

ist irreversibel, weil er nicht spontan ohne Hilfe, d.h. ohne Kraftaufwand in umgekehrter Richtung geschehen kann. Daraus wiederum schließt Wiener auf die Richtung der Zeit, die im Newtonschen Universum noch (idealtypisch) umkehrbar war, weil etwa die Bewegung der Sterne oder die Mechanik einer Uhr als in beide Richtungen ablaufend konsistent erklärbar waren. In einem thermodynamischen Universum hingegen ist die Zeit unumkehrbar, weil sich aus Rauschen nur durch Energieaufwand Ordnung erschaffen lässt, Energieverbrauch aber neue Unordnung schafft und sich somit die Ausgangsbedingungen nicht wiederherstellen lassen. Wieners Schlussfolgerung lautet, dass Informationsprozessierung unumkehrbar ist und eine unidirektionale Zeit voraussetzt, weil sie gerichtet ist und ihre Schritte aufeinander aufbauen, und eben dies gilt gleichermaßen für Organismen und für kybernetische Maschinen, für tote und für lebende Vorgänge, für komplexe Systeme also, die weder nach den alten Mustern des Vitalismus noch nach denen des Mechanismus beschreibbar sind.³³⁸ Letztlich verwandelt sich, so könnte man sagen, jeder Organismus, dessen Organisation gegen die Entropie der Außenwelt operiert, in eine Umgebung.

3.8 Kontrollierte Umgebungen

Wie an den Beispielen von Bertalanffys sowie Ashbys und Wieners deutlich wird, versucht die Kybernetik seit den 1940er Jahren, zu erklären, mit welchen Rückkopplungen, Organisationsformen und Informationsübertragungen ein System in einem entropischen *environment* so viel Stabilität und damit Autonomie von der Umgebung aufrecht erhalten kann, dass es nicht seiner Abhängigkeit von der Außenwelt beraubt wird. Um ökologische Relationen der Un/Abhängigkeit zu erklären, wird die Grenze zwischen Innen und Außen nicht ontologisch definiert, sondern operativ in der Wechselwirkung fundiert. Sie muss durchlässig für Informations-, Energie- und Materieströme sein und doch eine stabile Hülle bilden, um die Reziprozität von *environment* und Organismus zu gewährleisten. Diese kybernetische Abgrenzung des *environments* vom Organismus durch ein Gefälle der Entropie stellt insofern einen Bruch mit bisherigen Umgebungskonzepten dar, als sie Umgebungen allein durch diese Ströme definiert und damit die Frage nach deren Gestaltbarkeit radikal verschiebt. Mit diesem Verständnis ist eine Transformation der Dyade von Organismus und *environment* verbunden, die sich nun durch eine Grenze der Ordnung gegenüberstehen, zugleich aber energetisch verschränkt sind. Dieser Ansatz wird für die Ökosystem-Ökologie der Nachkriegszeit zum theoretischen Ausgangspunkt und eröffnet die Möglichkeit neuer Methoden der künstlichen Gestaltung von Umgebungen durch die Modifikation von Zirkulationen. Folgerichtig

338 Wiener (1948): *Cybernetics*. S. 44.

schreibt Norbert Wiener 1950: »We have modified our environment so radically that we must now modify ourselves in order to exist in this new environment.«³³⁹ Ökologische Relationen sind für die Kybernetik dieser Zeit Bedingungen des Lebens, die allen Erfordernissen angepasst werden können.

3.8.1 Rekursionen der Kybernetik

Der von Wiener sowie von von Bertalanffy vorgestellte Ansatz der Analyse energetischer Wechselwirkungen zwischen Systemen wird rasch in die Ökologie getragen, denn es ist offensichtlich, dass die neuen Erklärungsmodelle der Kybernetik die endgültig unbrauchbar gewordenen Konzepte der Teleologie und der Finalität ablösen können und zugleich eng an die Ingenieurwissenschaften und die Mathematik gebunden sind. In dieser Hinsicht wird die kybernetische Prägung der Ökologie von George Evelyn Hutchinson vorangetrieben, einem an der Yale University tätigen englischen Limnologen, der bereits an der ersten Macy-Konferenz zum Thema *Circular Causal and Feedback Mechanisms in Biological and Social Systems* teilnimmt.³⁴⁰ Auch bei Ashbys Vorstellung des Homöostaten ist Hutchinson anwesend und kritisiert die Analogie zwischen der Maschine und dem Nervensystem. Eine andere Analogie kann er jedoch im Dialog mit Gregory Bateson unterstreichen, als dieser folgende Frage stellt: »I should like to put a question to our ecologist: if an environment consists largely of organisms, or importantly of organisms, is not the learning characteristic of Ashby's machine approximately the same sort of learning as that which is shown by the ecological system?« Hutchinson antwortet kurz und bündig: »Yes, definitely it is.«³⁴¹

Hutchinson versucht, die Gültigkeit von Wieners Kybernetik auch für die Ökologie zu untermauern und sie mit dem Ökosystem-Ansatz zusammenzuführen. Er beschreibt Ökosysteme als natürliche zirkuläre Systeme, die über die Mechanismen der Rückkopplung zur Selbstkorrektur und zum Ausgleich von Ungleichgewichten in der Lage sind. Im Konkreten geht es in seiner Forschung um die Ansammlung und Verteilung von Kohlenstoff und Phosphor in Gewässern, deren Energiezirkulation von Organismen beeinflusst werden, die selbst von der Verfügbarkeit dieser Stoffe abhängen.

Kurze Zeit nach besagter Macy-Konferenz fordert Hutchinson in seinem einflussreichen Text »Circular Causal Systems in Ecology«, lebende und nichtlebende Systeme anhand ihrer energetischen Kopplungen und zirkulären, nichtlinearen

339 Wiener (1950): *The Human Use of Human Beings*. S. 46.

340 Vgl. Slack, Nancy G. (2010): *G. Evelyn Hutchinson and the Invention of Modern Ecology*. New Haven, London, Yale University Press.

341 Ashby: »Homeostasis (1956)«. S. 617 (Diskussion).

Kausalitäten auf der gleichen Ebene zu behandeln, um so Populationen in ihren *environments* anhand von Energie- und Materieströmen beschreiben zu können. Hutchinson stellt die Frage, wie innerhalb eines Systems aus Populationen und ihren Umgebungen Rekursivität wirksam wird: »If a set of properties in either system changes in such a way that the action of the first system on the second changes, this may cause changes in properties of the second system which alter the mode of action of the second system on the first. Circular causal paths can be established in this manner.«³⁴² Hutchinsons Ansatz besteht darin, dieses von Norbert Wiener übernommene Modell zirkulärer Rekursionen, in denen die Wirkungen der Ursachen die Ursachen der Veränderung jener Ursachen sind, die die Wirkung bewirkt haben, in die Ökologie einzuführen. Rekursion bedeutet in diesem Kontext die Wiedereinspeisung der Veränderungen der einen Seite der Dyade in ihre Wechselwirkung mit der anderen Seite. In der Reziprozität von *environment* und Organismus kommt rekursiven Prozessen somit eine konstitutive Funktion zu, weil sie für die Kopplung der beiden Seiten durch eine Verschränkung ihrer Operationen sorgen.³⁴³ Ökologische Relationen, durch die ein Organismus aufgrund seiner Abhängigkeit unabhängig von seiner Umgebung ist, sind ebenfalls ein Effekt rekursiver Kopplung. Anhand von chemischen Kreisläufen im Meer und in Seen stellt Hutchinson ein mathematisches Vokabular zur Beschreibung solcher rekursiven Kopplungen bereit. Das Phänomen, mit dem sich Ökologie nunmehr beschäftigen muss, ist die Herausbildung von Stabilität durch Rekursion und Zirkularität, d.h. die Identifikation jener Faktoren, die Schwankungen ausgleichen und selbstkorrigierende Mechanismen etablieren, mit denen ein Organismus oder eine Population in Autonomie mit dem *environment* verbunden bleibt.

Dieses Verständnis des *environments* als unhintergehbare Grundlage der Ökologie bringt Hutchinson bereits 1940 in einer harschen Kritik an Frederic Clements letztem, gemeinsam mit Victor Shelford verfasstem Buch *Bio-Ecology* in Stellung. Der Ansatz, den die beiden zu dieser Zeit überaus einflussreichen Ökologen vorstellen, beschreibe zwar Gemeinschaften ähnlich wie Ökosysteme als Superorganismen, ignoriere aber den Metabolismus dieser Superorganismen und damit die Quantifizierbarkeit der Verhältnisse in einem Ökosystem. So würden die Sprachen der Mathematik sowie der Biogeochemie vernachlässigt und die Bedeutung von ökologischen Relationen für die ökologische Forschung missverstanden. Mit

342 Hutchinson, George Evelyn: »Circular Causal Systems in Ecology«. In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 50/4 (1948), S. 221-246. Hier: S. 221.

343 Thomas Pringle hat argumentiert, dass das Problem der Rekursivität die politische Handhabung von Ökosystemen prägt und gezeigt, wie in dieser Hinsicht ökonomische und ökologische Verfahren konvergieren: Pringle, Thomas: »The Ecosystem Is an Apparatus. From Machine Ecology to the Politics of Resilience«. In: ders./Koch, Gertrud/Stiegler, Bernard (Hg., 2019): *Machine*. Lüneburg, Meson Press, S. 49-103.

diesem Vorwurf an die Autoren formuliert Hutchinson eine Überzeugung, hinter welche die Ökosystem-Ökologie kaum noch zurückgehen kann: »This neglect of the biogeochemical approach is due in part to the authors insistence that the community and the environment must be separated and should not be considered as forming part of the same ecological unit.«³⁴⁴ Trenne man auf diese Weise den Organismus vom *environment* und behandle beide als separate Einheiten, könnten die Zirkulationen nicht beschrieben werden, die zwischen ihnen stattfinden. Alle theoretischen und experimentellen Instrumente zur Erforschung dieser Wechselwirkungen auf quantitativer, statistischer Basis blieben dann wirkungslos. Um eine solche mathematische und biochemisch verfasste Formalisierung von Ökosystemen auf der Grundlage der dyadischen Verschränkung geht es der kybernetischen und an Ökosystemen orientierten Ökologie. Gegen Ende der 1940er Jahre findet Hutchinson in der Kybernetik die entsprechenden konzeptuellen Grundlagen, die er wiederum mit einer ökologischen Herangehensweise anreichert. Anders gesagt: Hutchinson gelingt es, mit den von Geoffrey Bowker beschriebenen »cybernetic universals« ökologisches Wissen zur Bestätigung der kybernetischen Grundannahmen heranzuziehen, die er dann wiederum zur Erklärung der ökologischen Phänomene verwendet.³⁴⁵

Ganz im kybernetischen Sinne geht es spätestens in »Circular Causal Systems in Ecology« um eine neue, vornehmlich mathematische und formalisierte Beschreibungssprache für das Verhältnis von Organismen zu entropischen *environments*. Zu diesem Zweck wendet Hutchinson probabilistische Verfahren und das Konzept des Feedbacks auf die ökologische Populationsbiologie an, um mit kybernetischen Modellen zu erklären, wie Fluktuationen und Stabilitäten zustande kommen.³⁴⁶ Ihn interessieren mithin die selbstregulierenden Vorgänge und energetischen Abläufe zwischen natürlichen Organismen und ihren Umgebungen, deren Dynamik er in seinem monumentalen, vierbändigen *Treatise on Limnology* ab 1957 anhand der Kreisläufe anorganischer Materie in Seen und Gewässern beschreibt.³⁴⁷ An diesen Beispielen zeigt er, wie ein System, d.h. eine Skalierungsebene, die *environments*

344 Hutchinson, George Evelyn: »Review of Bio-Ecology«. In: *Ecology* 21/2 (1940), S. 267-268. Hier: S. 267.

345 Bowker beschreibt die rhetorischen Strategien, mit denen es der Kybernetik gelingt, sowohl als Leitwissenschaft aufzutreten, die andere Disziplinen anleitet, als auch als Werkzeugkasten, der anderen Wissenschaften notwendige Methoden bereitstellt, um neue Phänomene auf eigenständige Weise zu erfassen. Vgl. Bowker, Geoffrey: »How to be Universal. Some Cybernetic Strategies, 1943-70«. In: *Social Studies of Science* 23/1 (1993), S. 107-127.

346 Besonders deutlich ist dieses Vorgehen in Hutchinson, George Evelyn: »Concluding Remarks«. In: *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22 (1957), S. 415-427.

347 Vgl. Hutchinson, George Evelyn (1957): *A Treatise on Limnology. Volume 1: Geography, Physics, and Chemistry*. New York, Wiley.

und Lebewesen umfasst, seine Organisation in der Zeit und gegen die Entropie aufrechterhält. Das von Clements angenommene holistische Gleichgewicht, in dem Lebewesen der Ordnung des Ganzen dienen und das *environment* eine Ressource für diesen Zweck darstellt, soll durch die Untersuchung von Rückkopplungsmechanismen ohne übergeordnete organische Ordnung ersetzt werden. Hutchinson betont in diesem Kontext, dass zwischen dem *environment* eines individuellen Organismus und dem *environment* einer Population unterschieden werden sollte, was ihn zu folgendem begriffsstrategischen Vorschlag anregt: »It might be useful for those who argue that the word environment should refer to the environment of a population, and those who consider it should be the environment of an organism, to use the word both ways for a couple of months, writing ›environment‹ when a single individual is involved, ›Environment‹ when reference is to a population.«³⁴⁸ Aufgrund seines relationalen Bezugs zum Umgebenen kann der Begriff *environment* für Hutchinson zur Beschreibung unterschiedlicher Maßstabsebenen jeweils neu skaliert werden.

Hutchinson greift in seinen Arbeiten die Synthese ökologischer Gedanken auf, die sein im Alter von 27 Jahren verstorbener Doktorand Raymond Lindeman 1942 geleistet hatte. Dessen Aufsatz »The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology« wird zunächst aufgrund der im Text nicht aufgearbeiteten empirischen Grundlagen und den spekulativen theoretischen Implikationen von der Zeitschrift *Ecology* abgelehnt und erst nach zahlreichen Gutachten posthum veröffentlicht.³⁴⁹ In diesem Aufsatz stellt Lindeman, wie Frank Golley festgehalten hat, das Ökosystem-Konzept in einen empirischen Kontext und zeigt, aufbauend auf den Daten, die er im Rahmen seiner Dissertation über *Ecological Dynamics in a Senescent Lake* gewonnen hatte, erstmals systematisch dessen Anwendbarkeit.³⁵⁰ Er übersetzt seine Messungen in Modelle der Dynamik eines Ökosystems, um auf der Grundlage dieser Vorarbeiten den Cedar Bog Lake in Minnesota als ökologische Einheit anhand seiner empirisch untersuchten Energie- und Materieströme zu beschreiben, in denen Produktion und Dekomposition organischer Stoffe einen Kreislauf bilden. Lindemans Aufsatz gilt bis heute als kanonische Studien von Ökosystemen anhand eines Gegenstands, der sich durch seine Abgeschlossenheit für ein solches Vorgehen besonders eignet. Wie Claus Pias gezeigt hat, ist es nicht verwunderlich, dass gerade die Limnologie als die Wissenschaft der Binnengewässer das Konzept des Ökosystems besonders früh aufnimmt und weiterentwickelt, hat sie es doch mit vergleichsweise isolierten, eindeutig begrenzten und ohne größeren Aufwand beobachtbaren Systemen

348 Hutchinson: »Concluding Remarks«. S. 416.

349 Vgl. zur Entstehung dieses Textes ausführlicher Cook, Robert Edward: »Raymond Lindeman and the Trophic-Dynamic Concept in Ecology«. In: *Science & Education* 198/4312 (1977), S. 22–26.

350 Vgl. Golley (1993): *A History of the Ecosystem Concept in Ecology*.

zu tun.³⁵¹ In ihnen werden die Konsequenzen von Veränderungen schnell sichtbar, weil die als System gefassten Umgebungen nicht vom Umgebenen trennbar sind.

Während das Ökosystem bei Tansley als Instrument einer letztlich noch zur Naturgeschichte tendierenden Ökologie fungiert, der es um die Sukzession von stabilen Zuständen geht, beginnt mit Lindemans Arbeit eine methodische Vereinheitlichung durch die Neubeschreibung biologischer Entitäten auf energetischer Ebene. Sein Ziel ist die Formulierung von Differentialgleichungen, die darstellen, wie Nahrung in einem Ökosystem unterschiedliche sogenannte trophische Level durchläuft und wie sich durch die biochemische Zirkulation Zustände des Sees voneinander abgrenzen lassen. Zu diesem Zweck fertigt er eine einflussreiche Abbildung an, deren Darstellung des Ökosystems als Zyklus im letzten Kapitel ausführlich thematisiert werden wird. Für Lindeman ist mit Verweis auf die Thermodynamik die Zirkulation von Stoffen und Energie im Inneren eines Systems dafür verantwortlich, dass das System stabil bleibt. Sein Aufsatz, der ähnlich wie Tansleys Text zunächst vernachlässigt, dann aber für die kybernetisch geprägte Ökologie zur Referenz wird, referiert eingangs die unterschiedlichen Ansätze der Gemeinschaftsökologien des bereits erwähnten deutschen Biologen Karl Friederichs, des Russen Vladimir Vernadsky, der den biogeochemischen Ansatz und den Begriff der *Biosphäre* prägt, sowie Tansleys. In diesem Sinn verhandelt Lindemans Text die bis dahin in der Ökologie formulierten Konzepte des *environments*, unterwirft sie dem Vorhaben der Formalisierung und schreibt sich so in die Entwicklung des ökologischen Umgebungsdenkens ein.

Den ökosystemischen Ansatz zeichnet Lindeman zufolge ein neuer Umgang mit dem *environment* aus: Es wird nicht, wie in der bis dahin dominanten, von Clements vertretenen populationsbiologischen Botanik als limitierender Faktor der Pflanzen des Sees gesehen und ebenfalls nicht wie in der Zoologie als Lebensraum der Tiere am und im See. Für Lindeman sind nicht einzelne Arten oder gar Individuen der Gegenstand der Ökologie, sondern die auf Energie- und Materieströme reduzierten Nahrungsketten innerhalb eines Ökosystems, die er als sogenannte *trophic cycles* in seiner jahrelangen Arbeit am Cedar Bog Lake statistisch erfasst. Individuen treten damit als ökologische Einheiten ebenso in den Hintergrund wie Populationen. Fragen der langfristigen Sukzession von Zuständen des Sees werden durch die Berechnung der kurzfristigen zyklischen Dynamik von metabolischen Effizienzzraten abgelöst. Dadurch gewinnt das *environment* an Bedeutung, weil alle

351 Vgl. Pias, Claus: »Paradiesische Zustände. Tümpel – Erde – Raumstation«. In: Butis Butis (Hg., 2007): *Stehende Gewässer. Medien der Stagnation*. Berlin, Diaphanes, S. 47-66. Elizabeth DeLoughrey und Peder Anker haben unabhängig voneinander einen ähnlichen Gedanken am Beispiel der Bevorzugung von Inseln zur ökologischen Forschung durchgespielt (vgl. Anker (2001): *Imperial Ecology* sowie DeLoughrey: »The Myth of Isolates«).

Energieströme zwischen ihm und den Organismen stattfinden. Entsprechend begreift Lindeman Organismen als *environments* anderer Organismen und damit als Variablen von Energie und Materie. Eben weil das *environment* nicht vom Organismus und die biotische Gemeinschaft nicht von ihrer abiotischen Umgebung getrennt werden können, sind isolierte Organismen, Populationen oder *environments* als Einheiten der Ökologie ungeeignet. Als »primary ecological unit«³⁵² besteht das von Lindeman untersuchte Ökosystem des Sees aus der Menge dieser Faktoren und umfasst die Dynamik der Dyade.

Ähnlich wie für Hutchinson verliert auch für Lindeman angesichts seiner in vier Jahren am See zusammengetragenen limnologischen Forschungsergebnisse eine Grundunterscheidung der Biologie an Evidenz: »Upon further consideration of the trophic cycle, the discrimination between living organisms as parts of the ›biotic community‹ and dead organisms and inorganic nutritives as parts of the ›environment‹ seems arbitrary and unnatural.«³⁵³ Dieses Zitat, das ebenfalls auf Clements und Shelfords *Bio-Ecology* zielt, ist eine Absage nicht nur an die bis dahin vorherrschende Populationsökologie, sondern auch eine Kritik an weiten Teilen der Biologie: Die unhintergehbare Trennung in lebendige und nicht-lebendige Komponenten der Natur und die Abwertung des *environments* als Supplement der Organismen erweist sich angesichts des Austauschs von Energie innerhalb eines Systems nicht nur als ›willkürlich‹, sondern als ›unnatürlich‹. Gleichsam nebenbei zeigt dieses letzte Attribut, wie sehr sich das Verständnis des Gegenstands der Biologie verschoben hat und mit welchem Anspruch die Ökologie seitdem auftreten kann. Die ›natürliche‹ Ebene der Beobachtung zielt nunmehr auf die Verteilung von Energie- und Materieströmen zwischen gleichberechtigten Teilen des Zyklus, kann *environment* und Organismus nicht mehr trennen und bestimmt Leben als ihre rekursive Kopplung.

Lindemans und Hutchinsons ökologischer Ansatz sieht *environments* nicht als Supplemente von Lebewesen, als tote Umgebungen im Gegensatz zu lebendigen Organismen oder als Limits des Lebendigen an, sondern unterläuft diese voraussetzungsreichen Vorannahmen. Indem die Relationalität und Beobachterabhängigkeit der Dyade in den Mittelpunkt rücken, können die kybernetisch geschulten Ökologen die ganze Breite möglicher Faktoren in *environments* registrieren, weil ihre Grenzen mit dem zusammenfallen, was messbar ist. Zwar kritisiert Lindeman die inkohärente Verwendung des Begriffs *environment* – mitunter »synonymous with the cosmos«³⁵⁴ –, doch gilt seinem neuen Ansatz der See als ökologische

352 Lindeman, Raymond L.: »The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology«. In: *Ecology* 23/4 (1942), S. 399-417. Hier: S. 399.

353 Ebd.

354 Ebd.

Einheit, die sowohl biotische als auch abiotische Elemente umfasst. Das Ökosystem ist strikt auf den See beschränkt und dadurch so skaliert, dass es beschreibbar bleibt. Eben darin besteht der Gewinn des Ökosystem-Konzepts, das nicht mehr die ganze Natur umfassen soll, sondern einen Beobachter einführt, der ein einzelnes System beobachtet und den Maßstab wechseln kann.

Als Hutchinson die Rückführung aller Bestandteile eines Ökosystems auf Energie- und Materieflüsse nach Lindemans Tod erfolgreich in eine Methode für die künftige Ökologie transformiert, wird das Konzept des Ökosystems deren theoretischer Fundierung. An die Stelle ontologischer Annahmen über den Holismus des Ganzen tritt die Untersuchung der Inputs und Outputs in einer Black Box. Relevant sind weniger die innere Struktur eines Ganzen oder dessen Harmonie, als die messbaren Ströme zwischen *environments* und Organismen. Die Annäherung an die Kybernetik verspricht, so Pias, »das sichere Erreichen von Zielen durch das Einrichten bestimmter Mechanismen, die von der genauen Kenntnis der Wege suspendieren.«³⁵⁵ Es geht nicht darum, das Ganze als solches zu verstehen, sondern die einzelnen Faktoren auf der Basis von Energie- sowie Materieströmen und in Hinblick auf ihr Zusammenwirken in den Blick zu nehmen: »If some environmental variable, x , fluctuates over a range of values, and p is the probability of values in excess of a certain given value, k , and if the occurrence of a certain biological event be implied by the condition x is greater than or equal to k , then it is clear that p is the probability of the occurrence of the biological event.«³⁵⁶ Ändert sich ein System derart, dass es auf neue Weise auf ein benachbartes System wirkt, ändern sich auch dessen Faktoren, so dass dieses System auf neue Weise auf das alte System rückwirkt. Dieser Prozess, den Hutchinson auf die Beschreibung aller Lebensvorgänge ausdehnen will, hat ein offenes Ende und führt zu keinem statischen Endzustand, sondern zu einer durch Selbstorganisation und Selbstregulation gesicherten Stabilität. Mit diesem Ansatz gelingt es Hutchinson, die Biochemie und die Ökologie kybernetisch zu reformieren. Leben ist damit als Wechselwirkung von *environment* und Organismus modellierbar geworden und seine Stabilität erscheint als das Resultat kybernetischer Prozesse, die auch technisch gestaltet werden können.

3.8.2 Ökologie der Systeme: Eugene P. und Howard T. Odum

Stabilität, daran schließen die Brüder Eugene P. und Howard T. Odum als Schüler Hutchinsons ab den 1950er Jahren an, ist im kybernetischen Sinne dynamisch und daher ständigen Rückkopplungs- und Wiederherstellungsprozessen des Gleichgewichts unterworfen. Ein Ökosystem durchläuft in dieser Hinsicht ständig neue

355 Pias: »Paradiesische Zustände«. S. 47.

356 Hutchinson: »Circular Causal Systems in Ecology«. S. 241.

Stadien, die jedoch, so die leitende Annahme, auf eine Reihe basaler energetischer Grundregeln zurückgeführt werden können. In die Dynamik eines auf diese Weise beschriebenen Ökosystems kann, dies ist der Ansatzpunkt vor allem des jüngeren Bruders Howard T. Odum, regulierend eingegriffen werden, wenn genug Information über das fragliche Ökosystem zur Verfügung steht. Die Odum-Brüder formulieren auf der Grundlage dieser Annahme erstmals explizit den Anspruch eines *ecological engineering*, das sich die regelhafte Zirkulation von Energie zunutze macht.³⁵⁷ Auf unterschiedlichen Karrierewegen kommen sie zu ähnlichen Positionen und Methoden. Während Eugene P. Odum, der fast zehn Jahre ältere Bruder, in Zoologie promoviert und später mit dem von ihm gegründeten Institute for Ecology an der University of Georgia sowie dem Lehrbuch *Fundamentals of Ecology* von 1953 die Institutionalisierung des Fachs vorantreibt, studiert Howard T. Odum Biologie, Ornithologie und Meteorologie, promoviert bei Hutchinson und setzt dessen Arbeit in enger Zusammenarbeit mit seinem Bruder fort.

Die Odums gelten als zentrale Protagonisten der Nachkriegsökologie, weil sie vor diesem Hintergrund die Idee der Selbstorganisation in eine mittlerrweile an nordamerikanischen Universitäten gefestigte Ökologie transferieren, die sich, wie Stephen Bocking im Detail gezeigt hat, ab den 1960er Jahren zunehmend mit dem Anspruch konfrontiert sieht, eine wissenschaftliche Grundlage für den *environmentalism* dieser Zeit zu formulieren.³⁵⁸ Weil das Konzept des Ökosystems in der Lage ist, die komplexen Abhängigkeiten unterschiedlicher Faktoren innerhalb eines Systems sichtbar zu machen, wird ihm die Rolle zugesprochen, auch destruktive Tendenzen aufzuzeigen und die Grundlage für regulierende Eingriffe zu liefern. Auf der Basis dieser Ökologie soll, so die von Bocking geschilderte zeitgenössische Forderung, ein Set von alternativen Umgangsweisen mit dem *environment* entwickelt werden. Sie reichen von konservierenden Maßnahmen bis hin zum *ecological engineering*, das eng mit der Arbeit Howard T. Odums verbunden ist und dazu dienen soll, die menschliche Nutzung von Ökosystemen energetisch zu optimieren. Die

357 Wichtig ist in diesem Kontext auch die Rolle ihres Vaters, des Soziologen Howard Washington Odum, der in seinen Lehrbüchern, allen voran in *Understanding Society* von 1947, den ökologisch-holistischen Ansatz aufnimmt, sich auf Lewis Mumford, Patrick Geddes sowie die Regional Planning Association of America bezieht und fragt »how the total environment has been responsible for much of society as we observe it in the individual and the group.« (Odum, Howard W. (1947): *Understanding Society. The Principles of Dynamic Sociology*. New York, McMillan. S. 13.) Er unterscheidet in *natural* und *cultural environment*, erläutert aber nicht, worin deren Unterschied besteht. Diese konzeptuelle Ungenauigkeit mag dem Lehrbuchcharakter geschuldet sein, doch bleibt *environment* in Howard W. Odums Werk weitestgehend auf natürliche Umgebungen beschränkt, während der holistische Anspruch auch im Werk seiner Söhne zum Tragen kommt.

358 Vgl. Bocking (1997): *Ecologists and Environmental Politics*.

Ökologie dieser Zeit, ein inkohärentes Feld, auf dem Populationsbiologie, Evolutionstheorie, Informationstheorie, Thermodynamik und die Theorie physikalischer Gleichgewichte zusammenwirken, ist spätestens seit Anfang der 1950er Jahre unweigerlich in eine politische Rolle gedrängt, ohne die ihre wissenschaftliche Ausrichtung nicht mehr zu verstehen ist.

Der Wissenschaftshistoriker Peter J. Taylor hat im Hintergrund des Vorgehens der Odums einen »technocratic optimism«³⁵⁹ identifiziert, für den die Gestaltung der Welt gemäß objektiver, technischer Prinzipien der Schlüssel zur Lösung zivilisatorischer Herausforderungen ist. Entsprechend soll im Folgenden dieser Ansatz der Gestaltung von Umgebungen als früher systematischer Versuch dargestellt werden, durch die Kenntnis der inneren Gesetzmäßigkeiten von Ökosystemen die Grundlagen ihrer geplanten Gestaltung zu formulieren.³⁶⁰ Dabei wird deutlich werden, dass aus Sicht der Odums Technologie und Ökosysteme nicht voneinander getrennt werden sollten, sondern vielmehr in energetischer Hinsicht miteinander verzahnt sind.

Die Ökosystem-Ökologie der Odum-Brüder zielt auf die Operationalisierung aller Bestandteile eines Ökosystems. Dessen Eigenschaften bestehen in seiner strukturellen Organisation, der Interdependenz seiner Komponenten, seiner regulierten Homöostase, den Schwellenwerten der Stabilität sowie der Tendenz zu einem Zustand des Gleichgewichts bei steigender Adaption und damit einhergehender Kontrolle des *environments*.³⁶¹ Die Prozesse eines Ökosystems werden auf dieser Grundlage als Black Box gefasst, um es zu steuern, denn relevant für dieses Vorgehen sind allein Materie- und Energieströme als Vorgänge der Speicherung, Absorption, Freisetzung und Transformation von Energie in ökologischen Relationen. Ein Ökosystem definiert Eugene P. Odum auf den ersten Seiten seines Lehrbuchs *Fundamentals of Ecology* wie folgt: »Any unit that includes all of the organisms (i.e., the »community«) in a given area interacting with physical environments so that a flow of energy leads to a clearly defined trophic structure, biotic diversity, and material cycles (i.e., the exchange of materials between living and

359 Vgl. Taylor, Peter J.: »Technocratic Optimism, H. T. Odum, and the Partial Transformation of Ecological Metaphor after World War II«. In: *Journal of the History of Biology* 21/2 (1988), S. 213-244. Entsprechend hat Taylor die Verbindung zur auch Buckminster Fuller beeinflussenden Technokratie-Bewegung der 1930er Jahre hervorgehoben, die soziale und gesellschaftliche Verhältnisse durch die objektive Berechnung der nötigen Energie ersetzen und Politiker sowie Politikerinnen durch Ingenieure und Ingenieurinnen ablösen lassen will. Vgl. dazu auch Madison, Mark Glen: »Potatoes Made of Oil. Eugene and Howard Odum and the Origins and Limits of American Agroecology«. In: *Environment and History* 3/2 (1997), S. 209-238.

360 Zur Herausbildung der Unterschiede zwischen der Ökosystem-Ökologie, der Populationsökologie und der Systemökologie in den 1960er Jahren vgl. Palladino, Paolo: »Defining Ecology. Ecological Theories, Mathematical Models, and Applied Biology in the 1960s and 1970s«. In: *Journal of the History of Biology* 24/2 (1991), S. 223-243.

361 Vgl. Odum, Eugene P. (1953): *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia, Saunders.

non-living parts) within the system is an ecological system or ecosystem.«³⁶² Diese Definition benennt die maßgebliche Blickwendung der Ökosystem-Forschung, wie sie die Odum-Brüder aufbauend auf Tansley, Lindeman und die Kybernetik vorantreiben. Damit wird ein weiterer Schritt von einer essentiellen zur einer funktionalen Bestimmung des Lebendigen gemacht. Um die Verhältnisse innerhalb eines Systems oder von Systemen zueinander zu analysieren und schließlich zu modifizieren, benötigt die Ökologie weder Wissen um die Substanz des Ganzen noch der Teile, sondern allein Information über Inputs und Outputs.

Eine wichtige Inspirationsquelle für die Odum-Brüder ist der österreichisch-amerikanische Versicherungsmathematiker und Chemiker Alfred Lotka. In seinem Buch *Elements of Physical Biology* von 1925, das 1956 neu aufgelegt wird, argumentiert er, dass die Biologie gänzlich durch Energie- und Materieströme beschreibbar sei und stellt Gleichungen zur Beschreibung von Kreisläufen in organischen wie anorganischen Systemen mit irreversiblen, d.h. thermodynamischen Stoffzyklen auf.³⁶³ Für Lotka sind Veränderungen eines Systems Modulationen der in ihm enthaltenen Energie, die über definierte Zeiträume ablaufen und als temporale Prozesse quantifiziert werden können. Mit diesem Verfahren der Quantifizierung energetischer Transformationen macht Lotka, wie Ariane Tanner unterstrichen hat, alle Prozesse des Lebens formal beschreibbar.³⁶⁴ Für diese energetische Perspektive ist die ökologische Relation der Dyade von entscheidender Bedeutung, denn die Energie, die einen Organismus am Leben hält, kommt immer von außen und wird im »system [organism plus environment]«³⁶⁵ verteilt, gespeichert, verarbeitet und transformiert. Unter Rückgriff auf Henderson, J.B.S. Haldane und Uexküll schreibt Lotka: »It is not the individual species, the individual components of the system, that evolve, but the system as a whole, comprising all the species and their environment.«³⁶⁶ Ähnlich wie Lotka arbeiten die Odum-Brüder in verschiedenen institutionellen Kontexten an der Formalisierung der Ökologie als »biological science of environmental interrelations«³⁶⁷.

Neben Lotkas Ansatz wird auch die kybernetische Systemtheorie in Eugene P. Odums *Fundamentals of Ecology*³⁶⁸ von 1953, besonders aber in der überarbeiteten

362 Odum, Eugene P. (1971): *Fundamentals of Ecology. Third Edition*. Philadelphia, Saunders. S. 8.

363 Lotka formuliert insbesondere Formeln zur Berechnung der Populationsdynamik (vgl. Lotka, Alfred (1925): *Elements of Physical Biology*. Baltimore, Williams and Wilkins. Vgl. auch Taylor: »Technocratic Optimism«. S. 226).

364 Tanner, Ariane (2017): *Die Mathematisierung des Lebens. Alfred James Lotka und der energetische Holismus im 20. Jahrhundert*. Tübingen, Mohr Siebeck. S. 254–270. Tanners Studie unterstreicht die Bedeutung Lotkas für die Energetik der Odums eindrücklich.

365 Lotka (1925): *Elements of Physical Biology*. S. 16.

366 Ebd., S. 135.

367 Odum (1953): *Fundamentals of Ecology*. S. 4.

368 Vgl. ebd. Donato Bergandi hat die drei Auflagen von 1951, 1959 und 1971 verglichen und die Wandlungen des holistischen Themas verfolgt, das einen zunehmenden Funktionalismus

ten Neuauflage dieses Buches von 1971, zur theoretischen Grundlage der Ökologie erklärt. Als erstes Kompendium auf diesem Feld wird das Buch in zwanzig Sprachen übersetzt und wirkt institutionalisierend, da es die Ansätze von Lindeman und Hutchinson mit universalistischem Anspruch systematisiert und zugleich eine Methode an die Hand gibt, die kybernetische Perspektive auf beliebige Ökosysteme zu übertragen.³⁶⁹ Mit der Kybernetik im Sinne Hutchinsons, in *Fundamentals of Ecology* in eine allgemeinverständliche Sprache und zahlreiche erläuternde Diagramme gebracht, wird die Verteilung von Energie zum Ansatzpunkt ökologischen Denkens.³⁷⁰ Die Beschreibung von Ökosystemen muss sich demnach strikt an die Instrumentarien der entsprechend ausgerichteten Physik und Chemie halten.

Um Energieströme darzustellen, verwendet *Fundamentals of Ecology* zahlreiche Diagramme, auf denen ähnlich wie bei Lindeman die Energie- und Materieverteilung zwischen Lebewesen und ihren *environments* in schematischer Form dargestellt wird. Auch Howard T. Odum setzt solche Diagramme von Energiekreisläufen geradezu exzessiv ein: Sein Buch *Systems Ecology* von 1983 enthält auf 600 Seiten 1400 solcher Zeichnungen.³⁷¹ Bei beiden Brüdern dienen Diagramme nicht als Repräsentationen konstanter Verhältnisse, sondern als heuristische Hilfsmittel der Analyse wie der Prognose. Das Medium des Textes reicht den Odums nicht, um die Energie- und Materieströme sowie ihre Wechselwirkungen zu erfassen.

Innerhalb der biologischen Wissenschaften festigt dieser Ansatz die Rolle der Ökologie, auch wenn das vermeintlich reduktionistische Vorgehen Odums keineswegs unumstritten ist. Obwohl weite Teile der Ökologie den energetischen Prämissen nicht folgen, herrscht nach dem Erscheinen des Buches in den USA ein breiter Konsens darüber, dass Ökosysteme das sind, was Ökologinnen und Ökologen erforschen. In institutioneller Hinsicht ist Odums Engagement, das von der Gründung des genannten Institute for Ecology in Georgia über die intensive Zusammenarbeit mit der Atomic Energy Commission im Oak Ridge Laboratory, der größten ökologischen Forschungseinrichtung dieser Zeit, bis hin zu einer Führungsrolle im International Biological Program reicht, ein wichtiger Faktor für die Etablierung der Ökologie als selbständiger Wissenschaft.

Howard T. Odum, der als Ornithologe und Doktorand Hutchinsons an einigen Macy-Konferenzen teilnimmt, entwickelt auf vergleichbare Weise einen informationstheoretisch orientierten, auf Modellierung und Simulation basierenden Forschungsansatz, der im Rahmen des International Biological Program in den Jahren

stützt (vgl. Bergandi, Donato: »Reductionist Holism«. An Oxymoron or Philosophical Chimera of E. P. Odum's Systems Ecology«. In: *Ludus Vitalis* 3/5 (1995), S. 145-180).

369 Zur Institutionalisierung in der Folge von Odums Buch vgl. Colley (1993): *A History of the Ecosystem Concept in Ecology*. S. 70f.

370 Vgl. zu Odums Bezug auf die Kybernetik Odum, Eugene P./Patten, Bernard C.: »The Cybernetic Nature of Ecosystems«. In: *The American Naturalist* 118/6 (1981), S. 886-895.

371 Odum, Howard T. (1983): *Systems Ecology. An Introduction*. New York, Wiley.

von 1964 bis 1974 von staatlicher Seite massiv gefördert wird. Dieses Programm, das die Anwendung systemtheoretischer Ansätze in der Ökosystem-Forschung vorantreibt, gibt der Politik einen Rahmen zur Vorbereitung des *National Environmental Policy Acts*, der noch Thema sein wird.³⁷² Die Ökologie wird zu dieser Zeit zum Ausgangspunkt interdisziplinärer Großforschung, die bis zum *Biosphere II*-Projekt der 1990er Jahre reicht, für das sich Howard T. Odum ebenfalls einsetzt. Beide Brüder sind darüber hinaus, wie im sechsten Kapitel gezeigt wird, in der *space ecology* engagiert und beteiligen sich im Auftrag der NASA an der Planung von Raumstationen als geschlossenen ökologischen Systemen.

Die Aufgabe der Ökologie besteht den Odum-Brüdern zufolge darin, mit Hilfe von Konzepten der Rückkopplung, der Selbstorganisation und der Thermodynamik den Zusammenhang unterschiedlicher Umgebungsfaktoren auf eine Population systemtheoretisch zu modellieren und zugleich empirisch zu erforschen. Entsprechend fordern beide Brüder die Anwendung von mathematischen, statistischen und schließlich computergestützten Methoden zur Erforschung der Energie- und Materieströme in Ökosystemen sowie zur Vorbereitung ihrer Modifikation. Die dem Systembegriff inhärente Beobachterperspektive impliziert dabei eine Skalierbarkeit: Das größte Ökosystem ist der Planet Erde, von dem aus die Maßstäbe bis hin zu kleinen Systemen wie einem Tümpel oder einem Aquarium herunterskaliert werden können. Die *Fundamentals of Ecology* gelten für alle diese Maßstabsebenen, die das Buch nacheinander durchspielt.

Die auf diesen Überlegungen aufbauende Analyse von Energieströmen in Ökosystemen setzt voraus, dass Organismen und ihre *environments* als dyadische Einheiten begriffen werden. Beispielhaft hierfür ist Odums Dissertation über die Verteilung von Strontium in Ökosystemen von 1950, geschrieben bevor dieser radioaktive Stoff wichtig für die Rüstungsindustrie wurde.³⁷³ Dort rekonstruiert er die nach kybernetischen Prinzipien ablaufende Regulation unterschiedlicher Energiezyklen. Gemeinsam mit seinem Bruder führt er daran anschließend auf Puerto Rico sowie an den Atollen von Eniwetok im Südpazifik Ende der 1950er Jahre umfangreiche Studien durch, die am Schauplatz zahlreicher Atomtests radioaktive Isotope nutzen, um natürliche Kreisläufe und ihre Störungen zu verfolgen und zu modellieren.³⁷⁴ Die Erforschung der Auswirkungen radioaktiver Strahlung auf ein Ökosystem ist mit diesem Ansatz möglich, weil Fluktuationen den Odums zufolge

372 Vgl. zur Bedeutung des International Biological Program für die Ökologie McIntosh (1985): *The Background of Ecology*. S. 219ff.

373 Vgl. Odum, Howard T. (1950): *The Biogeochemistry of Strontium. With Discussion on the Ecological Integration of Elements*. Dissertation, Yale University.

374 Vgl. DeLoughrey: »The Myth of Isolates«. Zur *radiation ecology* vgl. Kwa, Chunglin: »Radiation Ecology, Systems Ecology and the Management of the Environment«. In: *Science and Nature* 8 (1993), S. 213-249.

auf Veränderungen des Energiehaushalts zurückgeführt werden können.³⁷⁵ Damit gelingt es den Brüdern, finanziell durch die Rüstungsindustrie gedeckt, die bislang der experimentellen Forschung nur schwer zugängliche Ökologie in dieser Hinsicht zu reformieren und ihr jenes Prestige zu verschaffen, das um 1970 gesellschaftliche Auswirkungen zeigen wird.

3.8.3 *Ecological Engineering*

Mit den Mitteln der Formalisierung und Vereinheitlichung von Faktoren und Prinzipien will Eugene P. Odum die Krisen seiner Zeit lösen – Ressourcenmangel und Umweltzerstörung sind darunter besonders dringlich. Dass der Mensch Ökosysteme zerstören, aber auch stabilisieren kann, ist eine der zentralen Thesen seines Lehrbuchs, die mit einem Verweis auf ein Diktum Hutchinsons erläutert wird: »The ecologist should be able to show that it is just as much fun and just as important to repair the biosphere as to mend the radio or the family car.«³⁷⁶ Derartige Eingriffe finden immer auf der Ebene des *environments* durch negatives Feedback statt, denn nur dort kann in energetische Kreisläufe interveniert werden.³⁷⁷

Howard T. Odum, der ein Kapitel über Energiekreisläufe zum Lehrbuch seines Bruders beiträgt, geht in diesem Kontext noch einen Schritt weiter und prägt den Begriff des *ecological engineering*. In seinem Aufsatz »Man and the Ecosystem« beschäftigt er sich 1962 mit den Möglichkeiten, Ökosysteme durch menschliche Eingriffe zu gestalten, wie dies etwa durch Aufforstungen oder regulierte Fischerei bereits seit langem geschehe. Solche Eingriffe sollen nunmehr durch die Ökologie auf eine neue Basis gestellt werden, um die verheerenden Resultate etwa von Pestiziden und Düngemitteln in der Landwirtschaft zu vermeiden. Diese Modifizierbarkeit des *environments* korrespondiert mit dem seit der Mitte des 20. Jahrhunderts wachsenden Bedürfnis nach Planung und Prognose, aus denen Regulierungsmaßnahmen und Kontrollverfahren abgeleitet werden. Effizientes Management garantiert demnach die Erhaltung des *environments* in einem stabilen Ökosystem.

Um eine theoretische Grundlage für ein neuartiges *ecological engineering* zu schaffen, sei es zunächst nötig, den Energieeinsatz menschlicher Eingriffe in Ökosysteme zu quantifizieren: »A new enterprise, ecological engineering, is required to fashion synthetic systems partly under old energy budgets of nature and partly with special power take-off from civilisation.«³⁷⁸ Mit dem technischen Fortschritt in der Nutzung von natürlichen *environments* durch die sogenannten *environmental*

375 Taylor: »Technocratic Optimism«. S. 232.

376 Odum (1953): *Fundamentals of Ecology*. S. 12.

377 Vgl. Odum (1971): *Fundamentals of Ecology*. S. 405.

378 Odum, Howard T.: »Man and the Ecosystem«. In: Waggoner, Paul E./Ovington, J. D. (Hg., 1962): *Proceedings of the Lockwood Conference on the Suburban Forest and Ecology*. New Haven, Connecticut Agricultural Experiment Station, S. 57-75. Hier: S. 57.

industries der Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft ginge ein ständiger Anstieg der künstlichen Einspeisung von Energie in die jeweiligen Ökosysteme einher. So sei es typisch für die Landwirtschaft, dass der Einsatz von Energie in Form von Treibstoff die Menge der notwendigen Sonnenenergie übersteige – mit fatalen Folgen, denn die betroffenen Ökosysteme werden so instabil, dass sie nur noch mit ständig neuer Energiezufuhr künstlich stabil gehalten werden können.

Von den *environmental industries* unterscheidet sich das *ecological engineering* Odum zufolge durch den Energieeinsatz gemäß des *maximal power principle*. Laut diesem Prinzip für offene thermodynamische Systeme sind jene Ökosysteme am erfolgreichsten, in denen sich Energie mit den geringsten Verlusten zwischen ihren verschiedenen Kreisläufen verteilt.³⁷⁹ Energie wird somit zum Maßstab der Skalierung.³⁸⁰ Unter *ecological engineering* versteht Odum entsprechend »environmental manipulations by man using small amounts of supplementary energy to control systems in which the main energy drives are still coming from natural sources.«³⁸¹ Es geht, wie Odum 2002 kurz vor seinem Tod im Eröffnungsvortrag der ersten Jahrestagung der American Ecological Engineering Society resümiert, darum, die selbstorganisierenden Kräfte eines Systems zu nutzen, um mit wenig Aufwand verstärkende Effekte hervorzurufen: »Environmental engineering develops technology for connecting society to the environment. But the technology is only half of the interface with environment. The other half of the interface is provided by the ecosystems as they *self-organize* to adapt to the special conditions.«³⁸² Im Gegensatz zu dem, was Odum *environmental engineering* nennt, nutze das *ecological engineering* die Kapazitäten des fraglichen Ökosystems selbst und verstärke oder lenke es in die gewollte Richtung. Zwar richten sich beide Formen des *engineerings* auf das *environment* und nicht auf die umgebenen Organismen oder Populationen, doch begreift das *ecological engineering* dieses *environment* als Teil eines rückgekoppelten Ökosystems. *Environmental engineering* sei lediglich der Versuch, etwa durch geeignetere Düngemittel oder verbesserte Bewässerungstechnik den Ertrag zu verbessern. *Ecological engineering* gehe es darum, den Energiehaushalt des Ökosystems an die Gesetze der *ecoenergetics* anzugleichen, um den Verbrauch mit

379 Vgl. Odum, Howard T.: »Limits of Remote Ecosystems Containing Man«. In: *The American Biology Teacher* 25/6 (1963a), S. 429–443.

380 Eugene Odum unterscheidet in seinem einflussreichen Aufsatz »The Strategy of Ecosystem Development« in »junge« und »reife« Ökosysteme. Letztere würden die Distribution von Energie optimieren, indem mehr Energie als in »jungen« Systemen zirkuliere (vgl. Odum: »The Strategy of Ecosystem Development«).

381 Odum, Howard T./Siler, Walter L./Beyers, Robert J./Armstrong, Neal: »Experiments with Engineering of Marine Ecosystems«. In: *Publications of the Institute of Marine Science University of Texas* 9 (1963), S. 373–403. Hier: S. 374.

382 Odum/Odum: »Concepts and Methods of Ecological Engineering«. S. 339. Hervorhebungen im Original.

technischen Mitteln zu optimieren und so das System stabiler und damit auf lange Sicht und im Hinblick auf andere, verbundene Ökosysteme auch produktiver zu machen.

Exemplarisch für *ecological engineering* sind nachhaltige Forstwirtschaft oder Fischerei sowie die Umwandlung von ehemaligen Abwasser- oder Industriegebieten in Naturreservate. Anhand des seit Möbius für die Ökologie einschlägigen Beispiels der Austernzucht in künstlich angelegten Meerwasserbecken zeigt Odum, wie durch gezielte Eingriffe in den Metabolismus, etwa durch die Veränderung der Fließgeschwindigkeit des Wassers oder durch dessen gezielte Anreicherung mit Nährstoffen, ein Ökosystem verbessert werden kann.³⁸³ Entsprechend gelte es, die Auswirkungen von Düngemitteln, die Fütterung von Wildtieren oder das *wildlife management* mit einer ökosystemischen Perspektive zu untersuchen und zu optimieren. Ökologische Planung ist in diesem Sinne die gezielte Anwendung von Energie durch *ecological engineering*. Als dessen drei Aufgaben benennt Odum an anderer Stelle »explanation, prediction and control«³⁸⁴. Im kybernetischen Sinn ist dabei die Analyse der systemischen Relationen der erste Schritt zur Vorhersage zukünftiger Zustände des Systems, die dann auf der Basis dieses Wissens durch gezielte Eingriffe kontrolliert werden können. Unvorhersagbarkeit und Kontrolle sind in diesem Sinne keine sich ausschließenden Prinzipien, sondern beziehen sich aufeinander: ein kontrolliertes Ökosystem bleibt auf höchster Ebene unvorhersagbar, diese Unvorhersagbarkeit steht aber nicht im Widerspruch zur Intention der Kontrolle.

Mit dieser Methode versuchen die Odums in den 1960er Jahren, wie Mark Glen Madison ausgeführt hat, die Agrarkultur in den USA zu reformieren.³⁸⁵ Sie kritisieren die Instabilität und Exzesse des Energieverbrauchs nicht nur in der nordamerikanischen Landwirtschaft, sondern auch in der Gesellschaft. Ihr Gegenmittel besteht darin, den energetischen Gesetzmäßigkeiten folgend das ungehemmte Wachstum durch eine Ausrichtung auf Stabilität zu ersetzen. Sie können damit aber Madison zufolge weder den Rest der Ökologie noch die verantwortlichen politischen Institutionen überzeugen. Dennoch verraten ihre Überlegungen viel über den Zusammenhang von Technologie und Ökologie sowie den Anspruch der Gestaltung von *environments*.

Die *agroecology*, die den Odum-Brüdern vorschwebt, soll die Aufgabe des landwirtschaftlichen Managements übernehmen – aus Bäuerinnen und Bauern sollen

383 In einem anderen Aufsatz stellt Odum die experimentelle Untersuchung von ökologischen Eingriffen ausführlich dar: Odum/Siler/Beyers/Armstrong: »Experiments with Engineering of Marine Ecosystems«.

384 Odum (1983): *Systems Ecology*. S. 579.

385 Vgl. Madison: »Potatoes Made of Oil«.

Ökologinnen und Ökologen werden. Dazu sei es nötig, zusätzliche kleine Energiequellen in das System zu integrieren, anstatt innerhalb des Ökosystems den Ertrag zu maximieren, indem durch Dünge- und Insektenschutzmittel das natürliche Wachstum durch künstliche Energiezufuhr ersetzt wird. Entsprechend schreibt Howard T. Odum in der zweiten Auflage von *Environment, Power, and Society*: »We now have chickens that are little more than standing egg machines, cows that are mainly udders on four stalks, and plants with so few protective and survival mechanisms that they are immediately eliminated when the power-rich management of man is withdrawn. Such varieties are complementary to the industrialized agriculture and cannot be used without it.«³⁸⁶ An die Stelle des Primats des durch übermäßigen Energieeinsatz erzeugten Wachstums soll ein Streben nach einem Gleichgewicht im Einklang mit den Gesetzmäßigkeiten von Ökosystemen treten, um den Ertrag im Abgleich mit dem Energieeinsatz zu optimieren. Dieser Ansatz ist keineswegs deckungsgleich mit dem, was heute unter ökologischer Landwirtschaft verstanden wird, sondern bedeutet vielmehr eine von energetischen Prinzipien geleitete Steuerung. In dieser Hinsicht kommt der Ökosystem-Ökologie den Odums zufolge, eine gesellschaftliche Aufgabe zu.

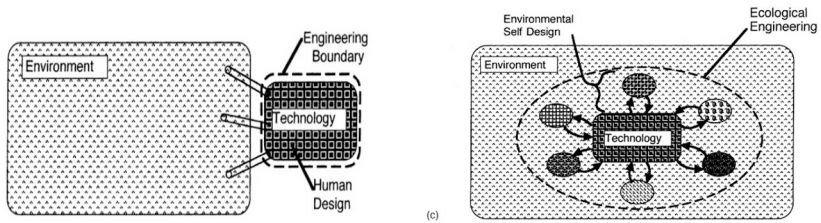
Diese grundlegende Verschränkung von Technologie, *environment* und ökosystemischer Selbstorganisation versucht Odum in besagtem Eröffnungsvortrag für die American Ecological Engineering Society von 2002 in zwei Diagrammen zu verdeutlichen, die gerade in ihrer Verworrenheit viel über diese Verschränkung verraten. Die argumentative Funktion dieser Diagramme für den Text besteht darin, die beiden Formen des *engineerings* anhand des Verhältnisses von *environment* und Technologie zu unterscheiden. Die beiden Darstellungen repräsentieren das System als Fläche und ermöglichen so einen Überblick von einer externen Position. Im Zuge dieser Umwandlung wird die zeitliche Abfolge der Prozesse in einem Ökosystem durch die Verbindungen und Relationen im Diagramm als Topologie erfasst.

Das erste Diagramm (Abbildung 3.9) soll *environmental engineering* darstellen. Es zeigt anhand eines schraffierten Vierecks das *environment* und daneben ein weiteres Viereck, das als *technology* gekennzeichnet ist. Es ist von einer *engineering boundary* umgeben und durch *human design* bezeichnet. Kanalartige Röhren verbinden die separaten Felder von *environment* und *technology*. Im zweiten Diagramm (Abbildung 3.10) des *ecological engineering* ist ebenfalls ein gerahmtes, schraffiertes Viereck zu sehen. Innerhalb dieses *environments* befinden sich sechs kleine, unterschiedlich schraffierte Kreise, die von einem großen Kreis mit der Bezeichnung *ecological engineering* umgeben sind. Sie stehen mit einem mittigen Viereck namens *technology* in bidirektionaler Wechselwirkung. Ein Pfeil kennzeichnet das Gebiet zwischen dem *technology*-Viereck und dem Rahmen des *ecological engineering* als *environmental*

386 Odum, Howard T. (1971): *Environment, Power, and Society for the Twenty-First Century. The Hierarchy of Energy*. New York, Columbia University Press.

self-design. Was die kleinen Kreise darstellen, wird weder in der Zeichnung noch im Text erläutert. Mit dieser Abbildung will Odum seiner Erläuterung zufolge darstellen, wie im *environmental engineering* Technologie außerhalb des *environments* steht und von außen auf dieses einwirkt, während sie im Falle des *ecological engineering*s in das *environment* eingeschlossen ist. Dass die Technologie damit als Umgebene ins Zentrum der Umgebung tritt, ist ein nicht intendierter Nebeneffekt, der jedoch viel über den zugrundeliegenden Impuls verrät.

Abbildung 3.9 und 3.10 – *Ecological Engineering*.



Quelle: Odum, Howard T./Odum, B.: »Concepts and Methods of Ecological Engineering«. In: *Ecological Engineering* 20/5 (2003), S. 339-361. Hier: S. 340.

Bei beiden Abbildungen irritiert das Verhältnis des *environments* zum nicht näher spezifizierten Außen. Durch die Rahmung sind die *environments* beider Diagramme vom Außen getrennt. Im ersten Fall ist das *environment* jedoch mit der äußerlichen Technologie verbunden. Im zweiten Fall gibt es lediglich eine Abgrenzung zum Außen, während die Technologie Teil des *environments* ist und sogar in dessen Mitte steht. Das vom *environment* Umgebene ist in keiner der Zeichnungen dargestellt. Es handelt sich um Umgebungen ohne Umgebenes, die selbst von einem unspezifischen Außen umgeben sind. *Environment* und Technologie können, wie in der zweiten Abbildung zu sehen, ineinander integriert werden, insofern es gelingt, ihren Energiehaushalt aneinander anzupassen. Technik und *environment* sind demnach keine wesensverschiedenen Kategorien, sondern nach vergleichbaren energetischen Prinzipien organisierte Bereiche, die, so die Annahme, nur sorgfältig aneinander angepasst werden müssen, um ein stabiles und dennoch produktives Ökosystem zu erhalten.

Dieser technikaffine Ansatz spiegelt sich ebenfalls in den Forschungsmethoden der Odums. Spätestens mit den Großprojekten des International Biological Program beginnt auch der Computer in diesem Kontext eine Rolle zu spielen. Für Howard T. Odum fallen die Programmierbarkeit von Ökosystemen und die Programmierbarkeit von Computern zusammen, weil die Ströme von Ökosystemen nicht nur simulierbar, sondern auch programmierbar sind. Um 1960 baut er, wie neben Madison auch Peter Kangas geschildert hat, Modelle von Ökosystemen zu-

nächst als analoge elektrische Kreisläufe mit Kabeln, Schaltern, Widerständen und Relais nach, um durch den Fluss der Elektronen den Fluss der Materie zu repräsentieren und die Energiewerte in Spannungen und Widerstände zu übersetzen.³⁸⁷ Dabei greift er auf die von Royal Norton Chapman 1931 eingeführte Idee einer mathematisch und statistisch unterlegten *ecoeconomics* zurück, die dieser mit den Elektrizitätsmetaphern von *potential* und *resistance* beschrieben hatte.³⁸⁸ Diese radikal informationstheoretische Sicht erlaubt die Berechnung und schließlich auch computertechnische Simulation komplexer, non-linearer Systeme, mit welcher die Effekte von Veränderungen dargestellt und somit auch Möglichkeiten des Eingreifens verdeutlicht werden können.³⁸⁹

Auf einer Ebene und mit einer Methodik können auf der Grundlage dieser konzeptuellen und experimentellen Verfahren sowie ab Mitte der 1960er Jahre mit Hilfe von computergestützten Simulationen so unterschiedliche Ökosysteme wie Atolle, Seen oder Weizenfelder analysiert werden. Da Ökosysteme per definitionem offen sind und aufgrund der Abwendung von der Teleologie keinem vorgegebenen Ablauf unterliegen, können sie, hier setzen die Odum-Brüder an, manipuliert und gesteuert werden, indem man Input und Output reguliert. Dass dabei Natur beziehungsweise das *environment* zu etwas Kontrollierbarem wird, hat bereits der Wissenschaftshistoriker Gregg Mitman hervorgehoben: »Nature had become a system of components that could be managed, manipulated and controlled. The ecologist's task increasingly became that of electrical engineer [sic]; ecologists were to be professional managers who could monitor and fix the environmental problem created by human society.«³⁹⁰ Den Odum-Brüdern gelingt es, mit einem systemischen Ansatz die Steuerbarkeit des *environments* durch mechanische Eingriffe zu postulieren und zugleich der organischen Ganzheit der Faktoren eines Ökosystems und des Verhältnisses von Organismen und *environments* treu zu bleiben. Sätze wie die folgenden zeigen ihre Verbundenheit mit den holistischen und organizistischen Annahmen, die Hutchinson umgehen wollte: »The forest is more than a collection of trees. The whole is not simply a sum of the parts.«³⁹¹ Während den systemischen

387 Vgl. Odum, Howard T.: »Ecological Potential and Analogue Circuits for the Ecosystem«. In: *American Scientist* 48/1 (1960), S. 1-8. Dazu auch Madison: »Potatoes Made of Oil« sowie Kangas, Patrick: »Information Processing Models in Ecology and Education«. In: Hall, Charles A. S. (Hg., 1995): *Maximum Power. The Ideas and Applications of H.T. Odum*. Niwot, University Press of Colorado, S. 337-345.

388 Vgl. Chapman (1931): *Animal Ecology* sowie Kangas: »The Role of Passive Electrical Analogs in H.T. Odum's Systems Thinking«. Die Rolle von Informationstechnik für die Entwicklung der Ökologie würde eine eigene Abhandlung erfordern (vgl. dazu Pias: »Paradiesische Zustände«).

389 Vgl. zur Rolle der Computersimulation Kangas: »Information Processing Models in Ecology and Education«.

390 Mitman (1992): *The State of Nature*. S. 210. Vgl. zu Modellen der Kontrolle in der Ökologie Kwa, Chunglin: »Modelling Technologies of Control«. In: *Science as Culture* 4/3 (1994), S. 363-391.

391 Odum (1953): *Fundamentals of Ecology*. S. 88.

Theorien von holistischer Seite oft vorgeworfen wurde, mit einem mechanistischen Ansatz zugleich die Steuerbarkeit des *environments* angenommen und damit dessen Unvorhersagbarkeit zugunsten von Kontrolle übersehen zu haben, wollen die Odum-Brüder den Überschuss des Ganzen erhalten und es dabei auch technisch gestalten. Ob das System eine Maschine ist, das Ganze eine emergente organische Ordnung hat oder sich selbst organisiert, spielt für die Praktikabilität ihrer Eingriffe nur eine untergeordnete Rolle.

Über den Systembegriff, der seinen Schriften relativ vage gehalten ist, führt Eugene P. Odum eine implizite Ontologie der Emergenz ein, die vom Wissenschaftshistoriker Donato Bergandi als funktional holistisch bezeichnet wird. Sie setze, so Bergandi, ein apriorisches Gleichgewicht qua Selbstregulation voraus, welches in den späteren Texten der Odums explizit wird.³⁹² Beide behalten die Sprache der holistischen Ökologie Clements' bei und benennen den stabilen Zustand eines Ökosystems als *climax*. Zugleich sind aber die Methoden, mit denen sie die zugrundeliegenden Erkenntnisse erarbeiten, durch und durch empirisch und reduktionistisch. Dieser Widerspruch rührt Bergandi zufolge daher, dass angesichts der Komplexität von Ökosystemen unübersehbar viele Faktoren in ihrer Dynamik als Ganzes erfasst werden müssen, um genaue Aussagen zu treffen. Um mit dieser Überforderung umzugehen und dennoch dem Ganzen begegnen zu können, reduziert Odum die Vielfalt auf eine kleine Menge modellierbarer Faktoren. Der holistische Anspruch speist, so hat es Bergandi ausgedrückt, einen methodischen Reduktionismus: »Odum's position can be defined as crypto-reductionist for, while his vision is holistic on ontological and epistemological levels, the author proves to be purley reductionist in his methodology.«³⁹³

So sehr sich die Ökosystem-Ökologie seit den 1960er Jahren von den tradierten Harmonievorstellungen löst und von der Prämisse ausgeht, dass Gleichgewicht auf ständiger Wiederherstellung beruht, so sehr bleibt sie dem tief verwurzelten Streben nach einer Balance der Natur treu. Dies wird sich nicht zuletzt an Eugene P. Odums Vorliebe für die Gaia-Theorie und seiner Stellungnahme für die *environments* der künstlichen *Biosphere II* zeigen, welche später ausführlich thematisiert werden wird. In der Betonung der Bedeutung von Selbstorganisation und ihren Energieflüssen unterscheidet sich dieser Ansatz dennoch deutlich von den Vorkriegsholismen. Was in einem Ökosystem über die Summe seiner Teile hinausgeht, ist für die Odums ein Produkt ihrer kybernetischen Organisation, die zu einem natürlichen Gleichgewicht führt.

Unter dem Titel »The Cybernetic Nature of Ecosystems« verdeutlicht Eugene P. Odum 1981 gemeinsam mit Bernard C. Patten in konzentrierter Form die Vorzüge

392 So in Odum, Eugene P.: »The Emergence of Ecology as a New Integrative Discipline«. In: *Science & Education* (25. März 1977). S. 1289-1293.

393 Bergandi: »Reductionist Holism«. S. 166.

des kybernetischen Ansatzes und erläutert dabei auch das entsprechende Umgebungsdenken. Den Unterschied zu jenen Ökologen, die sich dem ökosystemischen Ansatz verweigern, sehen die Autoren in einem mangelnden Verständnis der Bedeutung des *environments*: »For them, the theory of ecology is complete with the organism and its evolving population. Organisms feed upon and compete with one another in an environment which is unnecessary to define beyond «carrying capacity». [...] The theory is pat, and environment is always there, prepared and ready to accommodate another cycle of the process.«³⁹⁴ Im Gegensatz zu dieser Perspektive müsse eine kybernetisch orientierte Ökologie ständig fragen, warum das *environment* so ist, wie es ist und sich nicht in energetischem Chaos aufgelöst habe.

Noch mehr als ein Jahrhundert nach Spencers Einführung des Begriffs in das Vokabular der Ökologie bietet die Betonung der Bedeutung des *environments* die Möglichkeit, einen epistemologischen Sonderstatus zu markieren. Das *environment* kann für eine solche Theorie entsprechend keine gegebene Konstante sein, sondern wird immer durch das jeweilige Ökosystem und damit den Beobachter spezifiziert. Erst in ihrem Zusammenspiel lässt sich das »processing of energy-matter«³⁹⁵ erfassen, durch das für die Odums Ökosysteme erforschbar sind. Dass es eine stabil und sogar harmonisch erscheinende Biosphäre gibt, hängt dem zitierten Aufsatz zufolge davon ab, dass Energie und Materie gemäß kybernetischen Prinzipien organisiert sind – in Ökosystemen aus Organismen und *environments*.

Die Gestaltung eines Ökosystems oder die Beeinflussung einer Organisation müssen sich, so lautet der seitdem verbreitete Ansatz, an ihr *environment* halten, das in holistischen wie in organizistischen, in mechanischen wie in systemischen Ansätzen in Biologie und Ökologie, aber auch in den Künsten, Stadtplanung und Architektur vom natürlichen Gegenpol der Organismen in ein beeinflussbares Gefüge aus kontrollierbaren Faktoren transformiert wird. In der Ökologie sind die Arbeiten der Odum-Brüder das einflussreichste Beispiel für die rasche Verquickung dieser Theoriekonstellation mit praktischen Eingriffen in das *environment*, die etwa die Wasseraufbereitung, die Müllentsorgung, das Einsetzen von Mikroorganismen in verseuchte Seen oder die Vergabe von Fischereilizenzen abhängig von Populationszyklen umfassen.³⁹⁶ Die Maßnahmen der Modifizierung und technischen Gestaltung, die, wie im nächsten Kapitel zu zeigen sein wird, zu dieser Zeit auch auf anderen Gebieten hervortreten, markieren eine folgenreiche Verschiebung dessen, was *environment* sein kann und wo eine neue Biopolitik ansetzen muss: »Society

394 Odum/Patten: »The Cybernetic Nature of Ecosystems«. S. 894.

395 Ebd.

396 Von Odums Mitarbeiter William Mitsch wird *ecological engineering* unter dem Titel *ecotechnology* als Anwendungsfeld wie als Forschungsmethode im ersten Lehrbuch zu diesem Thema weiter vorangetrieben: Mitsch, William J./Jørgensen, S. E. (1989): *Ecological Engineering. An Introduction to Ecotechnology*. New York, Wiley.

needs and must find as quickly as possible, a way to deal with the landscape as a whole, so that manipulative skills (that is, technology) will not run too far ahead of our understanding of the impact of change.«³⁹⁷

3.9 Resilienz und das Ende des Gleichgewichts

Seit der Einführung der Dyade von Organismus und *environment* sind die Wissenschaften des Lebendigen mit der Notwendigkeit konfrontiert, die Kausalität der Wechselwirkung von Umgebendem und Umgebenem zu untersuchen. Wie wirkt das eine auf das andere, wie sind sie miteinander verschränkt und was ist in ihrem Verhältnis Wirkung, was Ursache? Im Verlauf des 20. Jahrhunderts sind zur Beantwortung dieser Fragen unterschiedliche Begriffe der Reziprozität und der Rekursion in Anschlag gebracht worden, wodurch sich der Fokus mehr und mehr von natürlichen, anti-artifizialen Einflüssen auf Systeme erweitert hat, die sowohl Menschen als auch Organismen enthalten und technische mit natürlichen Elementen zusammenschließen. Aufgrund ihrer prognostizierbaren Zusammenhänge werden Ökosysteme in der Nachkriegszeit schrittweise als Gegenstände gestaltender technischer Maßnahmen verstanden. Weil jedoch Eingriffe stets in der Modifikation ihrer Zirkulation bestehen und somit die Verteilung von Energie und Materie innerhalb des Systems betreffen, handelt es sich um Eingriffe in Umgebungen, die indirekt auf das Umgebene wirken. *Environments* sind bereits in den frühen Ökologien des 19. Jahrhunderts nicht nur unbedeutende Hintergründe eines eigentlichen Geschehens und spätestens mit der Ökosystem-Ökologie nach dem Zweiten Weltkrieg auch Räume der Intervention.

Fragen ökologischer Kausalität, die als Matrix biopolitischer Maßnahmen der Umgebungsgestaltung historischen Wandlungen unterworfen sind, werden mithin seit dem Zweiten Weltkrieg als Fragen der möglichen Beeinflussung des Umgebens durch die Gestaltung des Umgebenden verhandelt. Während beispielsweise bei Haldane, Henderson und Cannon der experimentelle Eingriff in *environments* stets als Modifikation der Lebensbedingungen des umgebenen Organismus gedacht und damit als Konvergenz eines Begriffs und einer Politik des Lebendigen markiert war, laufen die von den Odums vorgestellten Verfahren des *ecological engineering* auf eine auf energetischen Prinzipien basierende, technokratische Steuerung eines komplexen Gefüges aus Kausalfaktoren hinaus, mit der Populationen als Bestandteile ökosystemischer Zusammenhänge kontrolliert werden sollen. Dem *ecological engineering* liegt die Annahme des *maximum power principle* zugrunde, demzufolge selbstorganisierende Systeme Strukturen herausbilden, die es ihnen erlauben,

397 Odum: »The Strategy of Ecosystem Development«. S. 267.