

In: Proceedings of the National Academy of Science 100/14 (2003), S. 8086–8091

Lucas, N.; Raudsepp-Hearne, C.; Blanco, H., 2010: Stakeholder Participation, Governance, Communication, and Outreach. In: Ash, N.; Blanco, H.; Brown, C. et al.: Ecosystems and Human-Wellbeing. A Manual for Assessment Practitioners. Washington, D.C.

Lucas, R., 2011: Gefährdungen von Ökosystemleistungen durch den Klimawandel – Analyserahmen, Konzeptentwicklung und erste Handlungsorientierungen für die regionale Wirtschaft. In: Dynaklim Publikation 15 (2011)

MA – Millennium Ecosystem Assessment, 2005: Millennium Ecosystem Assessment Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Washington, D.C.

Miller, C.A., 2009: Epistemic Constitutionalism in International Governance: The Case of Climate Change. In: Heazle, M.; Griffiths, M.; Conley, T. (Hg.): Foreign Policy Challenges in the 21<sup>st</sup> Century. Cheltenham

Naturkapital Deutschland – TEEB DE, 2012: Der Wert der Natur für Wirtschaft und Gesellschaft – Eine Einführung. München

TEEB – The Economics of Ecosystems and Biodiversity, 2010: The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations. Pushpam Kumar (Hg.). London

## Kontakt

Dr. Christian Albert  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH  
UFZ, Department für Umweltpolitik  
Permoserstraße 15, 04318 Leipzig  
Tel.: +49 341 235-1042  
E-Mail: [christian.albert@ufz.de](mailto:christian.albert@ufz.de)

« »

## Epigenetik und Technikfolgenabschätzung

Steht die „Science of Change“ auch für gesellschaftlichen Wandel?

von Stefanie B. Seitz und Reinhard Heil, ITAS

**In den Biowissenschaften erfährt die Epigenetik gerade einen Hype und hebt sich als eigener Forschungszweig von der Molekulargenetik ab. Sie bildet ein Sammelbecken für Wissenschaftler/innen, die sich grob gesagt mit den von der Umwelt beeinflussten, z. T. vererbten Veränderungen der Genexpression beschäftigen, denen keine Veränderungen in der Sequenz des Erbgutes zugrunde liegen. Die Erkenntnisse der Epigenetik werden dabei zuweilen als so revolutionär empfunden, dass sie als die „Science of Change“ bezeichnet wurde. Doch was bedeuten diese Erkenntnisse für die Gesellschaft? Werden sie auch hier Umdenken und Werteverstärkungen verursachen? Diesen Fragen nähert sich die ITAS-Arbeitsgruppe „Epigenetik“ mit einer Klausurwoche und weiterführenden Aktivitäten an, um so die Epigenetik als Thema für die Technikfolgenabschätzung zu erschließen.**

### 1 Was ist die Epigenetik?

Im Grunde genommen ist die Epigenetik keine „neue Erscheinung“, denn bereits 1942 wurde der Begriff durch Conrad Waddington als Bezeichnung für „the processes involved in the mechanism by which the genes of the genotype bring about phenotypes effects“ (Waddington 2012, S. 10) eingeführt. Anfangs verbarg sich dahinter eine besondere Strömung der Entwicklungsbiologie, in deren Fokus der Einfluss der Umwelt auf die Entwicklung von Individuen stand. Seit Einführung des Begriffs hat sich seine Bedeutung jedoch grundlegend geändert: Heute wird die Epigenetik als ein eigenständiger Bereich der Molekulargenetik begriffen, der in erster Linie danach fragt, wie Zellen zu ihrer Form oder Funktion gelangen und durch welche funktionellen oder strukturellen Zustände diese in Zelllinien übertragen wird (Jablonka/Lamb 2002). Es gibt jedoch keine, von allen Akteuren geteilte Definition von Epigenetik.

Je nach Autor/in werden der Epigenetik Mechanismen differenzieller Genexpression und deren, von der DNS-Sequenz unabhängigen, Vererbung, wie z. B. DNS-Methylierung<sup>1</sup>, die Veränderungen des Chromatins (z. B. durch Modifikationen von Histonen) und RNS-vermittelte Genregulationsmechanismen (z. B. sog. RNA interference), zugeschlagen (Youngson/Whitelaw 2008).

Das vielleicht Bemerkenswerteste an der Epigenetik ist die Erkenntnis, dass die Umwelt nicht nur mittels Selektionsdruck auf die Evolution von Genomen („passive Veränderung der Erbanlagen“), sondern auch direkt auf die Regulation der Genexpression und damit auf den Phänotyp des Organismus („aktive Veränderung der Erscheinungsform“) Einfluss nimmt, bei der die Erbinformation (DNS-Sequenz der Gene) selbst unbeeinflusst bleibt (vgl. Bonasio et al. 2010; Vandegehuchte/Janssen 2011). Die Veränderungen des sog. Epigenomes (Summe der epigenetischen Informationen) sind z. T. vererbbar (vgl. Grossniklaus et al. 2013) und im Unterschied zu genetischen Mutationen oft reversibel (vgl. Bonasio et al. 2010). Dies hat die Sichtweise auf genetische Regulations- und Vererbungsmechanismen revolutioniert; es wurde sogar von der Epigenetik als der „Wissenschaft des Wandels“ gesprochen (Weinhold 2006). Epigenetische Markierungen haben regulatorischen Einfluss auf die „Benutzung“ der Gene: Sie bestimmen, in welcher Weise ein Gen abgelesen wird bzw. was mit dem Genprodukt passiert. Auf diese Weise erlauben epigenetische Mechanismen dem Körper, auf seine Umwelt zu reagieren – im Positiven wie im Negativen. Für uns Menschen bedeutet das, dass Ernährung, Rauchen, Stress oder Sport, um nur einige Faktoren zu nennen, epigenetische Folgen haben. Diese „Folgen“ werden bei der Zellteilung reproduziert, d. h. von einer auf die andere Zelle weitergegeben. Finden diese epigenetischen Veränderungen in der Keimbahn statt, ist es möglich, dass dies auch Folgen für unsere Nachkommen hat (Lim/Brunet 2013).

## 2 Epigenetik als Thema für die Technikfolgenabschätzung

Die Technikfolgenabschätzung (TA) begleitet die Entwicklung von neuen und etablierten Technologien, um u. a. ihre möglichen negativen Folgen

zu erkennen und Maßnahmen vorzuschlagen, wie diesen entgegenzuwirken ist. Neue TA-Themen möglichst früh zu erkennen, um Entscheidungswissen zur Verfügung stellen zu können, gewinnt dabei zunehmend an Relevanz. Dies zeigt auch die EU-Forschungsförderungspolitik, die schon seit 2003 speziell die „new and emerging science and technologies“ (NEST) inklusive deren gesellschaftlichen Folgen untersuchen ließ. Heute ist die Beschäftigung mit NEST eine feste Größe im ITAS und anderen TA-Einrichtungen (z. B. Grunwald 2012; Swierstra/Rip 2007; Torgerson 2013). Auch die Epigenetik lässt sich diesem NEST-Schwerpunkt zuordnen.

Den Auftakt zur Beschäftigung mit dem Themenkomplex Epigenetik am ITAS bildete die Klausurwoche „Epigenetik – rechtliche, ethische und soziale Aspekte“, die im September 2013, gefördert von Bundesministerium für Bildung und Forschung, stattfand. Im Folgenden soll nun gezeigt werden, warum das Thema für die TA relevant ist, und die in der Klausurwoche erörterten sowie weitere mögliche gesellschaftliche Implikationen dargestellt werden.

## 3 Zeichen des gesellschaftlichen Wandels?

Das epigenetischen Wissen und seine Anwendung hat bereits Folgen für die Gesellschaft. Die sichtbarsten Folgen epigenetischer Wissensbestände finden sich im Bereich der (Bio-)Medizin, wo *neue Diagnose- und Therapieverfahren* entwickelt wurden oder in Aussicht stehen. Die akribische Bestimmung von Methylierungsmustern auf bestimmten Genen erlaubt beispielsweise in beschränktem Umfang Aussagen zur Wahrscheinlichkeit einer Krebserkrankung. Dies erleichtert Arzt/innen und Patienten/innen die Wahl von Therapie und Präventionsmaßnahmen. Medikamente, die auf den epigenetischen Status eines Patienten einwirken, werden heute schon erfolgreich in der Krebstherapie eingesetzt, auch wenn ihre Wirkung noch recht unspezifisch ist. Von großer Bedeutung ist, wie Thomas Haaf (Universität Würzburg) in seinem Beitrag ausführte, *die Epigenetik von Zivilisationskrankheiten*, wie Adipositas und Diabetes und die Frage danach, wie sich *Reproduktions-technologien* auf das Epigenom auswirken (vgl. Handel et al. 2010; van Montfoort et al. 2012).

Die Epigenetik ist Teil der sog. „*data driven biology*“, d. h. sie ist auf die umfassende Erfassung und Verarbeitung von z. T. großen Datenmengen angewiesen. Dafür müssen nicht nur die Epigenome unzähliger Personen erfasst und gespeichert werden, sondern die Auswertung dieser Daten macht oftmals die Verknüpfung mit einer Vielzahl an persönlichen Daten notwendig. Damit verschärft die Epigenetik Problemstellungen, die aus der Genomforschung (Biobanken) bekannt sind. Wie lässt sich ein Missbrauch dieser Daten vermeiden? Wie ist mit Zufallsfunden umzugehen? Wie lässt sich ein „informed consent“ erreichen, wenn es doch notwendig ist, um epigenetische Veränderungen zu untersuchen, über lange Zeiträume Daten von nicht zustimmungsfähigen Personen (Säuglingen, Kindern) zu erfassen?

Die Erkenntnisse der Epigenetik stellen auch die *naturwissenschaftliche Basis von rechtlichen Festlegungen* in Frage. Denn das „Dilemma des Rechts“, wie es Jürgen Robiński (Medizinische Hochschule Hannover) in seinem Beitrag zur Klausurwoche ausdrückte, liege in der Abhängigkeit von naturwissenschaftlichem Wissen und dessen Validität. In Bezugnahme auf die Schutzpflicht des Staates und die Anwendung des Vorsorgeprinzips machte er deutlich, dass die Erkenntnisse aus der epigenetischen Forschung neue Risiken für die Gesellschaft aufdeckten und damit insbesondere relevant für das Entschädigungsrecht und die damit verbundene Beweislastsicherung werden (in diesem Zusammenhang ist z. B. die Reversibilität von epigenetischen Markierungen ein Problem). Auch andere rechtliche Grundsätze, wie das Recht auf informationelle Selbstbestimmung oder das „Recht auf Nichtwissen“ bleiben nicht unberührt, wie Carolin Fündling (Universitäten Augsburg und Wiesbaden) darlegte.

Weiterhin hat Epigenetik auch Folgen für die *toxikologische Bewertung von Chemikalien* im Rahmen von gesetzlich vorgeschriebenen Risikobewertungen. Wie Jutta Jahnel (ITAS) ausführte, wird eine Neubewertung vieler Chemikalien unter Betrachtung ihrer Wirksamkeit auf das Epigenom nötig werden. Welche Probleme dabei auf die Risikobewertung zukommen, machte sie am Beispiel der sog. endokrinen Disruptoren, einer Gruppe von Chemikalien, die das Hormonsystem auf verschie-

denste Weise und in der Regel schon bei geringsten Konzentrationen beeinträchtigen, deutlich.

Verschiebungen lassen sich auch im *gesellschaftlichen Umgang mit biomedizinischen Wissensbeständen* feststellen, wie Sebastian Schuol (Universität Tübingen) und Stefanie Seitz (ITAS) bei der Analyse von Medienberichten und gesundheitsbezogener Ratgeberliteratur herausfanden: Wurde bis vor Kurzem noch gepredigt, dass die Gene quasi unabänderliches Schicksal seien, wird die Epigenetik nun als wahrer Befreiungsschlag gefeiert. In Berichten und Sachbüchern werde deutlich gemacht, dass nun jeder Einzelne ein großes Maß an Eigenverantwortung trägt, da er/sie ja nun theoretisch durch die bewusste Beeinflussung es eigenen Lebensstils zur eigenen Gesundheit – und darüber hinaus zur Gesundheit seiner Nachkommen – beiträgt. Die Erkenntnis, dass eine gesunde Lebensführung eine Voraussetzung für Gesundheit ist, sei an sich nicht neu. Neu hingegen sei, dass hier eine Kausalität hergestellt und scheinbar wissenschaftlich begründbar wird, mit allen Konsequenzen, die das für den Umgang der Gesellschaft mit Krankheit, deren Kosten und Prävention hat. Das könnte bis in moralische Paradoxa führen, wie Philipp Bode (Universität Hannover) am Beispiel der Överkalix-Studien (Kaati et al. 2002) darlegte und fragte: Könnten mich meine Enkel dafür verantwortlich machen, wie ich meine Kinder ernährt habe?

Ganz ähnlich verhält es sich mit epigenetischen Wissensbeständen in Bezug auf das sexuelle Verhalten, wie Treue oder Homosexualität. Wird beispielsweise Homosexualität mit Hilfe der Epigenetik erklärbar (vgl. Rice et al. 2012), dann wird sie auch schnell zu einer „behandelbaren Krankheit“, wie Harald Matern (Universität Basel) darlegte. Er stellte in seinem Beitrag u. a. einen theologischen Bezug zum Konzept der „Ersünde“ her: Besonders die Erkenntnisse zur Sexualität und Übergewicht (Maßlosigkeit) stoßen auf große mediale Resonanz. Ebenso sind die epigenetischen Wissensbestände geeignet, den Rassismus in der Biomedizin zu stärken (Jablonski 2014).

#### 4 Ausblick

Die Epigenetik als Wissenschaft hat unleugbar einen großen Einfluss auf die Konzepte und

Denkmuster der Lebenswissenschaften, auch wenn manch ein Kritiker behauptet, hier würde „alter Wein in neuen Schläuchen“ verkauft. Jedoch wurde erst mit ihrem neuerlichen Aufstieg im Rahmen des molekularbiologischen Paradigmas deutlich, dass nicht (mehr) die DNS-Sequenz allein das Maß aller Dinge ist. Dieses revolutionierte Verständnis von Genregulation insbesondere in Bezug auf die Bedeutung von Umwelteinflüssen hatte bisher vor allem großen Einfluss auf den medizinischen Bereich (Verständnis, Diagnose und Therapie von Krankheiten). Doch was bedeuten diese Erkenntnisse für die Gesellschaft? Werden sie auch hier Umdenken und Wertverschiebungen verursachen?

Nähert man sich der Epigenetik im Rahmen der TA, zeigt sich, dass sie viele Attribute trägt, die typisch für die NEST sind, wie z. B. (i) relativ junges Forschungs- und Entwicklungsfeld mit vielversprechenden Anwendungspotenzialen, aber wenig realisierten, eher prototypenartigen Anwendungen, (ii) uneinheitliche Definition bzw. Funktion als „boundary object“ (Guston 2001) oder (iii) Einfluss auf verschiedene etablierte Technologien, ähnlich wie die klassischen „converging technologies“ (Coenen et al. 2004). Entsprechend können viele Fragestellungen aus dem NEST-Bereich (vgl. Swierstra/Rip 2007) exemplarisch an ihr studiert werden, aber auch epigenetikspezifische zeichnen sich ab.

Die wohl gravierendste gesellschaftliche Wertverschiebung durch die Epigenetik ist die positivistische Einschätzung, jeder Mensch wäre allein über seinen Lebensstil in der Lage, die eigene Gesundheit bzw. die seiner Nachkommen zu beeinflussen. Diese Betonung der Eigenverantwortung droht zur (unzumutbaren) Belastung – psychisch, aber auch finanziell, sollte sich dies im Gesundheitssystem niederschlagen – für den Einzelnen zu werden. Jedoch erlaubt es das frühe Entwicklungsstadium der Epigenetik, ihre Entwicklung „von Anfang an“ zu begleiten und damit ggf. schon frühzeitig auf „gesellschaftlich unerwünschte“ Entwicklungen aufmerksam zu machen.

### Anmerkung

- 1) Bei der DNS-Methylierung handelt es sich um eine chemische Veränderung eines Grundbausteins der

DNS, dem Cytosin. Hierbei wird durch sog. DNS-Methyltransferasen eine Methylgruppe an das Kohlenstoffatom 5 des Cytosinrings angehängt (Schneider et al. 2010). Werden ein oder mehrere Cytosine eines DNS-Anschnitts (z. B. regulatorische Region eines Gens) in spezifischer Weise methyliert, spricht man von einem Methylierungsmuster.

### Literatur

- Bonasio, R.; Tu, S.; Reinberg, D.*, 2010: Molecular Signals of Epigenetic States. In: *Science* 330 (2010), S. 612–616
- Coenen, C.; Rader, M.; Fleischer, T.*, 2004: Of Visions, Dreams and Nightmares: The Debate on Converging Technologies. In: *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 13/3 (2004), S. 118–125
- Grossniklaus, U.; Kelly, B.; Ferguson-Smith, A.C. et al.*, 2013: Transgenerational Epigenetic Inheritance: How Important is It? In: *Nature Review Genetics* 14/3 (2013), S. 228–235
- Grunwald, A.*, 2012: Technikzukünfte als Medium von Zukunftsdebatten und Technikgestaltung. Karlsruhe (Karlsruher Studien Technik und Kultur, Bd. 6)
- Guston, D.H.*, 2001: Boundary Organizations in Environmental Policy and Science: An Introduction. In: *Science, Technology, & Human Values* 26/4 (2001), S. 399–408
- Handel, A.E.; Ebers, G.C.; Ramagopalan, S.V.*, 2010: Epigenetics: Molecular Mechanisms and Implications for Disease. In: *Trends in Molecular Medicine* 16/1 (2010), S. 7–16
- Jablonski, E.; Lamb, M.J.*, 2002: The Changing Concept of Epigenetic. In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 981 (2002), S. 82–89
- Jablonski, N.*, 2014: Race. In: Brockman, J. (Hg): *Question of the Year 2014: What Scientific Idea is Ready for Retirement?* <http://www.edge.org/response-detail/25534> (download 14.3.14)
- Kaati, G.; Bygren, L.O.; Edvinsson, S.*, 2002: Cardiovascular and Diabetes Mortality Determined by Nutrition During Parents' and Grandparents' Slow Growth Period. In: *European Journal of Human Genetics* 10 (2002), S. 682–688
- Lim, J.P.; Brunet, A.*, 2013: Bridging the Transgenerational Gap with Epigenetic Memory. In: *Trends in Genetics* 29/3 (2013), S. 176–186
- Rice, W.R.; Friberg, U.; Gavrillets, S.*, 2012: Homosexuality as a Consequence of Epigenetically Canalized Sexual Development. In: *The Quarterly Review of Biology* 87/4 (2012), S. 343–368

Schneider, E.; Farcas, R.; Haaf, T., 2010: DNA-Methylierung und Evolution. In: BIOSpektrum 5 (2010), S. 524–526

Swierstra, T.; Rip, A., 2007: Nano-ethics as NEST-ethics: Patterns of Moral Argumentation About New and Emerging Science and Technology. In: Nano Ethics 1/1 (2007), S. 3–20

Torgerson, H., 2013: TA als hermeneutische Unternehmung. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 22/2 (2013), S. 75–80

Vandeghechuchte, M.B.; Janssen, C.R., 2011: Epigenetics and its Implications for Ecotoxicology. In: Ecotoxicology 20 (2011), S. 607–624

Waddington, C.H., 2012: The Epigenotype. In: International Journal of Epidemiology 41/1 (2012), S. 10–13

Weinhold, B., 2006: Epigenetics: The Science of Change. In: Environ Health Perspective 114/3 (2006), S. A160–A167

van Montfoort, A.P.A.; Hanssen, L.L.P.; de Sutter, P. et al., 2012: Assisted Reproduction Treatment and Epigenetic Inheritance. In: Human Reproduction Update 18/2 (2012), S. 171–197

Youngson, N.A.; Whitelaw, E., 2008: Transgenerational Epigenetic Effects. In: Annual Review of Genomics and Human Genetics 9/1 (2008), S. 233–257

## Kontakt

Dr. Stefanie Seitz  
 Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)  
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
 Karlstraße 11, 76133 Karlsruhe  
 Tel.: +49 721 608-26018  
 E-Mail: [stefanie.seitz@kit.edu](mailto:stefanie.seitz@kit.edu)



## Nachhaltigere Technologien für eine nachhaltige Entwicklung

Ergebnisse der Dissertation „Lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsanalyse von Technologien“

von Annekatriin Lehmann, TU Berlin

**Technologien können einerseits zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen und andererseits Nachhaltigkeitsprobleme verursachen (Fleischer/Grunwald 2002). Ein Beispiel sind Integrierte Wasserressourcenmanagementprojekte (IWRM) in Entwicklungsländern, in denen Technologien zur Wasserversorgung und Abwasserentsorgung entwickelt und implementiert werden. Ziele sind verbesserte Lebensbedingungen und nachhaltige Entwicklung in der Region. Gleichzeitig können mit diesen Technologien aber Nachhaltigkeitsprobleme einhergehen, durch Energie- und Ressourcenverbrauch bei ihrer Herstellung, Nutzung und Entsorgung. Nachhaltigkeitsanalysen von Technologien in solchen Projekten müssen folglich zwei Aspekte betrachten: 1) welche Technologien sind geeignet, um identifizierte Nachhaltigkeitsdefizite (z. B. unzureichende Wasserversorgung) langfristig zu beheben und 2) welche der möglichen Technologiealternativen ist die „nachhaltigere“, d. h. welche weist die potenziell geringsten ökologischen, ökonomischen und sozialen Belastungen entlang ihres Lebenswegs auf? Letzteres ist Fokus der hier vorgestellten Dissertation (Lehmann 2013).**

## 1 Einleitung

Ziel der Dissertation „Lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsanalyse von Technologien am Beispiel eines IWRM-Projekts“ war es, eine Antwort auf die Forschungsfrage zu geben, wie eine lebenszyklus-, produktbezogene und vergleichende Nachhaltigkeitsanalyse von Technologien – basierend auf dem Life-Cycle-Sustainability-Assessment (LCSA) – umgesetzt werden kann, und zwar speziell im Kontext von IWRM- und Entwicklungsprojekten. Am Beispiel einer Fallstudie zur Analyse ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte alternativer Techno-