

erschienen in: Wald und CO<sub>2</sub>. Ergebnisse eines ökologischen Modellversuches (Chr. Brunold/Ph. Balsiger/J. B. Bucher/Chr. Körner, Hrsg.), Bern: Haupt 2001, S. 41 - 50.

## Experiment, Simulation und orientierender Versuch: Anmerkungen zur Experimentalkultur der Biowissenschaften.

Rudolf Kötter

Interdisziplinäres Institut für Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsgeschichte der Universität Erlangen-Nürnberg, Bismarckstr. 12, D-91054 Erlangen.  
E-Mail: rfkoette@phil.uni-erlangen.de

### Abstract

Die Untersuchungen am Modellökosystem „ICAT-Birmensdorf“ haben nicht nur eine ganze Reihe von wichtigen inhaltlichen Ergebnissen erbracht, sie sind darüber hinaus auch unter methodologischen Gesichtspunkten von großem Interesse. Insbesondere weisen sie ein breites Spektrum an experimentellen Vorgehensweisen auf. Dieses reicht von experimentellen Untersuchungen im engeren Sinn bis zu Simulationsversuchen und von Versuchen, welche der Überprüfung von Hypothesen dienen bis zu solchen, die deskriptiv-orientierenden Charakter besitzen. Im Folgenden wird versucht, einige der wichtigsten Experimentalformen der Biologie kurz vorzustellen und an Beispielen aus dem „ICAT-Birmensdorf“ zu veranschaulichen.

### 1 Einleitung

Das hohe Ansehen der modernen Naturwissenschaften beruht nicht zuletzt darauf, dass ihr Erfahrungswissen in besonderem Maße gesichert ist. Jede Behauptung muss letztlich durch Beobachtungsergebnisse überprüft werden können, wobei die Beobachtungen selbst mit Hilfe von Messverfahren in einem kontrollierbaren Umfeld gewonnen werden und damit ihren besonderen intersubjektiven Charakter erhalten. Messung und Experiment zeichnen die modernen Naturwissenschaften vor anderen Weisen der Naturbetrachtung und -erkundung aus.

Während man den Fragen nach der theoretischen Konstruktion von Messgrößen und ihrer technischen Erfassung schon immer große Aufmerksamkeit gewidmet hat, steht die Methodologie des Experiments etwas im Schatten. Weder Physiker noch Chemiker oder Biologen kümmern sich im besonderen Maße um die Reflexion der Experimentalkultur ihres jeweiligen Faches und die Wissenschaftstheorie hat eigentlich erst in den letzten zwei Jahrzehnten das Experiment als lohnenden Gegenstand der Betrachtung entdeckt (vgl. NICKELS 1989; EXPERIMENTAL ESSAYS 1998 und in historischer Sicht INSTRUMENT - EXPERIMENT 2000). Lange Zeit galt nämlich auch hier das Experiment lediglich pauschal als technische Bedingung für kontrollierbare Beobachtung und seine Einordnung in den wissenschaftlichen Diskurs war im wesentlichen durch die Extrempositionen des Induktivismus (geht vom Einzelfall zum Allgemeinen, vgl. MILL 1904) bzw. Deduktivismus (leitet den konkreten Fall aus dem Allgemeinen ab, vgl. POPPER 1989; HEMPEL 1965) geprägt. Im ersteren Fall gilt das Experiment als eine Veranstaltung, deren wiederholte Durchführung der *Gewinnung* von Gesetzen dient, im anderen Fall wird es als eine Bewährungsinstanz angesehen, die über Annahmen bzw. Verwerfung hypothetisch angenommener Gesetze zu entscheiden hat. Eine gewisse Ausnahme bilden im deutschen Sprachraum Ansätze aus dem Umfeld der konstruktiven Wissenschaftstheorie, die zumindest

den technisch-apparativen Aspekten des neuzeitlichen Experiments größere Aufmerksamkeit widmen (TETENS 1987; JANICH 1997; LANGE 1999).

Verständlich wird diese Situation aus der historischen Perspektive. Alle Naturwissenschaften haben sich in methodologischen Belangen zunächst an der Physik orientiert. Sie war die erste erfolgreich operierende Naturwissenschaft und entsprechend früh haben sich bei ihr die grundsätzlichen Fragen um die Stellung des Experiments gestellt und auch beantwortet. Die anderen Naturwissenschaften sind gefolgt, indem sie bestimmte Techniken und methodische Verfahren übernommen und sich im übrigen rhetorisch stark an die Physik angelehnt haben. Dabei sind dann allerdings die Konsequenzen, die sich aus den besonderen disziplinären Fragestellungen für die Aufgabe und die Gestaltung von Versuchen ergeben haben, in den Hintergrund geraten.

Im Folgenden soll versucht werden, vor der Folie der physikalischen Experimentierpraxis die Eigenarten biologischer Versuche im allgemeinen zu skizzieren und im besonderen an einigen Projekten des ICAT-Birmensdorf zu demonstrieren.

## 2 Zur Experimentalpraxis der Physik

Es ist auf den ersten Blick erstaunlich, dass im Erfahrungsbereich der Naturwissenschaft „Physik“ die Natur im Sinne einer natürlichen Welt nicht vorkommt. Physikalische Empirie ist ausschließlich an die Welt der Labors mit deren apparativen Ausstattungen gebunden; es gibt keine „physikalische Feldforschung“ und keine „physikalischen Freilandversuche“. Aus diesem Umstand meint man gelegentlich den Schluss ziehen zu dürfen, dass die Physik eigentlich gar nicht in den Kontext der Naturforschung gehöre, sondern in den der Technik; P. LORENZEN sah z.B. in der Physik in erster Linie eine theoretische Grundlagendisziplin für die technischen Wissenschaften (LORENZEN 1987).

Aber diese Ansicht trifft nicht genau den Punkt. Ein physikalisches Experiment ist zwar immer ein technisches Unternehmen, dies aber in einem genuin physikalischen, und damit nicht in erster Linie auf Technik bezogenen Kontext. In technischer Hinsicht bildet der Aufbau eines Experiments ein technisches System, dessen Elemente, also Apparate und Messinstrumente, durch ihre Funktionsweisen und durch die Zielsetzung aufeinander bezogen sind (KÖTTER 1987). Ziel eines Experiments ist die Erfassung der Wertverläufe von physikalischen Größen, die in physikalischen Gesetzen als Variable oder Konstanten auftauchen und relativ zu bestimmten Parametereinstellungen gemessen werden. Ein physikalisches Gesetz ist in formaler Hinsicht eine mathematische Relation von physikalischen Größen; es bildet eine *abstrakte Darstellungen* von Sachverhalten, da aus diesen nur solche Merkmale in die Beschreibung aufgenommen werden, die sich allein durch physikalische Größen bzw. deren Kombination repräsentieren lassen. D.h. Gegenstände, die durch die gleichen Größen repräsentiert werden, können der Art nach nicht physikalisch unterschieden werden; entsprechendes gilt für Zustände, die durch das gleiche n-Tupel von Größen oder von Gesetzen, die durch mathematisch gleichwertige Ausdrücke (äquivalente Terme) repräsentiert werden. So behandelt z.B. die Punkt-Mechanik Körper nur als Träger von Masse, alle anderen Unterscheidungsmerkmale geometrischer oder stofflicher Art sind ausgelöscht.

Der mit der Formulierung eines physikalischen Gesetzes verbundene Geltungsanspruch lautet genau genommen also, dass jede *zulässige Konkretisierung* der abstrakten Gesetzesdarstellung den behaupteten Zusammenhang in den Wertverläufen der physikalischen Größen aufweisen wird. Aus der Logik solcher Allsätze ergibt sich, dass

derjenige, der das Gesetz überprüfen will, bis auf die Einschränkung der Zulässigkeit freie Hand hat in der Auswahl des konkreten Repräsentanten. *Zulässig* ist eine Realisation dann, wenn aus ihrer Beschreibung sich durch theoriespezifische Idealisierungsschritte das fragliche Gesetz erzeugen lässt. Dabei geht es bei der *Idealisierung* im wesentlichen darum, aus einer umfänglichen Beschreibung, die den Versuchsaufbau und alle aus dem Versuch ermittelten Daten umfasst, bestimmte Elemente als vernachlässigbar zu eliminieren (z.B. Reibung) bzw. zu modifizieren (z.B. nicht-lineare Verläufe abschnittsweise als linear zu behandeln). Dies kann in nachvollziehbarer Weise nur dann geschehen, wenn man Zugriff auf alle mögliche Störungsquellen hat und diese ausschalten bzw. in ihren Wirkungen unterdrücken kann. Gerade dies ist in der freien Natur schlecht möglich, nur im Labor hat man die technischen Möglichkeiten, Systeme so zu präparieren, dass eine reproduzierbare Einstellung von Rand- und Anfangsbedingungen gelingt. Da also für die Rolle, die dem Experiment im Rahmen einer physikalischen Argumentation zukommt, gerade die technische Kontrolle der *Randbedingungen* von entscheidender Bedeutung ist, können Naturbeobachtungen allein - und seien sie mit noch so großem technischen Aufwand angestellt worden - kein schlagendes Argument für oder gegen ein physikalisches Gesetz abgeben.

Diese etwas abstrakten Ausführungen seien an einem kleinen Beispiel verdeutlicht.

Angenommen, man will die Geschwindigkeit des Schalls in Luft messen und nutzt dazu die Beziehung  $c = \lambda f$  ( $c$ : Schallgeschwindigkeit;  $\lambda$ : Wellenlänge;  $f$ : Frequenz). Um  $c$  zu ermitteln, muss man also für eine gegebene Tonfrequenz die Wellenlänge ermitteln. Dazu kann man ein Experiment durchführen, das sich aus einem sog. Kundtschen Rohr, einem Tongenerator, einem Lautsprecher, einem Mikrofon sowie einem Oszilloskop aufbaut. Man bringt den Lautsprecher an eines der offenen Enden des Rohres, das mit dem Oszilloskop verbundene Mikrofon an das andere und stellt die Frequenz so ein, dass sich in dem Rohr eine stehende Welle bildet. Letzteres ist dann der Fall, wenn im Rohr Resonanz auftritt; Bäuche und Knoten des Schalldrucks sind dann am ausgeprägtesten, was man bei Verschieben des Mikrofons am Oszilloskop feststellen kann. Da bei einem Rohr mit offenen Rohrenden (wie im vorliegenden Fall) die Rohrlänge ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge  $\lambda$  ist, lässt sich jetzt die Wellenlänge ermitteln und damit  $c$  berechnen.

Dieses kleine Beispiel zeigt, wie das ganze technische System nur der Aufgabe dient, die Wellenlänge messbar zu machen. Auf welche Weise das am besten geschieht, kann man der physikalischen Beziehung selbst nicht entnehmen. So gibt es eine ganze Reihe von Verfahren, um das Vorliegen einer stehenden Welle zu bestimmen. Kundt selbst z.B. hat in sein Rohr feines Korkpulver eingebracht und Resonanz angenommen, wenn das Verteilungsbild der Korkpartikel am ausgeprägtesten war; sein Schüler Rubens konstruierte ein Flammenrohr, welches auf einer Seite fest, auf der anderen mit einer Membran verschlossen ist, eine Reihe feiner Austrittsöffnungen aufweist und mit einem brennbaren Gas gefüllt ist; wird das Gas an den Austrittsöffnungen entzündet und die Membran beschallt, so korreliert die Höhe der Flämmchen mit der Verteilung des Schalldrucks im Inneren des Rohres. Resonanz liegt vor, wenn das Flammenbild stabil bleibt. Die Entscheidung, welches Verfahren man verwendet, hängt von der gewünschten Messgenauigkeit ab (unter Umständen aber auch von didaktischen Zielsetzungen).

Als ein wichtiger methodologischer Grundsatz der Physik lässt sich also festhalten, dass physikalische Gesetze immer invariant zu den Formen ihrer technischen Konkretisierung formuliert werden (dies gilt übrigens entsprechend auch für die Chemie: chemische Reaktionsgleichungen sind ebenfalls invariant zu den Weisen ihrer Realisierung formuliert). Physikalische Gesetze beziehen sich zunächst auf eine offene Klasse von Experimenten und

ihre Anwendungen auf „die Natur“ außerhalb des Labors setzt voraus, dass technisch erzeugte und natürlich vorfindbare Vorgänge auf dem Abstraktionsniveau physikalischer Gesetze ununterscheidbar sind; da man aber an natürlichen Systemen die Randbedingungen nicht vollständig kontrollieren kann, lässt sich allein aus dem Fehlschlag einer solchen Anwendung nicht auf die Ungültigkeit des zugrunde liegenden Gesetzes schließen.

### 3 Zur Experimentalpraxis der Biologie

Sieht man aus dem Blickwinkel der physikalischen Experimentierpraxis auf die Biologie, dann fallen dort wenigstens zwei Besonderheiten auf: So gibt es in der Biologie Erklärungsformen, die die Physik nicht kennt, zu denen aber eine eigene Experimentierpraxis gehört; sodann wird häufig erwartet, dass biologische Versuche im Gegensatz zu physikalischen Experimenten eine Ähnlichkeit mit natürlichen Abläufen auf sehr konkreter Ebene besitzen.

#### 3.1 Experimente im Kontext funktionaler Erklärungen

Wie oben schon kurz dargelegt, kennt die Physik zunächst nur die Beschreibung von Verläufen und Zuständen und sie erklärt deren Änderung *kausal* durch die Angabe von Kraftgesetzen. Aus diesem Beschreibungs- und Erklärungskontext ergeben sich dann die spezifischen Anforderungen an die Aussagekraft eines Experiments. In der Biologie gibt es zwar auch Verlaufs- und Zustandsbeschreibungen und selbstverständlich auch kausale Erklärungen, darüber hinaus wird aber noch ein besonderes Erklärungsschema eingesetzt, nämlich das der *funktionalen Erklärung* (manchmal spricht man auch von „systemischer“ Erklärung). Eine funktionale Erklärung gibt Antwort auf die Frage, welche *Funktion oder Aufgabe* eine chemische Verbindung (z.B. ein Enzym), eine Zelle oder ein Organ in einem größeren, wiederum durch Funktionen bestimmten System zukommt (vgl. z.B. CARRIER 2000). Stellt man z.B. die Frage, welche *Rolle* Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) im Stoffwechsel der Pflanzen spielt, dann kann eine Antwort nicht darin liegen, dass man alle möglichen chemischen Umsetzungsprozesse auflistet, an denen CO<sub>2</sub> beteiligt ist, sondern darin, dass man, ausgehend von einem bestimmten Aufgabensegment des Stoffwechsels der Pflanzen, angibt, welche *Leistungen* CO<sub>2</sub> in diesem System übernimmt. In diesem Sinne funktional argumentieren z.B. SPINNLER e.a., wenn sie feststellen:

“Verschiedene Arten und möglicherweise auch verschiedene Genotypen innerhalb der Arten unterscheiden sich nun darin, wie diese Assimilate auf verschiedene Organe und Gewebe der Pflanzen verteilt werden. Beispielsweise nutzen bestimmte Pflanzenarten ihre Assimilate hauptsächlich zum Aufbau von mehr Stammmasse, um auf diese Weise möglichst schnell in die Höhe zu wachsen und ans Licht zu kommen, während andere Arten mehr in Blätter investieren, um das wenige Licht, das an ihrem schattigen Standort zur Verfügung steht, möglichst gut aufzufangen.“ (Beitrag SPINNLER et.al.in diesem Band)

Die besondere Erklärungsform erfordert auch einen besonderen Typus von Versuchen: diese müssen so beschaffen sein, dass sie die Behauptung „x hat im System S die Funktion f“ empirisch absichern. Solche Versuche unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wiederholbarkeit und ihrer technisch-kausalen Organisation *nicht* von Experimenten aus anderen Beschreibungs- oder Erklärungszusammenhängen, der Unterschied liegt vielmehr in der Interpretation, die ihre Ergebnisse zulassen: Experimente im Kontext kausaler Erklärungen demonstrieren bestimmte Zustände als Wirkungen von Abläufen, Experimente im Kontext

funktionaler Erklärungen demonstrieren hingegen, dass einerseits durch bestimmte Maßnahmen Funktionsträger daran *gehindert* werden, ihre Funktionen überhaupt oder wenigstens teilweise zu erfüllen und andererseits durch *Aufhebung* oder *Kompensation* dieser Restriktion der Funktionszusammenhang wieder hergestellt werden kann.

Der erste Biowissenschaftler, der erkannt hatte, dass Experimente zur Stützung funktionaler Erklärungen einer eigenen Logik folgen müssen, war der französische Physiologe CLAUDE BERNARD (1813-1878). Bei ihm wird deutlich, dass die Frage nach einer Funktionsweise nicht mit einem isolierten Experiment beantwortet werden kann. D.h., wer für oder gegen eine funktionale Hypothese argumentiert, muss sich in der Regel auf eine Reihe von Experimenten beziehen. Diese sind aber nicht nur Variationen eines Grundversuches, sie können vielmehr in Aufbau und Ausgestaltung recht verschieden sein und erhalten ihren Sinnzusammenhang allein durch die Logik der Argumentation, die sie stützen sollen. So muss z.B. jeder Versuch, der die Folgen des Ausfalls eines Funktionsträgers demonstrieren soll, durch einen *Vergleichs-* oder *Kontrollversuch* abgesichert werden, bei dem alle Verfahrensschritte identisch durchgeführt werden bis auf den einen entscheidenden, der den Ausfall des Funktionsträgers zur Folge hat. Dadurch wird sichergestellt, dass die ins Auge gefassten Folgen tatsächlich nur dem Ausfall und nicht etwa dem Verfahren überhaupt ursächlich zuzurechnen sind (BERNARD 1961, S. 181f, 256f). Neben dem Vergleichsversuch muß stets auch noch ein *Gegenversuch* durchgeführt werden, der demonstrieren soll, dass die ins Auge gefasste Funktion nur (und nicht nur *auch*) dem fraglichen Träger zukommt. Da es im Projekt ICAT-Birmensdorf wesentlich um die Aufklärung der *funktionalen Beziehungen* ging, die CO<sub>2</sub> und Stickstoff im Stoffwechsel der Bäume spielen, sowie um die Folgen, die sich aus einer Erhöhung dieser Parameter ergeben, musste die Versuchsanlage in Birmensdorf auch so kompliziert ausgelegt werden: Neben Biotopen, bei denen beide Umweltparameter gleichzeitig variiert wurden, brauchte man noch solche, die zu Kontroll- bzw.

Gegenversuchen dienen und bei denen entweder keiner oder jeweils nur einer der beiden Umweltparameter variiert wurde (vgl. die Darstellung von KÖRNER in der Einleitung). Funktionale Erklärungen stehen in der Regel nicht isoliert: Wenn man weiß, *welche* Aufgabe eine Substanz, eine Zelle, Organ usw. zu erfüllen hat, stellt sich sofort die Anschlussfrage, *wie* denn im einzelnen diese Aufgabe bewältigt wird, womit man wieder in den Bereich der Kausalerklärung gelangt ist. In der Physiologie werden deshalb immer den funktionalen Erklärungen rein chemische oder physikalische Abläufe und deren kausale Erklärungen zugeordnet. Dabei ist das Entdeckungsverhältnis durchaus symmetrisch, denn häufig stößt man zuerst auf Abläufe mit bestimmten Wirkungen, für die man dann eine funktionale Erklärung sucht.

So hat man z.B. aufgrund von theoretischen Überlegungen ursprünglich angenommen, dass unter einem erhöhten CO<sub>2</sub>-Eintrag sich der Blattflächenindex bei Bäumen vergrößern würde. Untersuchungen am Modellökosystem „ICAT-Birmensdorf“ haben nun (im Einklang mit anderen Versuchen) gezeigt, dass diese Vermutung falsch ist. Das deskriptive Ergebnis wurde nun *funktional* damit erklärt, dass Pflanzen auf den erhöhten Eintrag mit einer Abwehrreaktion reagieren, welche sie vor einer drohenden Überflutung mit Kohlenstoff und den damit verbundenen zerstörerischen Wirkungen schützen soll (vgl. Beitrag EGLI e.a.). Eine ähnliche Argumentationsstruktur findet sich z.B. auch bei SCHULIN, der vorschlägt, die beobachteten Effekte im Wasserhaushalt der Bäume (Deskription) als Folge einer durch Konkurrenzdruck beeinflussten Optimierung im Umgang mit Ressourcen bei veränderter Versorgungslage zu verstehen (funktionale Erklärung):

„Auf dem saueren Boden konnten die Bestände das erhöhte CO<sub>2</sub>-Angebot wegen der begrenzten Nährstoffversorgung nur bedingt zur Steigerung des Wachstums nutzen. Sie nutzten es zum anderen Teil dazu, den Wasserverbrauch zu reduzieren. Auf dem nährstoffreichen kalkhaltigen Boden konnte das erhöhte CO<sub>2</sub>-Angebot dagegen ohne Limitierung durch die Nährstoffversorgung in den Ausbau der oberirdischen „Produktionskapazität“ eingesetzt werden. Als Folge davon wurde der Wasserverbrauch sogar noch erhöht.“ (Beitrag SCHULIN und BUCHER-WALLIN in diesem Band)

### 3.2 Der Versuch als Simulation natürlicher Abläufe

In vielen Fällen muß ein Versuch in der Biologie nicht nur der allgemeinen Forderung nach Reproduzierbarkeit genügen, sondern darüber hinaus noch einer weiteren Bedingung: Durch ihn muss ein biologischer Sachverhalt technisch so realisiert werden, dass er einem natürlichen Sachverhalt in einem *konkreten Sinne ähnlich* ist. Es geht also in der Biologie z.B. nicht allein darum, ein Enzym „irgendwie“ zu synthetisieren (das wäre Sache der Chemie), sondern darum, den Synthese-Prozess so darzustellen, wie er in einem Organismus abläuft (oder ablaufen könnte). Oder, um noch ein anderes Beispiel anzuführen: Wer etwas über das *natürliche* Verhalten von Tieren durch Versuche herausbringen möchte, muß immer zeigen können, dass die Versuchsbedingungen nicht *gekünstelt* sind, sondern in wesentlichen Punkten den Bedingungen entsprechen, unter denen die Tiere außerhalb des Labors leben. Von solchen Versuchen können wir sagen, dass ihre Aufgabe darin besteht, natürliche Verhältnisse zu *simulieren*.

Der entscheidende Unterschied zwischen einem *Experiment* im engeren Sinne (also im Sinne von Physik und Chemie) und einem *Simulationsversuch* liegt also darin, dass für das Design eines Experiments allein die Frage nach der optimalen Kontrollierbarkeit der Randbedingungen von Bedeutung ist, während der Aufbau eines Simulationsversuchs in starkem Maße an *inhaltliche Auflagen* geknüpft ist, deren Einhaltung den Anspruch des Versuchs einlösen soll, natürliche Verhältnisse nachzubauen. Gelingt es nicht, in der Diskussion dieser inhaltlichen Auflagen die Ähnlichkeitsbehauptungen zu verteidigen, dann muß man den Geltungsanspruch der Ergebnisse, die man durch den Versuch stützen wollte, revidieren: Man hat dann z.B. nicht gezeigt, wie sich Tiere in bestimmten Situationen üblicher Weise verhalten, sondern lediglich, dass sie das *Vermögen* besitzen, sich in bestimmter Weise zu verhalten, was selbstverständlich eine wesentlich schwächere Behauptung darstellt. Möchte also jemand zeigen, dass Primaten sprachliche Zeichen verstehen *können*, dann wird er dies an geeigneten Experimenten demonstrieren; möchte er darüber hinaus noch zeigen, dass Affen *tatsächlich* sprachlich kommunizieren, dann sind dazu Simulationsversuche notwendig. In diesem Sinne kann man das Modellökosystem „ICAT-Birmensdorf“ als groß angelegten Simulationsversuch verstehen, bei dem auf vielfältige Weise der Frage nachgegangen wurde, ob und in welchem Maße sich die in Topfversuchen (Experimenten) ausgewiesenen Möglichkeiten auch in „Wirklichkeit“ - also bei unterschiedlichen Bodenbedingungen und unter Konkurrenzdruck - zeigen würden (vgl. Einleitung KÖRNER). Der Sinn biologischer Simulationsversuche liegt darin, sich durch die Schaffung eines technischen Ambientes schrittweise und kontrolliert an die Bedingungen heran zu tasten, unter denen sich die interessierenden Abläufe im „richtigen Leben“ vollziehen.

Wie schon gesagt, gibt es in der Biologie auch Experimente in dem oben geschilderten, für die Physik typischen Sinne. Neben den genannten Fällen spielen Experimente insbesondere dort eine Rolle, wo es um die Feststellung physikalischer oder chemischer Parameter geht. Als typisch hierfür können z.B. die Untersuchungen zur Steifigkeit und Brüchigkeit von Bäumen

unter erhöhter CO<sub>2</sub>- bzw. Stickstoff-Zufuhr gelten (vgl. Beitrag SPINLER e.a., Teil 3). Die Belastungsversuche wurden unter *standardisierten Laborbedingungen* unternommen, wobei mit den physikalischen Verfahren, die man zur Gewinnung der Parameterwerte eingesetzt hatte, nicht beansprucht wurde, bestimmte natürliche Belastungsvorgänge zu simulieren. Entsprechend vorsichtig muss man bei der Übertragung der Ergebnisse solcher Experimente sein, wenn es z.B. um die Frage nach der Anfälligkeit eines den veränderten Umweltbedingungen ausgesetzten Waldes für Sturmschäden geht.

In welcher Beziehung sich ein Versuchsaufbau und die ins Auge gefassten ungestörten Lebensbedingungen *gleichen* müssen, damit die für eine Simulation geforderte Ähnlichkeitsrelation verteidigt werden kann, lässt sich auf methodologischer Ebene *allein* nicht beantworten. Allerdings lassen sich ein paar Hinweise für die Struktur einer möglichen Antwort geben: Immer ist auszugehen von den Ergebnissen einer Feldbeobachtung auf der einen und von einem experimentell gesicherten theoretischen Grundwissen auf der anderen Seite. Aus der Feldbeobachtung erhält man Kenntnis über die Faktoren, die für die Simulation Relevanz bekommen könnten; die theoretischen Kenntnisse gewichten dann diese Faktoren und geben Hinweise darauf, welche für einen adäquaten Nachbau unverzichtbar sind.

Wenn man wissen möchte, welchen Einfluss unterschiedliche CO<sub>2</sub>- oder N-Konzentrationen auf den pflanzlichen Stoffwechsel haben, dann ist in einem *ersten Schritt* experimentell vorzugehen und ein Modell-Organismus standardisierten und kontrollierbaren Umweltbedingungen auszusetzen. Unter solchen Verhältnissen lässt sich dann zeigen, ob und in welchem Umfang bestimmte Merkmale des Modell-Organismus auf eine Variation der Konzentrationsparameter reagieren. Die so erhaltenen Gesetzmäßigkeiten stellen allerdings nur einen prinzipiellen Zusammenhang dar, der sich unter anderen als den idealen Laborbedingungen nicht oder zumindest nicht in diesem Maße zeigen muss. Vielmehr ist oft schon aus theoretischen Gründen zu erwarten, dass Einflüsse aus der natürlichen Umwelt des Modell-Organismus, die im Labor gerade unterdrückt oder fix gehalten wurden, die festgestellten Effekte verstärken oder aber kompensieren werden. Um diese Zusammenhänge zu studieren, muss man in kontrollierter Weise die idealen Bedingungen des Experiments aufheben und Bedingungen schaffen, die den natürlichen ähnlich sind (also z.B. an Stelle von Substrat natürlichen Boden benutzen und verschiedene Pflanzen in Konkurrenz um die knappen Lebensressourcen bringen). Nur so wird man zu einer begründeten Erwartung kommen können, wie sich *faktische* Änderungen der CO<sub>2</sub>- bzw. N-Konzentration in der Atmosphäre auf natürliche Lebensgemeinschaften auswirken.

Beispielsweise kann ein erhöhtes CO<sub>2</sub>-Angebot theoretisch entweder zu einer erhöhten Stoffwechselaktivität oder aber auch zu einer Drosselung der Enzymaktivitäten führen (weil ein Sollwert mit geringerem Aufwand erreicht werden kann). Welche dieser beiden möglichen „Strategien“ tatsächlich gewählt wird, ob von verschiedenen Pflanzen in unterschiedlicher Weise und in Abhängigkeit von anderen Faktoren (Bodentyp!), das kann nur der Versuch am Modellökosystem zeigen (vgl. Beitrag EGLI e.a.).

Ein weiteres Beispiel sei noch aus den Untersuchungen von V. WIEMKEN e.a. (in diesem Band) angeführt. Hier standen im Teil 2 die experimentell gewonnenen Erkenntnisse im Hintergrund, dass unter erhöhtem CO<sub>2</sub>-Eintrag bei Bäumen vermehrt Kohlenstoff in die Wurzeln transportiert und dadurch bei den mit den Bäumen vergesellschafteten Pilzen die Myzel- und Mykorrhizabildung gesteigert sowie das Fruchtkörpergewicht erhöht wird, während ein erhöhter Stickstoff-Eintrag sich auf die Fruchtkörperbildung der Mikorrhizapilze negativ auswirkt. Die Versuche, die am Modellökosystem „ICAT-Birmensdorf“ durchgeführt worden sind, zeigen nun aber, dass die Eigenschaften des Bodens für die Antwort der

Mikorrhizen auf Umweltveränderungen entscheidend sind wodurch sich eine schlichte Übertragung von experimentell gewonnenen Ergebnissen auf natürliche Verhältnisse verbietet.

### 3.2. Das Experiment im Kontext von Hypothesengewinnung und -überprüfung

Wie schon eingangs angedeutet, können Versuche unterschiedlichen Status in der wissenschaftlichen Argumentation besitzen. Der sicherlich geläufigste Fall liegt dort vor, wo eine Hypothese formuliert worden ist und ein Experiment so eingerichtet werden soll, dass die aus ihm gewonnenen empirischen Daten eine eindeutige Bestätigung oder Widerlegung der Hypothese erlauben. Aber dieser Zusammenhang von Hypothese und Experiment bildet nur einen Teilaspekt der naturwissenschaftlichen Forschung.

Die entscheidende Leistung einer Forschungstätigkeit liegt nämlich häufig darin, vage oder sehr abstrakt formulierte Problemstellungen so zu „bearbeiten“ und zu konkretisieren, dass sie die Formulierung von *entscheidungsfähigen* Hypothesen überhaupt erst erlauben. Die Anstrengungen, die in diese Richtung unternommen werden, werden von der traditionellen Wissenschaftstheorie pauschal dem so genannten „Entdeckungszusammenhang“ zugeordnet, der als methodologisch schwach strukturiert gilt und deshalb auch nicht sehr intensiv untersucht wird. Aus dieser Perspektive wird aber die Forschungswirklichkeit verkannt, in der der Schritt vom theoretisch Denkbaren zur entscheidungsfähigen Hypothese gerade als der interessante angesehen wird und Projekte, die in diese Richtung weisen, mit entsprechender Aufmerksamkeit gewürdigt werden. Auch dieser Weg ist von Versuchen begleitet, welche in diesem Zusammenhang allerdings noch keine überprüfende, sondern eine orientierende Aufgabe haben (der schon erwähnte C. BERNARD sprach deshalb auch von „*orientierenden Versuchen*“). Eine Orientierung ist immer dann erforderlich, wenn theoretische Überlegungen und vorliegende experimentelle Befunde verschiedene Möglichkeiten, wie sich bestimmte Veränderungen der Umweltparameter auf Organismen auswirken können, als gleichermaßen plausibel erscheinen lassen. Durch den Versuch soll dann ermittelt werden, was faktisch der Fall ist. Das heißt, orientierende Versuche sind rein *deskriptiv* angelegt und liefern für sich genommen noch keine Erklärungen für bestimmte Fragestellungen; sie bilden vielmehr die *empirische Basis* für die Formulierung von entscheidungsfähigen Hypothesen und den sich anschließenden Erklärungen. Um orientierende Versuche richtig beurteilen zu können, muss man Wissenschaft als dynamisches Geschehen begreifen, in dessen Verlauf Problemstellungen modifiziert und insbesondere unter dem Eindruck empirischer Ergebnisse treffender und lösungsträchtiger formuliert werden. Der Wert einer Untersuchung bemisst sich in dieser Sichtweise nie allein daran, ob eine Frage eine Antwort gefunden hat, sondern ob sich damit zugleich fruchtbare Anschlussfragen stellen lassen.

Der Situation, dass Versuche im Rahmen des ICAT-Projekts zur Klärung von theoretischen Möglichkeiten beitragen sollten, sind wir schon verschiedentlich begegnet. Hier seien abschließend noch zwei weitere typische Beispiele für orientierende Versuche angeführt. So lässt sich z.B. allein von der Tatsache ausgehend, dass Pflanzen auf erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration und erhöhten N-Eintrag mit vermehrtem Wachstum reagieren, nichts über eine mögliche Änderung der Verteilung des Biomasse-Zuwachses in der Pflanze selbst aussagen. Zu klären ist also zunächst einmal auf deskriptiver Ebene, wann mehr in die Stammmasse, wann mehr ins Wurzelwerk investiert wird, ob sich Fichte und Buche ähnlich verhalten und welche Rolle die Bodenbeschaffenheit spielt. Im Beitrag SPINNLER e.a. (Teil 1 und 2) sind entsprechende Untersuchungen dargestellt und diskutiert. Von besonderem Interesse ist dabei das Ergebnis, dass offensichtlich die Biomasseverteilung innerhalb einer Art nicht oder nur

wenig auf eine Erhöhung von CO<sub>2</sub> oder Stickstoff reagiert. Damit hat man die Beschreibung eines Sachverhalts gegeben, der dann selbst zum Gegenstand physiologischer bzw. genetischer Erklärungen gemacht werden kann.

Von ähnlichem Charakter sind auch die Arbeiten, die sich mit dem Einfluss der genannten Umweltparameter auf die Holzqualität beschäftigen (Beitrag SPINNLER e.a., Teil 3). Die Untersuchungen ergaben, dass sich Steifigkeit und Brüchigkeit bei Fichte und Buche unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration bzw. erhöhtem N-Eintrag ändern (nach Bodentyp unterschiedlich). Auch hier ergibt sich erst aus den deskriptiven Ergebnissen ein Erklärungsbedarf, der Anstoß zu weiteren Untersuchungen geben könnte:

„Da sich in unserem Fall die Holz-Dichte nicht durch die Behandlung änderte, müssen wir annehmen, dass die Änderung der mechanischen Parameter (Steifigkeit und Brüchigkeit) von anderen, hier nicht erfassten, Faktoren beeinflusst wurde. Dies könnten Strukturunterschiede (Faserlänge, Fibrillenwinkel etc.) oder aber beispielsweise Unterschiede im Grade der Verholzung (Lignifizierung) sein, die sich nicht unbedingt in der Dichte des Holzes widerspiegeln müssen.“ (SPINNLER et.al., in diesem Band)

#### 4 Schluss

Das einfache Bild vom Experiment, das eine Hypothese bestätigt oder widerlegt, mag vielleicht auf den einfachen Schülerversuch zutreffen, von der Forschungspraxis selbst liefert es keine adäquate Darstellung. Diese Feststellung gilt schon für die Physik und erst recht für die Biologie. Zwar spricht man gelegentlich von *dem* Großversuch „ICAT-Birmensdorf“, aber bei näherem Hinsehen kann man erkennen, dass hier eine Vielzahl von ganz unterschiedlichen, zu jeweils speziellen Fragetypen passenden Versuchstypen lediglich an einen Ort konzentriert wurde. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden schließlich in ein sehr komplexes Argumentationsgefüge eingebaut, welches sich als erster großer Schritt hin zu einer verständnisvollen Vorstellung von der Entwicklung unseres Waldes unter den sich abzeichnenden Umweltveränderungen erweisen könnte. Insoweit zeichnet das Modellökosystem „ICAT-Birmensdorf“ nicht nur die Komplexität des Geschehens in der Natur nach, sondern eröffnet zugleich einen tiefen Einblick in die Komplexität der empirischen Forschung in der Biologie.

#### Literatur

- BERNARD, C., 1961: Einführung in das Studium der experimentellen Medizin (hrsg. v. Rothschild). Tübingen : Barth (1. Aufl. Paris 1865)
- CARRIER, M., 2000: Multiplicity and Heterogeneity: On the Relations between Functions and their Realizations. Stud. Hist. Phil. Biol. & Biomed. Sci. 31: 179-191
- EXPERIMENTAL ESSAYS - VERSUCHE ZUM EXPERIMENT, 1998 (M. Heidelberger/F. Steinle, Hrsg.). Baden-Baden: Nomos
- HEMPEL, C. G., 1965: Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science. New York: Free Press
- INSTRUMENT - EXPERIMENT. HISTORISCHE STUDIEN, 2000 (Chr. Meinel, Hrsg.). Berlin: GNT
- KÖTTER, R., 1987: Zum Verhältnis von technischer und naturwissenschaftlicher Rationalität. Phil. Nat. 24: 216-234
- LANGE, R., 1999: Experimentalwissenschaft Biologie. Methodische Grundlagen und Probleme einer technischen Wissenschaft vom Lebendigen. Würzburg: Königshausen & Neumann

- LORENZEN, P., 1987: Lehrbuch der konstruktiven Wissenschaftstheorie. Mannheim e.a.: B.I.-Wissenschaftsverlag
- MILL, J. ST., 1904: A Sytem of Logic Ratiocinative and Inductive. 8. Aufl., New York: Harper
- NICKELS, TH., 1989: Justification and Experiment. in: The uses of experiment (D. Gooding/T. Pinch/S. Schaffer, eds.), Cambridge: CUP: 299-333
- POPPER, K., 1989: Logik der Forschung. 9. Aufl., Tübingen: Mohr
- TETENS, H., 1987: Experimentelle Erfahrung. Hamburg: Meiner