

Beobachtung ökologischer Wirkungen gentechnisch veränderter Organismen (GVOs)

Beitragsreihe

Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Beobachtung von GVO-Umweltwirkungen

Einführung

Winfried Schröder^{1*} und Frieder Hofmann² (Hrsg.)

¹Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Hochschule Vechta, PF 1553, D-49364 Vechta (wschroeder@iuw.uni-vechta.de)

²Ökologiebüro, Rennstieg 25, D-28205 Bremen (f.hofmann@oekologiebuero.de)

* Korrespondenzautor (wschroeder@iuw.uni-vechta.de)

Otto Fränzle zum 75. Geburtstag gewidmet

Präambel zur Beitragsreihe

Hintergrund und Ziel. Die Exposition gentechnisch veränderter Kulturpflanzen erfordert die Beobachtung ihrer Umweltwirkungen. Ziel der Beitragsreihe über die Beobachtung ökologischer Wirkungen von GVO ist es, den hierzu erreichten Stand der Wissenschaft vorzustellen. Da bei einem Bundesländer und ggf. europäische Staaten übergreifenden Monitoring besonders auf methodisch vergleichbare und räumlich aussagekräftige Daten zu achten ist, werden in diesem einführenden Beitrag wissenschaftstheoretische und statistische Grundlagen des Monitoring sowie die Standardisierung der Beobachtungsverfahren behandelt.

Schwerpunkte. Im Mittelpunkt stehen zunächst ökologische Anforderungen an das GVO-Monitoring. Um mit GVO ggf. zusammenhängende Umweltveränderungen ermitteln zu können, ist eine Eingliederung in bestehende Umweltbeobachtungsprogramme erforderlich. GVO-Exposition und -Wirkung sind aufeinander bezogen über die Organisationsstufen ökologischer Systeme hinweg zu erfassen. Ein effizientes und suffizientes Monitoring bedarf eines wissenschaftstheoretisch und statistisch soliden Designs. Deshalb werden einem weiteren Schwerpunkt dieses Beitrags wissenschaftstheoretische Grundlagen der Hypothesenbildung und -prüfung behandelt. Hierfür

bedarf es Daten, die mehreren, im Einzelnen behandelten Qualitätskriterien entsprechen müssen. Eines dieser Kriterien ist die räumliche und zeitliche Verallgemeinerungsfähigkeit der Monitoring-Befunde, die in dem dritten Schwerpunkt des Beitrags dargestellt wird. **Schlussfolgerungen.**

Für die Prüfung von Hypothesen über Umweltfolgen von GVO sind konsequent Ökosystemforschung und Monitoring eng miteinander zu vernetzen. Denn sie erfüllen komplementäre Funktionen, die für das Monitoring der Umweltwirkungen von GVO von großer praktischer und wissenschaftlicher Bedeutung sind.

Empfehlungen. Das GVO-Monitoring sollte in bestehende Programme der Ökosystemforschung und der Umweltbeobachtung eingebettet werden und die ökologischen Organisationsstufen sowie GVO-Exposition und -Wirkung einschließen. Die Lokalisierung der Messorte sollte die erwartete Exposition oder Wirkung berücksichtigen.

Perspektiven. Weitere Beiträge dieser Serie werden die Messplanung, das Pollenmonitoring und die räumliche Verallgemeinerung von Ergebnissen standortspezifischer Messungen oder Modellierungen behandeln.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2007.06.194>

Bitte zitieren Sie diesen Beitrag wie folgt: Schröder W, Hofmann F (2008): Wissenschaftliche Grundlagen der Beobachtung von GVO-Umwelttrisiken. UWSF – Z Umweltchem Ökotox 20 (1) 2–8

Zusammenfassung

Hintergrund und Ziel. Die Exposition gentechnisch veränderter Kulturpflanzen erfordert die Beobachtung ihrer Umweltwirkungen. Ziel der Beitragsreihe über die Beobachtung ökologischer Wirkungen von GVO ist es, den hierzu erreichten Stand der Wissenschaft vorzustellen. Da bei einem Bundesländer und ggf. europäische Staaten übergreifenden Monitoring besonders auf methodisch vergleichbare und räumlich aussagekräftige Daten zu achten ist, werden in diesem einführenden Beitrag wissenschaftstheoretische und statistische Grundlagen des Monitoring sowie die Standardisierung der Beobachtungsverfahren behandelt.

Schwerpunkte. Im Mittelpunkt stehen zunächst ökologische Anforderungen an das GVO-Monitoring. Um mit GVO ggf. zusammenhängende Umweltveränderungen ermitteln zu können, ist eine Eingliederung in bestehende Umweltbeobachtungsprogramme erforderlich. GVO-Exposition und -Wirkung sind aufeinander bezogen über die Organisationsstufen ökologischer Systeme hinweg zu erfassen. Ein effizientes und suffizientes Monitoring

bedarf eines wissenschaftstheoretisch und statistisch soliden Designs. Deshalb werden einem weiteren Schwerpunkt dieses Beitrags wissenschaftstheoretische Grundlagen der Hypothesenbildung und -prüfung behandelt. Hierfür bedarf es Daten, die mehreren, im Einzelnen behandelten Qualitätskriterien entsprechen müssen. Eines dieser Kriterien ist die räumliche und zeitliche Verallgemeinerungsfähigkeit der Monitoring-Befunde, die in dem dritten Schwerpunkt des Beitrags dargestellt wird.

Schlussfolgerungen. Für die Prüfung von Hypothesen über Umweltfolgen von GVO sind konsequent Ökosystemforschung und Monitoring eng miteinander zu vernetzen. Denn sie erfüllen komplementäre Funktionen, die für das Monitoring der Umweltwirkungen von GVO von großer praktischer und wissenschaftlicher Bedeutung sind.

Empfehlungen. Das GVO-Monitoring sollte in bestehende Programme der Ökosystemforschung und der Umweltbeobachtung eingebettet werden und die ökologischen Organisationsstufen sowie GVO-Exposition und -Wirkung einschließen. Die Lokalisierung der Messorte sollte die erwartete Exposition oder Wirkung berücksichtigen.

Perspektiven. Weitere Beiträge dieser Serie werden die Messplanung, das Pollenmonitoring und die räumliche Verallgemeinerung von Ergebnissen standortspezifischer Messungen oder Modellierungen behandeln.

Abstract**Environmental monitoring of ecological impacts of GMOs**

Goal, Scope and Background. The release of genetically modified organisms (GMOs) may result in ecological impacts to be monitored. This series presents the state-of-art concerning the environmental monitoring of ecological impacts of GMOs. Since this monitoring is conducted by several authorities, the methodical comparability and spatial validity of the monitoring data is crucial. Thus, the respective fundamentals of philosophy of science and of statistics as well as the methodical standardisation form the focus of this article.

Main Features. At first, the monitoring requirements will be described from the viewpoint of ecology. Consequently, the GMO monitoring needs to be integrated into existing programmes. Exposure and effects of GMOs have to be monitored across the hierarchy of ecological organisation. For monitoring to be efficient and sufficient, the design must be founded in terms of philosophy of science and statistics. Hence the fundamentals concerning the verification of hypotheses represent another feature of this article. The data used for the verification of hypotheses must comply with quality criteria. One of these criteria is the spatial and temporal extrapolation of the monitoring results, which is the third feature in this introductory article.

Conclusions. The evaluation of hypotheses on GMO impacts requires the linkage to ecosystems research and environmental monitoring. These both are, in terms of methodology, complementary and of significant technical and scientific value for GMO monitoring.

Recommendations. GMO-monitoring should closely be connected with ecosystems research and environmental monitoring. The levels of ecological organisation should be covered as well as the exposure and the effects of GMOs. The expected GMO exposure and effects should be considered by localising the monitoring sites.

Perspectives. Further articles of this series will deal with network designing, GMO pollen monitoring and extrapolation of site-specific measurements and modelling results.

1 Hintergrund und Ziel

Das Europäische Parlament und der Rat schreiben für das Inverkehrbringen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) in den Mitgliedstaaten der EU eine Umweltverträglichkeitsprüfung und einen Beobachtungsplan (Monitoring) vor (2001/18/EG, 2002/811/EG). Gemäß der Richtlinie und des deutschen Gentechnikgesetzes (GenTG) ist der Betreiber für die Beobachtung der Umweltwirkungen von GVO verantwortlich. Darüber hinaus gehört die Umweltbeobachtung zu den Aufgaben von Bund und Ländern. Gemäß Bundesnaturschutzgesetz ist es Gegenstand der Umweltbeobachtung, den Zustand und Veränderungen des Naturhaushalts zu erfassen und zu bewerten (BNatSchG § 12). Der Naturhaushalt basiert auf Materie, Energie und Informationen und umfasst die daraus entwickelten Lebensformen sowie die zwischen ihnen und den unbelebten Bestandteilen des Naturhaushalts

¹ Engl. monitoring = 'something or someone that warns, an overseer'. Ursprünglich war 'monitoring' beschränkt auf die Bedeutung "someone who gives a warning so that a mistake can be avoided". Heute bedeutet monitoring auch 'the act of observing something', auch: 'keeping a record of that observation; keep watch; keep track of; keep under surveillance; or, check usually for a special purpose' (Draggan 2006).

bestehenden Beziehungen in Form von Energie-, Informations- und Stoffflüssen. Die Einführung von GVO verändert den Informationsgehalt zunächst in einzelnen Organismen. Diese Veränderung kann sich darüber hinaus auf Bereiche des Naturhaushalts auswirken, mit denen der GVO in Beziehung steht. Ob die GVO-Freisetzung ökologische Wirkungen nach sich zieht, ist idealer Weise durch die kombinierte Beobachtung von Exposition und Effekten auf mehreren Stufen der biologischen Organisation (Zelle, Individuum, Population, Ökosystem, Landschaft) an jeweils einem von mehreren Standorten zu untersuchen. Ziel der Beitragsserie über die Beobachtung ökologischer Wirkungen gentechnisch veränderter Organismen (GVO) ist es, den zu diesem hierzu erreichten Stand der Wissenschaft vorzustellen. Schwerpunkte sollen Monitoring-Konzepte, die Entwicklung GVO-spezifischer Monitoring-Verfahren sowie die Nutzung von Informationen bestehender Umweltbeobachtungen für das GVO-Monitoring sein. Da bei einem Bundesländer und ggf. europäische Staaten übergreifenden Monitoring besonders auf methodisch vergleichbare und räumlich valide Daten zu achten ist, wird besonderes Gewicht auf die wissenschaftstheoretischen und statistischen Grundlagen des Monitoring sowie auf die Standardisierung der Beobachtungsverfahren gelegt. Hierbei sollen auch die für die Erkenntnisgewinnung wesentlichen wissenschaftstheoretischen und statistischen Grundlagen Beachtung finden.

2 Schwerpunkte**2.1 Beobachtung / Monitoring, Messung**

Beobachtungen sind akustische, optische, olfaktorische oder taktile Wahrnehmungen und können instrumentell unterstützt werden. Zielen solche Wahrnehmungen auf die wissenschaftliche Erfassung oder behördliche Überwachung der Umweltqualität, spricht man von Umweltbeobachtung oder Umweltmonitoring. Monitoring ist ein aus dem Englischen¹ entlehnter Überbegriff für alle Arten der Beobachtung intersubjektiv wahrnehmbarer Systemzustände im Zeitverlauf. Für das GVO-Monitoring ist die Bedeutung als Frühwarnsystem, das über die bloße Erfassung hinausgeht, in der EU-Richtlinie 2001/18 festgelegt. Im Unterschied zu allgemeiner Umweltbeobachtung geht es hierbei zielgerichtet darum, möglichst frühzeitig eventuell auftretende Umweltveränderungen, die mit dem GVO zusammenhängen können, festzustellen, um gegebenenfalls Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Wenn die beobachteten Beziehungen zwischen Sachverhalten in Zahlen ausgedrückt werden, spricht man von Messungen. Eine solche zahlenmäßige (quantitative) Beobachtung realer Sachverhalte ermöglicht es,

1. viele Informationen mit statistischen Verfahren zusammenzufassen,
2. den Grad der Objektivität (Beobachterunabhängigkeit), der Präzision (Wiederholbarkeit, Zuverlässigkeit) und der Validität (Gültigkeit der Beziehung zwischen den Messgrößen / Indikatoren² und dem Indikandum) zu beziffern sowie
3. Hypothesen zu testen.

² Indikatoren im wissenschaftstheoretischen Sinne sind direkt messbare Teile eines komplexen Sachverhalts (*Indikandum*), der direkten Messungen nicht zugänglich ist (Gesundheit, Nachhaltigkeit, Ökosystemintegrität).

Ausgangspunkt von Hypothesen sind auf Vorwissen und Beobachtungen gestützte Beschreibungen von Sachverhalten, für die eine Erklärung (Wie funktioniert das System?) oder daraus abgeleitete Prognosen (Wie wird sich das System entwickeln?) und Technologien (Was muss getan werden, um einen angestrebten Systemzustand zu ermöglichen?) gesucht werden.

In den Umweltwissenschaften sowie im Umweltrecht ist allgemein anerkannt, dass die Beschreibung, Erklärung und Prognose von Umweltzuständen auf einem ökosystemaren Forschungsansatz basieren sollten (BayStMinLU/UBA 2003, Ritter 1992). Dies gilt für die drei Grundformen der ökologischen Umweltbeobachtung: die Grundlagenforschung (Ökosystemforschung), retrospektives Monitoring in Form von Umweltprobenbanken sowie die Umweltbeobachtung im Sinne des § 12 Bundesnaturschutzgesetzes.

Die Ökosystemforschung zielt darauf ab, Strukturen und Funktionen ökologischer Systeme in ihrer raum-zeitlichen Dynamik differenzierend zu beschreiben, zu erklären und modellhaft zu prognostizieren (Fränze 1998). Systeme sind nach Erkenntnisinteresse, pragmatischen Erwägungen oder anderen Kriterien definierte Ausschnitte des Universums, wie sie sich dem Beobachter mit dem ihm zur Verfügung stehenden Wahrnehmungs- und Erkenntnismöglichkeiten erschließen. Die Struktur eines Systems wird gebildet durch seine Komponenten und deren Beziehungen zueinander. In ökologischen Systemen – kurz Ökosysteme – bilden die in ihm vorkommenden Lebensgemeinschaften (Biozöosen) aus Pflanzen, Tieren und Menschen sowie Lebensräume (Biotope) aus Boden, Wasser und Luft die Grundbausteine. Zwischen ihnen werden Stoffe und Energie ausgetauscht, bei den Lebewesen kommt der Informationsaustausch einschließlich der Genflüsse hinzu. Jedes Strukturelement eines ökologischen Systems leistet Arbeit, es funktioniert unter Umwandlung von Energie. Struktur und Funktion sind also komplementäre Kennzeichen von Systemen. Dies gilt auf allen Organisationsstufen des Lebendigen, die auch als biologische oder ökologische Organisationsstufen bezeichnet werden. Sie bilden eine Hierarchie der Komplexität lebender bzw. belebter Systeme. In ihr ist die Zelle die kleinste Struktureinheit mit allen essenziellen Funktionen des Lebendigen. Sind die Organellen wie z.B. Zellkern und Mitochondrien Struktur- und Funktionseinheiten von Zellen, so sind diese die strukturellen und funktionellen Kompartimente von Organen, diese wiederum diejenigen eines Organismus. Mehrere Organismen einer Art bilden eine Population, zwei und mehr Populationen konstituieren eine Biozönose (s.o.). Dementsprechend sind Ökosysteme die Struktur- und Funktionseinheiten von Landschaften (Smith und Smith 2000, White et al. 1984).

Ziel der Umweltbeobachtung im Sinne der o.g. drei Grundformen ist die qualitative und quantitative Erfassung der Strukturen und Funktionen von Biozöosen, Ökosystemen und Landschaften. Hierzu komplementär sind andere wissenschaftliche Ansätze zur Erforschung von GVO-Umweltwirkungen, die vorwiegend auf zellulärer und organischer Ebene angesiedelt sind (Toxikologie, Laborversuche,

usw.) sowie deren Übergänge (Freilandexperimente). Entscheidend für die Erkenntnisgewinnung ist dabei, dass das Komplementaritätsprinzip von Bohr (1936) ein methodisches Sowohl-Als-Auch und nicht ein Entweder-Oder bedeutet (Fischer 1987). Das in der EU gesetzlich verankerte Risikomanagement sieht für GVO eine dem Kenntnisstand entsprechende schrittweise Zulassung vor, die im Wesentlichen aus drei Stufen besteht: Part A, B und C. Part A beinhaltet striktes Containment: Anhand von bekannten und vermuteten Eigenschaften des GVO und labornahen Experimenten werden prospektiv die Umweltrisiken abgeschätzt. Werden keine oder nur unwesentliche erwartet, folgt Part B mit einer UVP und begrenzten Freisetzungsversuchen zur Abklärung eventuell befürchteter Risiken. Ergeben sich hieraus keine Erkenntnisse im Hinblick auf wesentliche Risiken, so kann eine Genehmigung nach Part C auf Inverkehrbringen (Anbau, Vermarktung) erfolgen. Da in den begrenzten Part A- und B-Versuchen die Risiken, vor allem im Hinblick auf langfristige oder unerwartete Wirkungen, nicht hinreichend abgeklärt werden können, ist mit der Part C-Genehmigung ein Monitoring vorgesehen. Die Umweltbeobachtung von Wirkungen von GVO kommt demgemäß ab Stufe B mit dem Eintritt des GVO in die Umwelt in Frage und bildet den wesentlichen Kern von Part C gemäß der EU-Richtlinie 2001/18. Für die Feststellung, ob und inwieweit GVO an Umweltveränderungen ursächlich beteiligt sind, spielt die Frage nach der Referenz, d.h. ohne Einfluss von GVO, eine wesentliche Rolle, so dass die Umweltbeobachtung für Part B und C auch bereits vor dem Eintritt des jeweiligen GVO in die Umwelt einsetzen kann und für bestimmte Aspekte definitiv sein sollte.

2.2 Hypothesenbildung und -prüfung

Die Beobachtung von Systemzuständen über die Zeit kann zeigen, ob sie im Wesentlichen gleich bleiben oder sich verändern. Veränderungen von Ökosystemstrukturen und -funktionen werfen die Frage nach den Gründen dafür auf. Hierzu werden fachlich plausible Vermutungen, Hypothesen, formuliert. In ihnen werden die beobachteten Veränderungen als Wirkungen bestimmter Ursachen interpretiert und mit diesen implikativ miteinander verknüpft: Wenn Ursache X (Antecedenz), dann Wirkung Z (Konsequenz). Ob sich eine solche Ursache-Wirkung-Hypothese belegen (verifizieren) lässt, oder ob sie zu verwerfen (falsifizieren) ist, muss durch Messungen und die statistische Auswertung der daraus hervorgehenden Daten geklärt werden. Dies ist die Voraussetzung dafür, Hypothesen als wahrscheinlich wahre Aussagen gegen (mit belegbarer Sicherheit) falsche und wahre Aussagen abzugrenzen. Letztgenannte werden als Theorien bezeichnet.

Die Datenerhebung zur Hypothesenprüfung kann in Form von Laborexperimenten und in Freilanduntersuchungen mit jeweils spezifischen Vor- und Nachteilen erfolgen. Die ökologische Umweltbeobachtung im Sinne des § 12 Bundesnaturschutzgesetz lässt sich als Expositionsmonitoring (Erfassung bekannter Ursachen – Wenn-Komponente in Hypothesen - für Ökosystemveränderungen wie z.B. Stoffe, GVP-Pollen) oder als Wirkungsmonitoring (Erfassung von

Ökosystemveränderungen wie Vitalitätsverluste von Pflanzen, Artenverschiebungen – Dann-Komponente in Hypothesen) ausgestalten. Wenn Veränderungen entdeckt werden, für deren Erklärung es keine Hypothese gibt, so sind die Kenntnislücken durch Grundlagenforschung zu schließen.

Die Wahrheit einer Hypothese (R_1) bemisst sich nach der Übereinstimmung mit dem jeweiligen Bereich der Realität. Sie ist also eine zweistellige Relation, die zwischen den Hypothesen (H) als kognitiven Abbildern und einem vom Beobachter wahrnehmbaren Objektbereich (O) besteht. In welchem Maße das Erkenntnisobjekt Gewissheit darüber besitzt, ob die kognitiven Strukturen den Objektbereich richtig abbilden, bleibt unberücksichtigt. Formallogisch ausgedrückt lautet die Definition: $R_1 (H, O)$.

Die Wahrscheinlichkeit einer Hypothese (R_2) sagt nichts über die Hypothesenwahrheit und damit über die Abbildungstreue der kognitiven Strukturen gegenüber ihrem empirischen Korrelat aus. Sie charakterisiert vielmehr den Erkenntnisstand des Erkenntnisobjektes (E) hinsichtlich der Hypothese. Dass eine Hypothese wahrscheinlich ist, meint, dass unser Wissen um ihren Wahrheitswert wahrscheinlich ist. In formaler Analogie zur Hypothesenwahrheit gilt für die Hypothesenwahrscheinlichkeit: $R_2 (E, H)$. Die Wahrscheinlichkeit einer Hypothese steigt mit der Zahl der Fälle, in denen sie eine Problemlösung darstellt (Verifikation). Je größer die Zahl der Bestätigungen einer Hypothese, d.h. je höher die Hypothesenwahrscheinlichkeit ist, umso mehr nähert man sich der theoretischen, aber nicht endgültig feststellbaren Hypothesenwahrheit. Diese kann für die statistischen Hypothesen der Ökologie ohnehin nicht im Sinne von 'wahr oder falsch', sondern zwischen mehr oder weniger falsch gesucht werden.

Für empirische Hypothesen der Ökologie ist es nicht nur vonnöten, R_1 zu bestimmen, sondern darauf aufbauend auch R_2 . Der Begriff der Hypothesenwahrscheinlichkeit ist hierfür um das Kriterium der räumlichen und zeitlichen Generalisierbarkeit zu erweitern (R_2). Sodann sind beide Befunde so miteinander zu verknüpfen, dass man die Hypothesen idealer Weise nach ihrer vorwiegend in Experimenten und kontrollierten Bedingungen feststellbaren Wahrheit (R_1) und dem nur in Freilanduntersuchungen ermittelbaren Grad raumzeitlicher Generalisierbarkeit (R_2) bewertet: $R_3 (R_1, R_2)$. R_3 kennzeichnet den Erklärungswert empirischer Hypothesen. Hypothesenevaluierung bedeutet hier, im definierten Sinne den Erklärungswert einer Hypothese zu bestimmen.

Allgemeingültige Gesetze über die Objekte der Ökologie, die Ökosysteme, sind aufgrund deren komplexen Struktur – wenn überhaupt – nur schwer zu gewinnen bzw. zu begründen. Denn ein Ökosystem ist ein probabilistisches System, bei dessen Erfassung der Zufallseinfluss mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik zurückgedrängt, nicht jedoch ausgeschaltet werden kann. Insofern ist der Geltungsanspruch probabilistischer bzw. statistischer Hypothesen gegenüber demjenigen deterministischer Aussagen eingeschränkt. Denn im Gegensatz zu diesen wird das Auftreten der Konsequenz (Dann-Komponente in Hypothesen) nicht

für jeden Fall beim Zutreffen der Antecedenz (Wenn-Komponente in Hypothesen) postuliert. Vielmehr wird lediglich ausgesagt, dass die Konsequenz mit einer bestimmten statistischen Wahrscheinlichkeit eintritt. Die Konsequenz wird also in einem bestimmten Prozentsatz von Fällen, in denen die Antecedenz vorliegt, realisiert. Somit wird ausgedrückt, dass ein bestimmter Prozentanteil der Objekte, welche die Eigenschaft p aufweisen, auch das Merkmal q haben. Eine statistische oder probabilistische Hypothese ist also eine Annahme über die Verteilung (Häufigkeitsfunktion) einer beobachtbaren Zufallsvariable.

Zur Prüfung einer solchen Annahme dienen statistische Tests. Mit ihnen lässt sich darüber entscheiden, ob die Hypothese anzunehmen oder zu verwerfen ist. Dies erfolgt indirekt über eine statistische Hypothese, die so genannte Nullhypothese H_0 . Diese besagt, dass sich zwei Stichproben nur zufällig voneinander unterscheiden und aus derselben Grundgesamtheit stammen. Im Falle der Ablehnung der Nullhypothese kann mit einer definierten Irrtumswahrscheinlichkeit die aufgestellte Hypothese postuliert werden (Schröder 1996).

2.3 Räumliche und zeitliche Verallgemeinerung

Mit inferenz- und geostatistischen Methoden lässt sich prüfen, ob Aussagen auf Stichprobenbasis auch für die Grundgesamtheiten der Stichprobe gültig sind. Die statistischen Verfahren dienen also dazu, deskriptiv-statistische Aussagen über Stichproben zu verallgemeinern. Die Verallgemeinerungsfähigkeit von Aussagen über den Raum- und Zeitrahmen der Beobachtungen hinaus sind ein entscheidendes Kriterium für wissenschaftliche Erkenntnis empirischer Disziplinen. Hierfür ist die Stichprobenrepräsentativität eine *conditio sine qua non*. Generalisierung (Extrapolation) bedeutet eine Erweiterung von räumlich und zeitlich punktuellen Stichproben auf andere Raum- und Zeitpunkte, also die Erweiterung von Stichprobenergebnissen auf die Grundgesamtheiten, deren verkleinertes Abbild die Stichproben sein sollen. Räumliche Generalisierung ist die Verallgemeinerung von Messungen an ausgewählten Orten auf solche ohne Messungen. Zeitliche Generalisierung meint den Transfer von Stichprobenergebnissen eines status quo auf einen status post (Prognose) oder einen status ante (Epignose). Die Entsprechung der Aussagen über die Realität zu den Zeitpunkten t_{x+1} , t_{x+2} etc. mit der an t_x erlaubt den Schluss von t_x auf t_{x+n} . Aufgrund bestimmter beobachteter Regelmäßigkeiten wird also auf das Eintreten der diesen Regelmäßigkeiten entsprechenden Ereignisse in der Zukunft geschlossen. Hierbei gelten für die auf der Basis von Aussagen über die Realität zum Zeitpunkt t_x , t_{x+1} etc. entwickelte Aussage zum Zeitpunkt t_{x+n} dieselben Wahrscheinlichkeitskalküle wie für die ursprünglichen.

Räumliche und zeitliche Generalisierungen sind Induktionen. Der Grundbegriff der induktiven Logik ist der Wahrscheinlichkeitsbegriff; denn die induktiven Schlüsse sind Wahrscheinlichkeitsschlüsse. Die raumzeitliche Generalisierung von Stichprobenergebnissen ist ein zentrales wissenschaftstheoretisches Problem empirischer Forschung. Denn ein induktiver Schluss – als solcher wird derjenige von Einzel-

aussagen auf allgemeine Aussagen verstanden – ist niemals logisch voll gerechtfertigt.

Diesem Induktionsproblem kommt große wissenschaftliche wie praktische Bedeutung zu. Sind die Probleme der inneren Gültigkeit – das sind die die tatsächliche Erfassbarkeit der Untersuchungs- bzw. Experimentiervariablen betreffenden Aspekte – innerhalb der Grenzen der Wahrscheinlichkeit zu lösen, können die Probleme der äußeren Gültigkeit – sie macht Aussagen hinsichtlich der Übertragbarkeit (Generalisierbarkeit) von Untersuchungs- und Experimentierergebnissen auf andere Raum-Zeit-Gebilde – nicht logisch entschärft werden. Denn Generalisierungen enthalten immer Extrapolationen auf einen Bereich, der in der untersuchten Stichprobe nicht repräsentiert ist. Streng logisch kann nicht über diese Grenzen von Raum und Zeit der Untersuchungen und Experimente hinaus generalisiert werden. Erst während der Entwicklung einer Wissenschaft nimmt das Wissen über die Berechtigung zum Generalisieren durch gesammelte Erfahrungen zu.

Statistische Aussagen sind verknüpft mit einem Wahrscheinlichkeitskalkül (W_R) bezüglich der räumlichen Repräsentanz der Stichprobenelemente für die Grundgesamtheit, einem Wahrscheinlichkeitskalkül (W_I) betreffend die Erfassung der relevanten Indikatoren bzw. Randbedingungen und einem Wahrscheinlichkeitskalkül (W_Q) hinsichtlich der Eindeutigkeit der Abbildungsvorschriften (Richtigkeit und Präzision der Messungen, Signifikanz der Ergebnisse).

Der Wahrscheinlichkeitscharakter zeitlicher und räumlicher Generalisierungen wird noch durch das Wahrscheinlichkeitskalkül W_Q überlagert. W_Q wird bestimmt von der Realisierung der Hauptgütekriterien für Messvorgänge (s.o.): Objektivität, Reliabilität und Validität (Gültigkeit) betreffen die Abbildungstreue 'untersuchtes Stichprobenmerkmal – Messwert' und die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse (s.u.). W_I hängt ab von der Wahl von Objektmerkmalen als Indikatoren und den Methoden, mit deren Hilfe bestimmte Merkmalsausprägungen der Stichprobenelemente gemessen werden. W_I betrifft also die Aussagemöglichkeit und Vergleichbarkeit der Untersuchungsverfahren. W_R ist eine Funktion der Repräsentanz der Elemente (Objekte) der Untersuchungsstichprobe für die Grundgesamtheit und spiegelt die (räumliche) Abbildungstreue 'Stichprobe – Grundgesamtheit'. Das bedeutet, dass Unterschiede, Zusammenhänge u. dgl. von Merkmalen im Objektbereich, die durch den statistischen Verarbeitungsprozess zu Unterschieden und Zusammenhängen etc. zwischen Datensätzen transformiert werden, nur mit Hilfe wahrscheinlichkeitstheoretischer Überlegungen sinnvoll interpretierbar sind. Dabei ist zu beachten, dass Aussagen über Merkmalsausprägungen bereits auf Stichprobenebene, also ohne Generalisierungen, Wahrscheinlichkeitsaussagen sind.

Die Stichprobenwahl ist wichtig für die äußere Gültigkeit von Untersuchungs- und Experimentierergebnissen. Denn die Frage der Übertragbarkeit von Forschungsergebnissen auf andere Raum-Zeit-Gefüge ist immer auch die Frage nach der Repräsentanz der Forschungsobjekte. Sollen die Stich-

proben einen Repräsentationsschluss ermöglichen, so haben sie folgende Voraussetzungen zu erfüllen: (1) Die Stichprobe muss ein verkleinertes Abbild der Grundgesamtheit sowohl hinsichtlich der Heterogenität als auch in Bezug auf die Repräsentanz der für die Hypothesenprüfung relevanten Objektmerkmale sein. (2) Die Elemente der Stichprobe müssen definiert sein. (3) Die Grundgesamtheit sollte empirisch definierbar sein. (4) Das Auswahlverfahren muss angegeben werden und Forderung (1) erfüllen.

Gewährleisten die Auswahlkriterien die Repräsentanz der Stichproben nicht, dann lassen sich die Ergebnisse nicht oder nur bedingt auf Räume und Zeiten übertragen, die jenseits des räumlichen und zeitlichen Beobachtungsrahmens liegen. Das beschränkt die Gültigkeit der Daten aus solchen Untersuchungen ein. Eine Überprüfung der das Kriterium der raumzeitlichen Generalisierbarkeit umfassenden Hypothesenwahrscheinlichkeit, die erst gemeinsam mit der Hypothesenwahrheit die Bestimmung des Erklärungswertes von Hypothesen ermöglicht, kann durch die Analyse der raumzeitlichen Verteilung der Antecedenz (d.h. die Randbedingungen X, die mit dem Auftreten eines Zustandes Y auftreten) erfolgen. Ist also zunächst die Wahrheit der Hypothese 'Wenn X, dann Y' in Experimenten bzw. Untersuchungen nachgewiesen, kann sodann mittels Untersuchung des Auftretens der Antecedenz X in Raum und Zeit eine Abschätzung des Erklärungswertes der Hypothese erfolgen. Gesucht wird mithin nach raumzeitlich beschreibbaren Merkmalskoinzidenzen (Schröder 1996).

3 Schlussfolgerungen

Bei der umweltwissenschaftlichen Hypothesenbildung und -prüfung erfüllen die drei Grundformen der ökologischen Umweltbeobachtung – Ökosystemforschung, retrospektives Monitoring in Form von Umweltprobenbanken sowie die Umweltbeobachtung im Sinne des § 12 Bundesnaturschutzgesetzes – komplementäre Funktionen. Die nur an wenigen Standorten mögliche Ökosystemforschung zielt in erster Linie darauf ab, in einem die ökologischen Organisationsstufen umfassenden Ansatz Hypothesen über Strukturen und Funktionen ökologischer Systeme zu bilden und zu prüfen. Ziel ist es dabei, Grundlagen für die Erklärung und Prognose der untersuchten Systeme zu bilden. Das Monitoring soll anhand der in der Grundlagenforschung als wesentlich erkannten Systemeigenschaften in einem räumlich dichteren Netz langfristig erfassen. Damit trägt das Monitoring dazu bei, die räumliche und zeitliche Verallgemeinerungsfähigkeit grundlegender Erkenntnisse über ökologische Systeme einzuschätzen. Mithin erfüllen Ökosystemforschung und Monitoring komplementäre Funktionen bei der umweltwissenschaftlichen Hypothesenbildung und -prüfung. Zu diesem Zweck wird das Monitoring zielspezifisch ausdifferenziert: Im Biomonitoring, dem zeitlich regelmäßig wiederholten Beobachten des Zustandes von Lebewesen, werden aus beobachteten Veränderungen der Lebewesen Rückschlüsse auf den Zustand ihrer Umwelt gezogen. Eine ökologische Bewertung der Umweltbedingungen ist dann möglich, wenn ihre Veränderung strukturell, funktio-

nal und statistisch eng mit den Veränderungen der Lebewesen verknüpft ist. In diesem Falle kann man die Lebewesen als Biomonitor nutzen. Im Expositionsmonitoring werden Emissionen (Energie, genetische Information, Stoffe) erfasst, denen ein Organismus (als Rezeptor) ausgesetzt ist. Das Effektmonitoring dient der quantitativen Erfassung von Wirkungen, die aufgrund von Erkenntnissen aus Experimenten mit der Exposition in ursächlichem Zusammenhang stehen können. Integratives / integriertes Monitoring ist die kombinierte Untersuchung von Exposition und Wirkung. Erfolgt diese über mehrere Stufen der ökologischen Organisation (Zelle, Individuum, Population, Ökosystem, Landschaft), Ökosystem-Kompartimente, dann ist von integrativem, integriertem, medienübergreifendem, ökologischem oder ökosystemarem Monitoring die Rede.

4 Empfehlungen

Idealerweise wäre das GVO-Monitoring in ein Monitoring einzubetten, das die ökologischen Organisationsstufen sowie die Erfassung von Exposition und Wirkung einschließt. Die Lokalisierung der Messorte sollte anhand der erwarteten Exposition oder Wirkung erfolgen. Diese Erwartungen können anhand verfügbarer Informationen über die GVO-Anbauflächen aus dem Standortregister in Kombination mit einer Reihe weiterer Informationen räumlich konkretisiert werden. Die Merkmale der ausgewählten Standorte und ihrer Umgebung sollten in einem geeigneten Informationssystem dokumentiert werden. Diese Standortbeschreibungen sowie die zur Lokalisierung von Probenahmeorten genutzten Informationen sollten mit den Messdaten in einem WebGIS GVO-Monitoring enthalten sein und zur Planung, Dokumentation und Analyse des GVO-Monitoring genutzt werden (Pesch et al. 2007, Schröder et al. 2006).

5 Ausblick

Das GVO-Monitoring soll Erkenntnislücken schließen, die aus den räumlich, zeitlich und ökologisch reduzierten Versuchen im Vorfeld von Freisetzung und Inverkehrbringen des GVO resultieren. Das GVO-Monitoring ist das in der Freisetzungsrichtlinie vorgesehene Instrument, um zu prüfen, ob und wie weit im Freiland gegebenenfalls feststellbare Umweltveränderungen mit der Freisetzung oder dem Inverkehrbringen von GVO zusammenhängen (UBA 2001, Züghardt und Breckling 2003). Durch diese Zielsetzung unterscheidet es sich von anderen Umweltbeobachtungen. Das Monitoring soll zu nachvollziehbaren und länderübergreifend vergleichbaren Ergebnissen führen, aus denen sich Konsequenzen ableiten lassen. Dies erfordert eine Standardisierung der Verfahren. Im Fachbeirat des VDI zum Monitoring der Wirkungen von GVO werden derzeit Monitoring-Verfahren auf ihre Eignung zur Standardisierung geprüft und Richtlinien erarbeitet, die den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik dokumentieren (<http://www.vdi.de/gvo>). Behördlicherseits wurde begonnen, gemäß GenTG eine Sammlung von Verfahren zu erarbeiten, die in den Labors der Länder bereits etabliert sind (<http://www.lag-gentechnik.de/>) (betrifft derzeit vor allem den molekularen Nachweis von GVO).

Ein wesentliches Problem bei der Umsetzung des GVO-Monitorings sind die sehr geringen Beobachtungswahrscheinlichkeiten, da z.B. potenzielle Langzeitwirkungen von GVO sich erst mit der Zeit über Generationen aufbauen und nur begrenzte Möglichkeiten zur Beobachtung im Monitoring bestehen. Das Monitoring als Frühwarnsystem soll jedoch möglichst schnell unerwünschte Wirkungen feststellen, um entsprechend gegenlenken zu können. Ausreichend sichere Aussagen über Zusammenhänge von GVO-Freisetzung und beobachtete Wirkungen auf Schutzgüter bedürfen der Beobachtung der GVO-Freisetzung- bzw. Anbauorte, der GVO-Exposition und -Wirkung und eine ökologische Bewertung. Deshalb folgt auf die wissenschaftstheoretische Grundlegung der Umweltbeobachtung in diesem Beitrag ein Artikel, der in Vorbereitung der VDI 4330 Blatt 2 die Messplanung für ein Pollenmonitoring behandelt (Wosniok et al. 2007). Das von Hofmann et al. (2004) entwickelte Pollen-Monitoring dient der Erfassung der GVO-Exposition und dient als Filter und Lenkungsinstrument: Wirkungsuntersuchungen können anhand der Kenntnis der Exposition gezielt auf Orte gelenkt werden, wo die Beobachtungswahrscheinlichkeiten für ökologische Effekte wie z.B. Artenverschiebungen, Auskreuzungen oder Wirkungen auf Nichtzielorganismen besonders groß sind. Die Exposition kann zudem für die Abschätzung solcher Effekte hilfreich sein, die sich der unmittelbaren Beobachtung entziehen, wie z.B. horizontaler Gentransfer oder Genpooledriften. Das Pollen-Monitoring erfolgt durch eine Kombination von technischen Passivsammlern mit der biologischen Sammlerin Honigbiene und der Anwendung von PCR-Verfahren. Die einzelnen Verfahren, für die bereits die ersten VDI-Richtlinien der Serie 4330 als Weißdruck vorliegen (Blatt 4, Okt. 2006; Blatt 3, Jan 2007; Blatt 5 Gründruck 2006; Blatt 2 in Arbeit), werden in gesonderten Beiträgen behandelt.

Der technische Passiv-Pollensammler besteht aus dem Passivsammler Sigma-2 (VDI 2119 Blatt 4, 1997), der routinemäßig vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zu Pollenmessungen und Vorhersagen für Allergiker eingesetzt wird, und dem Pollenmassenfilter PMF, der als Zusatzgerät neu entwickelt wurde, um ausreichend geeignete Pollenmengen für PCR-Analysen zur Verfügung zu haben. Der Pollensammler mit dem Sigma-2 und dem PMF kann überall im Gelände kostengünstig und wartungsarm eingesetzt werden. Die Proben erlauben die qualitative und quantitative Auswertung des Polleneintrages nach Pollenart und Anzahl sowie den Nachweis von GVOs mittels PCR in der Pollen-DNA. Durch die Kombination mit der biologischen Sammlerin Honigbiene – diesem Verfahren wird in dieser Serie ebenfalls ein Beitrag gewidmet – wurden bis dato 150 verschiedene Pollenarten erfasst, so dass das System auch für das Monitoring zukünftiger GVO geeignet erscheint. Die Bedeutung von Exposition im Allgemeinen und speziell die Rolle des Pollenmonitorings in einer GVO-Monitoring-Strategie ist Gegenstand eines weiteren Beitrages. Die Serie soll durch Beiträge über Verfahren, die in der Standardisierung sind, sowie durch weitere thematisch passende Arbeiten entsprechend fortgeschrieben werden.

Literatur

- 01/18/EG: 2001-03-12 Richtlinie 2001/18/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. März 2001 über die absichtliche Freisetzung genetisch veränderter Organismen in die Umwelt und zur Aufhebung der Richtlinie 90/220/EWG des Rates (Directive 2001/18/EC of the European Parliament and of the Council of 12 March 2001 on the deliberate release into the environment of genetically modified organisms and repealing Council Directive 90/220/EEC) ABl EG, 2001, Nr. L 106, S. 1–39. Beuth Verlag, Berlin
- 02/811/EGentsch: 2002-10-03 Entscheidung des Rates vom 3. Oktober 2002 über Leitlinien zur Ergänzung des Anhangs VII der Richtlinie 2001/18/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die absichtliche Freisetzung genetisch veränderter Organismen in die Umwelt und zur Aufhebung der Richtlinie 90/220/EWG des Rates (Council Decision of 3 October 2002 establishing guidance notes supplementing Annex VII to Directive 2001/18/EC of the European Parliament and of the Council on the deliberate release into the environment of genetically modified organisms and repealing). ABl EG, 2002, Nr. L 280, S. 27–36. Beuth Verlag, Berlin
- BayStMinLU / UBA (Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen / Umweltbundesamt) (Hrsg.) (2003): Ökosystemare Umweltbeobachtung. Vom Konzept zur Umsetzung. Erich Schmidt Verlag, Berlin
- Beismann H, Kuhlmann M (2006): Raumrepräsentativität technischer Pollensammler für ein Langzeitmonitoring von gentechnisch veränderten Pflanzen (GVP). BfN-Skripten 169, Bonn
- BNatSchG (Bundesnaturschutzgesetz) (2002): Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege. Fassung vom 25.03.02, BGBl. I Nr. 22 vom 3.4.2002 S. 1193; zuletzt geändert durch Art. 8 GG vom 09.12.06 I 2833
- Bohr N (1936): Kausalität und Komplementarität. Erkenntnis 6, S. 354–369
- Draggan S (2006): Monitoring. In: Guinasso N (ed), Encyclopedia of earth. Washington, DC: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment. <<http://www.eoearth.org/article/Monitoring>>
- Fischer EP (1987): Sowohl als auch. Denkerfahrten der Naturwissenschaften. Hamburg, Rasch und Röhring, Zürich
- Fränze O (1998): Grundlagen und Entwicklung der Ökosystemforschung. In: Fränze O, Müller F, Schröder W (Hrsg), Handbuch der Umweltwissenschaften. Grundlagen und Anwendungen der Ökosystemforschung. 3. Erg.Lfg., Kap. II-2.1, ecomed, Landsberg am Lech
- GenTG (Gentechnikgesetz) (1990): Gesetz zur Regelung der Gentechnik. Fassung vom 20. Juni 1990. BGBl 1990, 1080. Zuletzt geändert durch Art. 1 GG vom 17.03.06 I 534
- Hofmann F, Schlechtriemen U, Wosniok W, Foth M (2005): GVO-Pollenmonitoring. Technische und biologische Pollenakkumulatoren und PCR-Screening für ein Monitoring von gentechnisch veränderten Organismen. BfN-Skripten 139, Bonn
- Pesch R, Schmidt G, Schröder W, Aden C, Kleppin L, Holy, M (2007): Development, implementation and application of the WebGIS MossMet. In: Tochtermann K, Scharl A (Hrsg), Proceedings of the 20th International Conference on Environmental Informatics – Managing Environmental Knowledge. Graz 2006. Springer, Berlin, S. 191–200
- Ritter EH (1992): Von den Schwierigkeiten des Rechtes mit der Ökologie. Die Öffentliche Verwaltung 45 (15) 641–649
- Schröder W (1996): Ökologie und Umweltrecht in Forschung und Lehre. Grundlagen einer interdisziplinären Methodologie. Habilitationsschrift, Kiel
- Schröder W, Weis M, Schmidt G (2006): Flächenbezogene Aspekte des Informationssystems GVO-Monitoring. Grafische Konzeption, Entwicklung und Erprobung raumbezogener Dokumentations- und Analysemethoden. Abschlussbericht des Teilvorhabens 3 in dem Verbundprojekt 'Informationssystem für ein Monitoring gentechnisch veränderter Organismen (ISMO)'. FKZ 804 67 030 im Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz, Bonn
- Smith RL, Smith TM (2000): Elements of ecology. 4th ed., Addison Wesley Longman, San Francisco
- UBA (Umweltbundesamt) (2001): Stand und Entwicklung des Monitoring von gentechnisch veränderten Organismen. UBA-Texte 60/01 2001
- VDI-Richtlinie 2119 Blatt 4 (1997): Messung partikelförmiger Niederschläge. Mikroskopische Unterscheidung und größenfraktionierte Bestimmung der Partikeldeposition auf Haftfolien. Probenahmegerät Sigma-2. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1a. Beuth-Verlag, Berlin
- VDI-Richtlinie 4330 Blatt 1 (2006): Monitoring der Wirkungen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO): Gentechnisch veränderte Pflanzen – Grundlagen und Strategien. VDI-Handbuch Biotechnologie, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1a. Beuth-Verlag, Berlin
- VDI-Richtlinie 4330 Blatt 3 (2007): Monitoring der Wirkungen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) – Pollenmonitoring – Technische Pollensammlung mit Pollenmassenfilter PMF und Sigma-2-Sammler. VDI-Handbuch Biotechnologie, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1a. Beuth-Verlag, Berlin
- VDI-Richtlinie 4330 Blatt 4 (2006): Monitoring der Wirkungen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) – Pollenmonitoring – Biologische Pollensammlung mit Bienenvölkern. VDI-Handbuch Biotechnologie, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1a. Beuth-Verlag, Berlin
- VDI-Richtlinie 4330 Blatt 5 (2006): Monitoring der Wirkungen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) – Pollenmonitoring – Biologische Pollensammlung mit Bienenvölkern. VDI-Handbuch Biotechnologie, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1a (Gründruck). Beuth-Verlag, Berlin
- VDI-Richtlinie 4330 Blatt 2 (in Arbeit): Monitoring der Wirkungen von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) – Pollenmonitoring – Probenahmedesign. VDI-Handbuch Biotechnologie, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Bd. 1a. Beuth-Verlag, Berlin
- White ID, Mottershead DN, Harrison SJ (1984): Environmental systems. Unwin Hyman, London
- Wosniok W, Schröder W, Hofmann F (2007): Design eines Pollenmonitoring auf statistischer Grundlage. UWSF–Z Umweltchem Ökotox (in Vorbereitung)
- Züghart W, Breckling B (2003): Konzeptionelle Entwicklung eines Monitoring der Umweltwirkungen transgener Kulturpflanzen, Teil I und Teil II. UBA-Texte 50/03, Berlin

Eingegangen: 15. Februar 2007
 Akzeptiert: 17. Juni 2007
 OnlineFirst: 18. Juni 2007