und Entwicklung reifender Ökosysteme stehen im Zusammenhang mit der Zunahme zyklischer Prozesse, die u. a. zu einer Steigerung der materiellen, der hydrischen und der thermodynamischen Effizienz führen. Dabei wächst die relative Geschlossenheit der Ökosysteme, die u. a. bedeutet, dass z. B. Oberflächenabfluss und stoffliche Verluste reguliert bzw. reduziert und Schwankungen abiotischer Bedingungen gepuffert werden. Hierdurch werden wiederum Schwankungen von Primärproduktion und Arbeitsfähigkeit reduziert.	8. Die Zunahme zyklischer Prozesse und der materiellen, hydrischen bzw. thermodynamischen Effizienz sowie der Pufferkapazität ist eine wichtige Zielsetzung des Waldmanagements. Es sind Strukturen und Mechanismen zu bewahren und zu fördern, die zur Pufferung der Schwankungen von Umweltbedingungen bzw. externen Störungen beitragen sowie die Produktivität stabilisieren (u. a. mikroklimatische und hydrische Pufferung). Die Holzernte orientiert sich bezgl. der Entnahmemenge an der bestmöglichen Bewahrung der Pufferkapazität.
9. Positive und negative systemische Rückkopplungen sind eine wesentliche Grundlage der biotischen Regulation sowie der Anpassungsfähigkeit in Ökosystemen. Die systemischen Interaktionen von Organismen bedingen eine zunehmende Selbstreferenzialität und die Einnahme bestimmter diskreter Zustände in einer zunehmend inhärenten Attraktorenlandschaft. Dies bedeutet eine Erhöhung von Selbstregulierung, Pufferkapazität und Resistenz gegenüber Störungen. Gleichzeitig fördern die Rückkopplungen die Tendenz zu nichtlinearen Veränderungen etwa bei Veränderungen der Umweltbedingungen.	9. Das Management von Waldökosystemen bzw. Ökosystemkomponenten wie etwa Bäumen oder Pflanzenfressern muss immer im Bewusstsein von Rückkopplungen erfolgen und ist entsprechend systemisch zu konzipieren. Linear und deterministisch konzipierte Managementinterventionen können zu unerwünschten und überraschenden Effekten führen (z. B. Verstärkung der Reproduktion durch Bejagung, Kalamitäten in Monokulturen). (Meta)systemisches Management von Ökosystemkomponenten zielt auf die Beeinflussung von Habitatbedingungen inkl. Gegenspielern, Symbiosen etc. ab. Die Förderung von Prädatoren hat eine ebenso herausragende Bedeutung für das Waldmanagement wie Strukturen und Mechanismen, die eine freie Ausbreitung von Pflanzenfressern hemmen (inkl. physischer Barrieren, struktureller und biologischer Vielfalt).

Tab. 1: Fortsetzung.

Table 1: Continued.

Prinzipien der Ökosystemfunktionalität	Prinzipien des ökosystembasierten Waldmanagements
10. Adaptive Zyklen, die genetisch über die Systemebenen hinweg eine Panarchie bilden, sind eine Grundlage der adaptiven Resilienz eines Ökosystems, dem deshalb grundsätzlich die Möglichkeit der „schöpferischen Zerstörung“ innewohnt. Der Zusammenbruch von Ökosystemen oder Teilsystemen ist stets eine Möglichkeit bzw. regelmäßig auch Bedingung für die Ermöglichung von Neuem und für die Verbesserung der Funktionstüchtigkeit unter veränderten Rahmenbedingungen. (Teil)systemzusammenbrüche, die im Zuge natürlicher, wiederkehrender Störungen erfolgen, gehen häufig mit der Bewahrung eines gewissen Teils der Biomasse und der Information einher, was die Neuorganisation befördert.	10. Die fortgesetzte selbstorganisierte Ökosystemerneuerung, die auch den Zusammenbruch von Teilsystemen umfasst, ist zuzulassen bzw. zu fördern. Besondere Bedeutung haben hierbei natürliche Störungen (inkl. Alterungsprozessen, Windwurf, Insektenfraß) und die Bewahrung toter Biomasse nach Kalamitäten. In menschengemachten homogenen Beständen können natürliche Störungen zur Umwandlung in diversere und resilientere Wälder imitiert werden (z. B. Fällen von Bäumen zur Totholzanreicherung, kontrolliertes Brennen). Die etwaige Holzernte imitiert natürliche Störungen bzgl. einer räumlich-zeitlich beschränkten und heterogenen Anordnung.

Holobiose in Ökosystemen – also der Integration von Überorganismen zwischen Art- und Ökosystemebene – sollten dringend beachtet werden (Baedke et al. 2020). Es gibt zahlreiche Hinweise darauf, dass sich die funktionale Redundanz positiv auf die Stabilität von Ökosystemen und deren Widerstandsfähigkeit gegenüber Störungen auswirken kann (Biggs et al. 2020). Ebenso scheint auch die Komplexität ökosystemarer Netzwerke die Fähigkeit zu erhöhen, externen Störungen zu widerstehen (z. B. in Pflanzen-Bestäuber-Gemeinschaften; Huang et al. 2021).

Die Vulnerabilität von Monokulturen ist gut bekannt und wird aktuell in Deutschland durch das „Forststerben“ belegt. Auch das Design von „neuen Ökosystemen“, „durchaus auch entgegen der natürlichen Waldentwicklung“ mit aus verschiedenen Regionen stammenden Arten (Müller 2019), könnte auf einem Missverständnis von Ökosystemfunktionalität beruhen. Nicht (allein) „die Mischung macht's“ (vgl. LWF 2017), sondern auf die Kohärenz kommt es an. Diese entsteht maßgeblich durch Selbstorganisation in einem dynamisch reifenden System und benötigt eine angemessene Zeit. Anstatt in Zeiten eines sich beschleunigenden Umweltwandels immerzu neue Komponenten in gestresste Ökosysteme einzuführen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit unerwartete Wirkungen entfalten oder sich gar nicht integrieren lassen, sollten Wälder unterstützt werden, v. a. die für thermodynamische und hydrische Effizienz erforderlichen Strukturen zu bewahren und zu entwickeln.

Der beschleunigte anthropogene Klimawandel selbst bedeutet in den Ökosystemen u. a. einen zusätzlichen Energie-Input – in Form von Strahlungsenergie und Wärme. Also hängen die zentralen

Facetten der Klimawandelanpassung mit Energiedissipation, Verhinderung der Austrocknung, Kühlung und Wasserrückhaltung zusammen. Je stärker in den Energiehaushalt von Waldökosystemen eingegriffen wird, desto mehr gehen Funktionalität und Selbstregulationsfähigkeit verloren – desto mehr muss vom Bewirtschafteter externe Energie eingesetzt werden, um sich anwachsender Dysfunktion entgegenzustemmen.

Der Grundansatz einer ökosystembasierten Waldbewirtschaftung ist derjenige eines bewahrend-vorsorgenden, systemischen und adaptiven Managements (vgl. Bode 2019). Dabei geht es um die Kombination aus der bestmöglichen Erhaltung funktionstragender Strukturen und Mechanismen, dem Aufbau von „Rücklagen“ in Form von freier Energie und Wasserspeichern sowie der vorsichtigen Erprobung von Managementstrategien. Die bestmögliche Dokumentation von Interventionen und die lernende Beurteilung ihrer Wirkungen sind eine weitere Grundlage des adaptiven Handelns. Besonders bedeutsam ist die Bereitschaft, überkommene Zielsysteme und Praktiken fortwährend auf den Prüfstand zu stellen. Langfristige und starre Ziele, die auf konkrete Zustände abheben, sind unangemessen. Ein szenarienbasiertes Risikomanagement ist inhärenter Bestandteil eines adaptiven Ökosystemmanagements (Ibisch et al. 2009; Ibisch, Hobson 2014; Schick et al. 2017).

Von zentraler Bedeutung sind der gebührende Respekt vor meist unzureichend verstandenen systemischen Zusammenhängen und das Tolerieren einer ergebnisoffenen Entwicklung (Ibisch 2013). Die Idee der Nichtsteuerbarkeit von Nichtgleichgewichtswaldökosystemen im Klimawandel ist nicht romantisch. Sie bedeutet auch keinesfalls eine Kapitulation der Wissenschaft. Die Aufgabe von

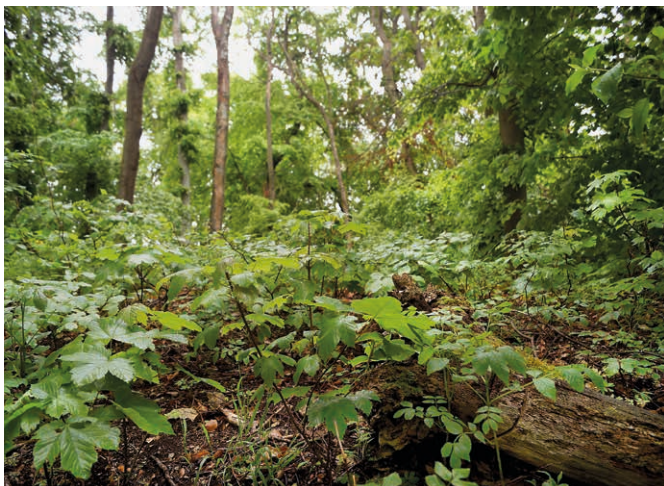


Abb. 3: Resilienz in einem 2018 – 2020 von Trockenheit geschädigten Buchenwald auf flachgründigem Boden auf Muschelkalk: Verstärkter Lichteinfall am Boden durch die Schädigung von Altbäumen aktiviert die Naturverjüngung diverser Baumarten (Hohe Schrecke, Thüringen). (Foto: Pierre Ibisch, 26. Mai 2021)

Fig. 3: Resilience in a drought-damaged beech forest (2018–2020) on shallow soil on shell limestone: Increased light exposure at ground level due to damaged old trees activates natural regeneration of diverse tree species (Hohe Schrecke, Thuringia).



Abb. 4: Resilienz auf einer Kalamitätsfläche, auf der das stehende Totholz belassen wurde: Ungefähr zehn Jahre nach dem Einsetzen des Absterbens der Fichten ist eine effektive Regeneration mit einer großen Vielfalt heimischer Baumarten bei einer klaren Dominanz von Laubbäumen beobachtbar (Jungenwald, Saarland). (Foto: Pierre Ibisch, 12. Mai 2021)

Fig. 4: Resilience on a calamity site where the standing deadwood was left in place: About 10 years after the onset of spruce dieback, effective regeneration with a great diversity of native tree species and a clear dominance of deciduous trees is observable (Jungenwald, Saarland).

Waldwissenschaften ist allerdings nicht, ein auf Intervention und Manipulation basierendes präskriptives Management zu rechtfertigen. Vielmehr sollten sie sicherstellen, dass sich die Behandlung von Waldökosystemen am vorhandenen komplizierten und komplexen Wissen zu diesen Systemen orientiert. Umfassende Wissensbereiche und plausible, durch Evidenz gestützte Theorien auszublenden, wäre verantwortungslos.

Ein ökosystembasierter Ansatz ist kein Garant dafür, dass die Wälder der sich entfaltenden Klimakrise und den vielen anderen menschengemachten Gefährdungen standhalten können. Aber wenn nur halbwegs konsequent dafür Sorge getragen würde, dass Totholz, Böden und Wasserrückhaltefähigkeit der Wälder geschützt werden, Kalamitätsflächen nicht kahlgeschlagen werden und Wälder die Chance bekommen, ihre immer noch beobachtbaren (Regenerations)funktionen zu entfalten, könnte zumindest etwas Zeit gewonnen werden. Zeit, die dringend zum Stoppen der Klimakrise benötigt wird. Sollte sie sich in diesem Jahrhundert weiterhin ungebremst entfalten, dann wird die Idee der Waldbewirtschaftung zu einer romantischen Illusion, während sich das thermodynamisch zwingende Geschehen entfalten und mit Überraschungen aufwarten wird.

5 Literatur

- Ammer C. (2017): Unraveling the importance of inter- and intraspecific competition for the adaptation of forests to climate change. In: Canovas F.M., Lüttge U., Matyssek R. (Hrsg.): *Progress in Botany*. Bd. 78. Springer. Berlin: 345–367.
- Ammer C. (2018): Diversity and forest productivity in a changing climate. *New Phytologist* 221: 50–66.
- Archer D., Rahmstorf S. (2010): *The climate crisis: An introductory guide to climate change*. Cambridge University Press. Cambridge: 260 S.
- Baedke J., Fábregas-Tejeda A., Nieves Delgado A. (2020): The holobiont concept before Margulis. *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution* 334: 149–155.
- Baier T., Weiss M. (2020): „Es ist nicht der Wald, der stirbt, es sind die Bäume“. Interview mit Jürgen Bauhus und Pierre Ibisch. *Süddeutsche Zeitung*, 2./3./4.10.2020, Nr. 228: 36–37.
- Beddington J.R., Free C.A., Lawton J.H. (1975): Dynamic complexity in predator-prey models framed in difference equations. *Nature* 255: 58–60.
- Biggs C.R., Yeager L.A. et al. (2020): Does functional redundancy affect ecological stability and resilience? A review and meta-analysis. *Ecosphere* 11: e03184. DOI: 10.1002/ecs2.3184
- BME/Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2019): *Unser Wald*. Natur aus Försterhand. BME. Bonn: 111 S.
- Blumröder J.S., Härdtle W. et al. (2021): Forestry contributed to warming of forest ecosystems in northern Germany during the extreme summers of 2018 and 2019. *Ecological Solutions and Evidence* 2(3): e12087. DOI: 10.1002/2688-8319.12087
- Bode W. (2019): Systemische Waldwirtschaft. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 51(5): 226–234.
- Bode W. (Hrsg.) (2021): Alfred Möllers Dauerwaldidee. Mit den Reprints sämtlicher Beiträge Alfred Möllers zur Dauerwaldidee 1920–1922. Matthes & Seitz. Berlin: 476 S.
- Bolte A., Ibisch P.L. (2007): Kann unser Wald Schritt halten? *Land & Forst* 17: 44–46.
- Bolte A., Ibisch P.L. et al. (2008): Anpassung der Wälder an den Klimawandel. Was Klimahüllen uns bisher verschweigen. *AFZ/Der Wald* 15/2008: 800–803.
- De Avila A.L., Häring B. et al. (2021): Alternative Baumarten im Klimawandel. Eine Stoffsammlung. *Artensteckbriefe 2.0*. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA). Freiburg i. Br.: 248 S.
- Dengler A. (1930): *Waldbau auf ökologischer Grundlage*. Ein Lehr- und Handbuch. 1. Aufl. Springer. Berlin: 561 S.
- Deutscher Bildungsserver, Climate Service Center, Hamburger Bildungsserver (Hrsg.) (2021): Ökosystem. In: *Bildungswiki Klimawandel*. Enzyklopädie über den anthropogenen Klimawandel und seine Folgen. <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/%C3%96kosystem> (aufgerufen am 27.12.2021).
- Dyderski M.K., Paź S. et al. (2018): How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology* 24: 1.150–1.163.
- Ellison D., Morris C.E. et al. (2017): Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43: 51–61.
- Fath B.D. (2017): Systems ecology, energy networks, and a path to sustainability. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics* 12(1): 1–15.
- Fichtner A., Oheimb G. von et al. (2014): Effects of anthropogenic disturbances on soil microbial communities in oak forests persist for more than 100 years. *Soil Biology and Biochemistry* 70: 79–87.
- Hastings A., Hom C.L. et al. (1993): Chaos in ecology: Is Mother Nature a strange attractor? *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 24: 1–33.
- Hickler T., Vohland K. et al. (2012): Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. *Global Ecology and Biogeography* 21: 50–63.
- Holling C.S., Gunderson L.H. (2002): Resilience and adaptive cycles. In: Gunderson L.H., Holling C.S. (Hrsg.): *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Island Press. Washington D.C.: 25–62.
- Huang H., Tu C., D'Odorico P. (2021): Ecosystem complexity enhances the resilience of plant-pollinator systems. *One Earth* 4(9): 1.286–1.296. DOI: 10.1016/j.oneear.2021.08.008
- Ibisch P.L. (2005): Globaler Umweltwandel – Zeit für Paradigmenwechsel in Forstwirtschaft und Naturschutz. In: *Fachhochschule Eberswalde, Landesforstanstalt Eberswalde, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (Hrsg.): 175 Jahre Lehre und Forschung in Eberswalde*. Die Festschrift: 125–136.
- Ibisch P.L. (2006): Klimawandel und Klimaschutz: Chancen, Gefahren und Handlungsoptionen für den Naturschutz im Wald. In: *Höltermann A., Hiermer J.D. (Red.): Wald, Naturschutz und Klimawandel. Ein Workshop zur Zukunft des Naturschutzes im Wald vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels*. BfN-Skripten 185: 71–81.
- Ibisch P.L. (2013): 300 Jahre „*Sylvicultura oeconomica*“. Ist der Wald ein Pflegefall? *Politische Ökologie* 132: 36–43.
- Ibisch P.L., Gohr C. et al. (2021): Der Wald in Deutschland auf dem Weg in die Heißezeit. Vitalität, Schädigung und Erwärmung in den Extremsommern 2018–2020. Studie im Auftrag von Greenpeace. Centre for Economics and Ecosystem Management an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde. Eberswalde: 87 S. DOI: 10.13140/RG.2.2.31704.62724
- Ibisch P.L., Hobson P.R. (Hrsg.) (2014): *The MARISCO method: Adaptive Management of vulnerability and RISK at Conservation sites. A guidebook for risk-robust, adaptive, and ecosystem-based conservation of biodiversity*. Centre for Economics and Ecosystem Management. Eberswalde: 195 S.
- Ibisch P.L., Kunze B., KrefT S. (2009): Biodiversitätserhaltung in Zeiten des (Klima-)Wandels: Risikomanagement als Grundlage eines systemischen nichtwissenbasierten Naturschutzes. In: *Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft (MIL) des Landes Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) (Hrsg.): Wald im Klimawandel – Risiken und Anpassungsstrategien*. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 42: 44–62.
- Jørgensen S.E. (2012): *Introduction to systems ecology*. CRC Press. Boca Raton: 360 S.
- Kay J.J. (2000): Ecosystems as self-organizing holarchic open systems: Narratives and the second law of thermodynamics. In: *Jørgensen S.E., Müller F. (Hrsg.): Handbook of ecosystem theories and management*. CRC Press. Boca Raton: 135–160.
- Kleidon A. (2010): Non-equilibrium thermodynamics, maximum entropy production and Earth-system evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 368: 181–196. DOI: 10.1098/rsta.2009.0188

- Kollenbroich P., Thimm K., Weinzierl A. (2021): Der Wald der Zukunft. Der Spiegel 9.10.2021, Nr. 41: 48 – 55.
- Kowarik I. (2016): Das Konzept der potentiellen natürlichen Vegetation (PNV) und seine Bedeutung für Naturschutz und Landschaftspflege. Natur und Landschaft 91(9/10): 429 – 435.
- Landesbetrieb Forst Baden-Württemberg (2014): Richtlinien landesweiter Waldentwicklungstypen. Landesbetrieb Forst Baden-Württemberg, Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, Stuttgart: 118 S.
- Leuschner C. (1997): Das Konzept der potentiellen natürlichen Vegetation (PNV): Schwachstellen und Entwicklungsperspektiven. Flora 192: 379 – 391.
- Ludovisi A. (2014): Effectiveness of entropy-based functions in the analysis of ecosystem state and development. Ecological Indicators 36: 617 – 623.
- Ludovisi A., Pandolfi P., Taticchi M.I. (2005): The strategy of ecosystem development: Specific dissipation as an indicator of ecosystem maturity. Journal of Theoretical Biology 235: 33 – 43.
- LWF/Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2017): Die Mischung macht's. Magazin der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft im Zentrum Wald-Forst-Holz Weißenstephan, LWF aktuell 113: 56 S.
- Maes W.H., Pashuysen T. et al. (2011): Does energy dissipation increase with ecosystem succession? Testing the ecosystem exergy theory combining theoretical simulations and thermal remote sensing observations. Ecological Modelling 23 – 24: 3.917 – 3.941.
- Mausolf K., Wilm P. et al. (2018): Higher drought sensitivity of radial growth of European beech in managed than in unmanaged forests. Science of the Total Environment 642: 1.201 – 1.208.
- May R.M. (1974): Biological populations with nonoverlapping generations: Stable points, stable cycles, and chaos. Science 186: 645 – 647.
- Miller W.B., Torday J.S., Baluška F. (2019): Biological evolution as the defense of self. Progress in Biophysics and Molecular Biology 142: 54 – 74.
- Müller M. (2019): Stellungnahme als Einzelsachverständiger (Deutscher Bundestag Ausschussdrucksache 19(10)280-C) für die 41. Sitzung des Ausschusses für Ernährung und Landwirtschaft. Deutscher Bundestag, Berlin: 17 S.
- Nicolis G., Prigogine I. (1977): Self-organization in nonequilibrium systems. From dissipative structures to order through fluctuations. Wiley. New York: 491 S.
- Nielsen S.N., Müller F. et al. (2020): Thermodynamics in ecology – An introductory review. Entropy 22(8): 820. DOI: 10.3390/e22080820
- Nielsen S.N., Ulanowicz R.E. (2011): Ontic openness: An absolute necessity for all development processes. Ecological Modelling 222: 2.908 – 2.912.
- Odum E.P. (1969): The strategy of ecosystem development. Science 164: 262 – 270.
- Pecchi M., Marchi M. et al. (2019): Species distribution modelling to support forest management. A literature review. Ecological Modelling 411: 108817.
- Prigogine I., Stengers I. (1997): The end of certainty. Time, chaos, and the new laws of nature. The Free Press. New York: 234 S.
- Pretzsch H. (2020): The course of tree growth. Theory and reality. Forest Ecology and Management 478: 118508.
- Pretzsch H., Hilmers T. et al. (2021): European beech stem diameter grows better in mixed than in mono-specific stands at the edge of its distribution in mountain forests. The European Journal of Forest Research 140: 127 – 145.
- Rogers T., Johnson B., Munch S. (2021): Chaos is not rare in natural ecosystems. Research Square. DOI: 10.21203/rs.3.rs-888047/v1
- Schick A., Hobson P.R., Ibisch P.L. (2017): Conservation and sustainable development in a VUCA world: The need for a systemic, risk-robust and ecosystem-based approach. Ecosystem Health and Sustainability 3(4): e01267. DOI: 10.1002/ehs2.1267
- Schick A., Porembski S. et al. (2019): Classification of key ecological attributes and stresses of biodiversity for ecosystem-based conservation assessments and management. Ecological Complexity 38: 98 – 111. DOI: 10.1016/j.ecocom.2019.04.001
- Sheil D. (2018): Forests, atmospheric water and an uncertain future: The new biology of the global water cycle. Forest Ecosystems 5(19): 1 – 22. DOI: 10.1186/s40663-018-0138-y
- Sieck M., Ibisch P.L. et al. (2011): Current models broadly neglect specific needs of biodiversity conservation in protected areas under climate change. BMC Ecology 11: 12. DOI: 10.1186/1472-6785-11-12
- Spathelf P., Bilke G. et al. (2008): Eberswalder Erklärung. Waldmanagement im Klimastress. AFZ Der Wald 23/2008: 1.254 – 1.255.
- Staatsanwaltschaft Koblenz (2021): Kein Ermittlungsverfahren im Zusammenhang mit Abholzung im Waldgebiet „Montabaurer Höhe“. Erstmitteilung – 2010 Js 67481/21.
- Sugihara G., May R.M. et al. (2012): Detecting causality in complex ecosystems. Science 338(6106): 496 – 500.
- Sundstrom S.M., Allen C.R. (2019): The adaptive cycle: More than a metaphor. Ecological Complexity 39: 100767.
- Tansley A.G. (1935): The use and the abuse of vegetational concepts and terms. Ecology 16: 284 – 307.
- Te Wierik S.A., Cammeraat E.L. et al. (2021): Reviewing the impact of land use and land use change on moisture recycling and precipitation patterns. Water Resources Research 57: e2020WR029234. DOI: 10.1029/2020WR029234
- Thomashow L.S., LeTourneau M.K. et al. (2019): The soil-borne legacy in the age of the holobiont. Microbial Biotechnology 12: 51 – 54.
- Thuiller W., Guéguen M. et al. (2019): Uncertainty in ensembles of global biodiversity scenarios. Nature Communications 10: 1.446.
- Tüxen R. (1956): Die heutige potentielle natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung. Angewandte Pflanzensoziologie (Stolzenau) 13: 5 – 42.

Prof. Dr. Dr. h. c. Pierre L. Ibisch
Centre for Ecomics and Ecosystem Management
Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde
Alfred-Möller-Straße 1
16225 Eberswalde
E-Mail: pierre.ibisch@hnee.de



Der Autor, geb. 1967, Biologe, Professor für Naturschutz, Forschungsprofessor für ökosystembasierte nachhaltige Entwicklung und Leiter des Centre for Ecomics and Ecosystem Management sowie einer der beiden wissenschaftlichen Gründungsleiter des Biosphere Reserves Institute an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde. Er ist stellvertretender Vorsitzender der Deutschen Umweltstiftung und Mitherausgeber des „Jahrbuch Ökologie“.

Anzeige



R.-P. Meyer – Luhdorf
Natur durch Technik

- Heidepflege
- Feuchtwiesenmäh
- Moorregenerationsmaßnahmen
- Artenschutzmaßnahmen

führen wir bundesweit mit **Spezialgeräten** aus.

Biotop-
Management

Inh. Rolf-Peter Meyer

21423 Winsen/Luhe | Luhdorfer Twieten 5
Tel. 04171 7830-0 | info@meyer-luhdorf.de

www.meyer-luhdorf.de