Bericht

NACHHALTIGE NANOTECHNOLOGIEN

August, 2012

Öko-Institut für Ökologie und Politik GmbH

Autoren: Antonia Reihlen, Dirk Jepsen

Impressum:

ÖKOPOL GmbH
Institut für Ökologie und Politik

Nernstweg 32–34
D – 22765 Hamburg

www.oekopol.de
info@oekopol.de

++ 49-40-39 100 2 0
++ 49-40-39 100 2 33

Inhalt

1 Einleitung 4
2 Nachhaltigkeit 4
3 Leitbilder 5
3.1 Inhalt und Funktion von Leitbildern 5
3.2 Wirken von Leitbildern 6
4 Leitbild „Nachhaltige Chemie“ 7
5 Abgrenzung von Nanotechnologien 10
6 Nachhaltigkeit von Nanotechnologien 11
6.1 Designprinzipien „green nano“ 12
6.2 Nachhaltige Nanotechnologien zur Lösung gesellschaftlich relevanter Probleme 13
6.3 Bewertung der Anwendung von Nanomaterialien 14
6.4 Ethische Aspekte der Nachhaltigkeit von Nanotechnologien 16
6.5 Umgang mit Nichtwissen 17
6.6 Zusammenspiel von Leitbildern und Technologieentwicklung 18
7 Zusammenfassung 19

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verständnis des Begriffs „Nanotechnologien“ 10
Abbildung 2: Leitbilder und deren Konkretisierungen im Kontext von Nanotechnologien 11
Abbildung 3: Struktur der Designprinzipien 12
Abbildung 4: Mögliches Zusammenspiel von Leitbildern und Technologien 18

1 Einleitung

Nanotechnologien zählen zu den sogenannten „enabling technologies“. Sie unterstützen und befördern Innovationen in anderen technischen Bereichen, wie zum Beispiel der Informations- und Kommunikationstechnologien, der Medizintechnik, der Verfahren zur Energiegewinnung, Energiespeichertechnik oder der Abwasserreinigung. Sie finden in den unterschiedlichsten Bereichen Anwendung und erfahren derzeit eine schnelle Entwicklung und Verbreitung.

Die Integration und Förderung der Nanotechnologien wird seit 2004 durch den Stakeholderdialog der deutschen Bundesregierung im Rahmen der NanoKommission (erste und zweite Dialogphase) sowie der „FachDialoge Nanotechnologien“ (dritte Dialogphase) begleitet. In den Diskussionen spielten und spielen Fragen der Technikfolgenabschätzung und insbesondere der Vermeidung und des Managements von möglichen Risiken im Zusammenhang mit der Verwendung von Nanomaterialien eine zentrale Rolle.

In diesem Bericht werden unterschiedliche Aspekte des Leitbilds Nachhaltigkeit und der Nachhaltigkeitsbewertung von Nanotechnologien diskutiert. Einleitend werden zunächst die Entstehung des Konzepts „Nachhaltigkeit“, sowie einige Merkmale und Funktionen von Leitbildern beschrieben. Danach wird das Leitbild „nachhaltige Chemie“, welches prinzipiell auch Nanotechnologien adressieren könnte, erläutert. Im letzten Teil des Berichtes werden mögliche Aspekte eines Leitbildes „nachhaltige Nanotechnologien“ diskutiert.

Die Inhalte und Ergebnisse des 2-tägigen FachDialogs zu diesem Thema, der vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Juni 2012 veranstaltet wurde, sind in diesen Bericht eingeflossen.

2 Nachhaltigkeit

Die Teilnehmenden der Konferenz der Vereinten Nationen zu Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro (1992) haben im Aktionsprogramm Agenda 21 die „Nachhaltigkeit“ als Leitbild erstmals explizit und auf globaler Ebene vereinbart. Nachhaltigkeit wird als „3 Säulen – Modell“ verstanden, in dem es um den Ausgleich ökologischer, ökonomischer und sozialer Interessen geht. Dies wird im Allgemeinen dahin gehend konkretisiert, dass

- natürliche Lebensgrundlagen nur in dem Maße beansprucht werden, wie diese sich regenerieren (Ökologie),
- keine wirtschaftlichen Belastungen auf die nachkommenden Generationen übertragen werden (Ökonomie) und
- ein friedliches Zusammenleben gewährleistet wird (Soziales).

Seit 1992 ist das Leitbild Nachhaltigkeit kontinuierlich fortentwickelt, ausdifferenziert und für die Bewertung und Ausrichtung von Prozessen oder Produkten konkretisiert worden.

Es ist zu beobachten, dass in politischen Strategien[1] und Forschungsprogrammen auf nationaler[2], EU und internationaler Ebene[3] aber auch in den Politiken und Managementsystemen von Unternehmen[4] sowie in Bewertungskonzepten[5] und -instrumenten die Nachhaltigkeit als Ziel und Bewertungsmaßstab Eingang gefunden hat. Insofern kann das Leitbild Nachhaltigkeit als im Bewusstsein und in den Routinen der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Akteure verankert angesehen werden. [6]

3 Leitbilder

3.1 Inhalt und Funktion von Leitbildern

In diesem Kapitel wird eine Interpretation für die Rolle und Funktion von Leitbildern auf einer allgemeinen Ebene beschrieben[7].

Leitbilder formulieren einen Auftrag (Mission), die damit verbundenen strategischen Ziele (Vision) und geben Orientierung über die Art und Weise ihrer Umsetzung (Werte). Die folgenden Punkte können als Merkmale von Leitbildern angesehen werden:

- Sie beschreiben bildhaft gesellschaftliche Wünsche und Machbarkeiten.
- Sie explizieren gesellschaftlicher Werte.
- Sie sind unscharf und meistens nicht durch Ziele oder Indikatoren konkretisiert. Daher können sie flexibel in unterschiedliche Prozesse und Konzepte integriert werden, und es ist möglich „Subleitbilder“ abzuleiten.

---

[1] Im Programm Europa 2020 ist z.B. einer der drei Schwerpunkte das nachhaltige Wachstum im Sinne der Förderung einer ressourcenschonenden, umweltfreundlicheren und wettbewerbsfähigeren Wirtschaft“.

[2] High-Tech Strategie und Nanoaktionsplan der Bundesregierung orientieren sich am Prinzip der Nachhaltigkeit und meistens ist die Sicherheitsforschung integraler Bestandteil der geförderten Projekte, wohingegen eine Integration des Themas „Nachhaltigkeit“ derzeit nicht erfolgt.

[3] In der OECD werden vornehmlich Technologien und Verwendungen mit hohem Umwelt – und gesellschaftlichem Nutzen bei gleichzeitiger Berücksichtigung und Vermeidung von Risiken gefördert. Der Einsatz von Nanotechnologien soll zur Lösung gesellschaftlicher und ökologischer Fragen, wie z.B. den Bedarf an erneuerbaren Energien und sauberem Wasser, beitragen.

[4] Siehe z. B. die Nachhaltigkeitsstrategie der BASF (www.basf.com/group/corporate/de/sustainability/index).

[5] Siehe z. B. Kriterienkatalog der NanoKommission (www.bmu.de/chemikalien/nanotechnologie/nanodialog/doc/46552.php)

[6] Die bedeutet jedoch nicht, dass immer die „nachhaltigsten“ Optionen umgesetzt werden, sondern lediglich, dass Nachhaltigkeit (zunehmend) „mitgedacht“ wird.

[7] Vergl. u.v.a.: A. Ahrens, A. Braun, A. Effinger, A. von Gleich, K. Heitmann, L. Lißner: „Gestaltungsoptionen für handlungsfähige Innovationssysteme zur erfolgreichen Substitution gefährlicher Stoffe“ (SubChem), September 2004.

- Leitbilder sind nicht ausschließlich und erlauben Pluralität.
- Sie sind zukunftsgerichtet mit einem Bezug zu gewollten bzw. ungewollten Veränderungen.
- Leitbilder wirken nicht direkt, sondern steuern über ihren Kontext.

Leitbilder können unterschiedliche Funktionen erfüllen, wie z. B.:

- Unternehmen bei Entscheidungen auf Basis unvollständigen Wissens Orientierung geben,
- unterschiedliche Akteure/innen für Innovationen motivieren und ihnen Richtungssicherheit geben sowie für ihre Vision werben,
- Forschungsaktivitäten koordinieren und synchronisieren,
- die interne und externe Kommunikation in Institutionen und Organisationen strukturieren und unterstützen,
- Komplexität reduzieren und
- einen möglichen Umgang mit Nichtwissen aufzeigen.

Leitbilder sind bezogen auf bestimmte (Gruppen von) Akteuren/innen und werden durch diese entwickelt und bestimmt. Ob und wie Leitbilder wirken ist unter anderem davon abhängig, ob sie einen Beitrag zur Lösung gesellschaftlich relevanter Probleme leisten können indem sie auf entsprechende Resonanz treffen. Einfluss auf die Wirkung von Leitbildern hat auch, ob diese den Handlungskapazitäten der Akteure/innen entsprechen, ob sie zum „richtigen“ Zeitpunkt entstehen und/oder ob sie „mächtige“ Promotoren haben.

Die Konkretisierung von Leitbildern ist häufig der erste Schritt für eine Ausrichtung von (Entscheidungs-)prozessen oder die Entwicklung von Produkten im Hinblick auf eine dahinter liegende Zielperspektive. Diese Konkretisierungen können unterschiedliche Formen annehmen, z.B.

- Prinzipien, die in z. B. Managementsysteme oder Politiken aufgenommen werden,
- Ziele, die die Richtung von Entwicklungen konkretisieren und messbarer machen,
- Kriterienkataloge, die z. B. die Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Produkten als Bewertungsinstrumente festlegen,
- Indikatoren, die dazu verwendet werden, Produkte, Verfahren oder Prozesse miteinander in Bezug auf ihre Nachhaltigkeit zu vergleichen.

3.2 Wirken von Leitbildern

Retrospektiv lässt sich feststellen, dass zumindest einige Leitbilder in der Vergangenheit eine Lenkungswirkung entfalten und unterschiedliche Akteure/innen motivieren konnten, z. B. das Leitbild der Kreislaufwirtschaft. Es gibt unterschiedliche Ansatzpunkte bzw. Akteure/innen, auf die Leitbilder einen Einfluss haben können, wie z.B. die zu lösenden gesellschaftlichen Herausforderungen, die Neugier der Forscher- und Entwickler/innen, die

Machbarkeit von Verfahren und Produkten, die Personen und ihre Ambitionen, das Verantwortungsbewusstsein von Organisationen und Personen etc. Allerdings lässt sich die steuernde Wirkung von Leitbildern nicht genau ermitteln, da es keine einfachen Zusammenhänge gibt und viele Faktoren in die Entwicklungsprozesse hineinspielen. Da Leitbilder über den Kontext wirken, ist es auch nicht möglich, sie gezielt und kontrolliert zur Steuerung von Prozessen[8] „einzusetzen".

Im Forschungs- und Entwicklungsprozess ergeben sich häufig Fragen und Perspektiven, bei denen die orientierende Funktion von Leitbildern besonders hilfreich sein kann. In der Begleitung dieser Prozesse kann die unscharfe und bildhafte Beschreibung des gewünschten oder unerwünschten Wandels unabhängig von den neuen Erkenntnissen bestehen bleiben und neue Aspekte können integriert werden. Vielfach besteht hier ein Problem darin, die Leitbilder in den Forschungsprozess zu integrieren und die jeweiligen Aspekte in den Ansätzen der Forschenden zu verankern.

In der Forschungsförderung ist eine Integration von Leitbildern zur Nachhaltigkeit bisher nur indirekt erkennbar. Hierfür sind unter anderem institutionelle und strukturelle Gründe der fördernden Institutionen (z. B. Integration von Querschnittsfragestellungen) verantwortlich sowie der Wunsch, insbesondere die Grundlagenforschung nicht einzuengen.

Unternehmensleitbilder lösen bei ihrer praktischen Umsetzung sowohl intern als auch extern Diskussionen aus und schaffen damit Bewusstsein. Es werden Fragen thematisiert, die sonst nicht auf der Managementagenda von Unternehmen stehen. Damit ein Leitbild aber gezielt und konkret etwas verändern kann, muss es durch Prinzipien, Kriterien oder Instrumente operationalisiert werden, die im Rahmen der etablierten Prüfprozesse (z.B. phase-gate) „abgearbeitet" werden können. Die Prinzipien zum verantwortungsvollen Umgang mit Nanomaterialien sowie die Kriterien und Bewertungsinstrumente der NanoKommission können als Operationalisierung des Leitbilds „nachhaltige Nanotechnologien" für Unternehmen verstanden werden.

4 Leitbild „Nachhaltige Chemie"

Im Bereich der Chemie hat sich aus der Debatte um eine „grüne Chemie" ein Leitbild „nachhaltige Chemie" etabliert.

Das Leitbild der „green chemistry" beschreibt einen Einsatz von Chemie, der Umweltbelastungen und (Öko-)Toxizität durch die Herstellung und die Verwendung von chemischen Stoffen möglichst weit reduziert.

[8] Sind Leitbilder z. B. als Bewertungsinstrumente oder Managementprinzipien konkretisiert, so ist eine direkte und messbare Steuerung von Prozessen und Entscheidungen möglich.

Die „green chemistry“ wurde von Anastas und Warner durch 12 Prinzipien konkretisiert, wie z. B.:

- Verminderung von Emissionen z. B. durch Gestaltung chemischer Synthesen bzw. Prozesse und Reaktoren,
- Design sicherer Chemikalien im Sinne der Förderung der Produkte mit den höchsten Nutzen und der niedrigsten Toxizität, Herstellung von (leicht) abbaubaren Chemikalien und Produkten,
- Nutzung erneuerbarer Rohstoffe,
- Erhöhte Effizienz, z. B. Nutzung von Katalysatoren anstelle stöchiometrischer Reagenzien oder Vermeidung unnötiger Zwischenstufen in chemischen Prozessen,
- Maximierung der Atomeffizienz, indem Synthesen und Reaktionen so gestaltet werden, dass die Ausgangsreagenzien vollständig umgesetzt werden und keine ungewünschten Stoffe entstehen,
- Minimierung von Unfallrisiken.

Das Leitbild „green chemistry“ zielt auf die Minderung negativer (Umwelt-) Auswirkungen und Risiken ab und beinhaltet nur indirekt Bezüge zur sozialen und wirtschaftlichen Dimension der Nachhaltigkeit[9].

Beim Weltgipfel zur nachhaltigen Entwicklung in Johannesburg (2002) wurde das Ziel definiert, die schädlichen Wirkungen von Chemikalien auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt bis zum Jahr 2020 zu minimieren (sichere Handhabung entlang des gesamten Lebensweges). Hierdurch werden die Prinzipien der „green chemistry“ aufgenommen. Dieses Ziel soll insbesondere durch den „strategischen Ansatz zum internationalen Chemikalienmanagement“ (SAICM[10]) erreicht werden. Hierbei werden auch die soziale und wirtschaftliche Nachhaltigkeitsdimension berücksichtigt, da Chancen genutzt, der Lebensstandard verbessert, das Vorsorgeprinzip zur Ausbalancierung der Nachhaltigkeitsdimensionen angewandt und eine globale Kooperation etabliert (Finanzierung und Wissenstransfer) werden sollen.

Die Weiterentwicklung des Leitbildes „green chemistry“ zum Leitbild „nachhaltige Chemie“ zeigt sich insbesondere in der Erweiterung der Prinzipien bzw. Aspekte:

- Die Funktion einer Chemikalie bekommt eine höhere Bedeutung und wird als Referenzgröße für Vergleiche von Alternativen etabliert.
- Anwendungszweck und Anwendungskontext sowie wirtschaftliche, ökologische und soziale Nutzen und Chancen von „Chemie“ werden in die Betrachtung integriert.
- Der gesamte Lebenszyklus von Produkten wird berücksichtigt.
- Die räumliche und zeitliche Reichweite der Chemie und ihrer Produkte sind zu betrachtende Aspekte.

[9] So hat z.B. eine geringere Humantoxizität einer Chemikalie eine wirtschaftliche Dimension, da Unternehmen geringere Kosten für die Risikoprävention am Arbeitsplatz haben und eine soziale Dimension, da die Arbeitsplatzbedingungen hierdurch verbessert werden.

[10] Strategic Approach to International Chemicals Management; http://www.saicm.org/

- Der gesellschaftliche Bedarf für ein Produkt / Prozess / Verfahren sowie mögliche rebound Effekte[11] sind wichtige orientierende Parameter für die Einschätzung der Nachhaltigkeit.

Einige Akteure/innen, z. B. das Umweltbundesamt, messen der ökologischen Dimension der Nachhaltigkeit einen höheren Stellenwert bei als der wirtschaftlichen und sozialen Dimension. Dies wird damit begründet, dass die Natur die Basis allen Wirtschaftens und einer funktionsfähigen Gesellschaft ist und sie somit eher den grundlegenden Rahmen definiert, innerhalb derer gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung stattfinden darf. Diese Verschiebung der Gewichtung der ursprünglich als „gleichwertig" betrachteten Nachhaltigkeitsdimensionen wird jedoch nicht von allen Akteuren/innen geteilt.

Für das Leitbild der „nachhaltigen Chemie" existieren die unterschiedlichsten Konkretisierungen und Umsetzungen in Form von Bewertungsinstrumenten, Leitlinien, Prinzipien etc. Im Folgenden wird eine Konkretisierung kurz vorgestellt, die vom Umweltbundesamt (UBA) in Zusammenarbeit mit der OECD mit dem Ziel, einen „vorsorgenden Umwelt- und Gesundheitsschutz mit einer innovativen ökonomischen Strategie zu verbinden, die gleichzeitig zu mehr Beschäftigung führt"[12], erarbeitet wurde.

In dieser Konkretisierung wird unterschieden in qualitative Anforderungen, wie die Entwicklung ungefährlicher Stoffe (oder mindestens Stoffe mit geringer Gefährlichkeit für Mensch und Umwelt), eine ressourcenschonende Produktion und die Langlebigkeit von Produkten und quantitative Anforderungen, insbesondere einem geringen Ressourcenverbrauch, der Verwendung erneuerbarer Ressourcen sowie der Vermeidung oder mindestens Verringerung von Umwelteinträgen (Chemikalien, Schadstoffe). Des Weiteren wird die Bedeutung der Betrachtung des gesamten Lebensweges durch die Anforderung, Analysen zur Rohstoffgewinnung, Herstellung, Weiterverarbeitung, Anwendung und Entsorgung von Chemikalien und Produkten zu erstellen, betont. Die Ausrichtung an diesen Kriterien soll proaktives Handeln, im Sinne einer Vermeidung von Umwelt- und Gesundheitsgefahren sowie von wirtschaftlichen Risiken und Sanierungskosten fördern. Außerdem soll so eine Überbeanspruchung der Umwelt als Ressourcenquelle und Schadstoffsenke verhindert werden. Die Anwendung der Kriterien kann Vertrauen in chemische Produktion und Produkte schaffen und so auch zum wirtschaftlichen Erfolg von Unternehmen beitragen.

Zur Unterstützung der Wirtschaftsakteure bei der konkreten betrieblichen Anwendung dieser Kriterien[13] wurde vom Umweltbundesamt ein entsprechender Leitfaden[14] verfügbar gemacht und in der praktischen Anwendung erprobt.

---

[11] Eine höhere Ressourceneffizienz kann jedoch auch zu Konflikten führen, da unter anderem durch die verringerten Produktionskosten (und eine erhöhte Nachfrage) die Produktion (übermäßig) erhöht wird (Suffizienz) und zu unerwartet großen Stoffströmen mit nicht nachhaltigen Folgen führt.

[12] http://www.umweltbundesamt.de/chemikalien/nachhaltige_chemie/index.htm

[13] Z.B. im Rahmen einer Ersatzstoffprüfung

[14] Leitfaden „Nachhaltige Chemie", Öko-Institut & Ökopol 2010, abrufbar unter http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/dateien/4168.html

5 Abgrenzung von Nanotechnologien

Der Begriff „Nanotechnologien“ wird häufig in der Diskussion unscharf verwendet. Die EU-Kommission definiert Nanotechnologien z.B. als Technologien und Wissenschaften zur Untersuchung von Phänomenen und zur Manipulation von Materialien in atomarer, molekularer und makromolekularer Größe, bei der sich ihre Eigenschaften signifikant von denen in größeren Dimensionen unterscheiden[15].

Gemäß dem Verständnis der Teilnehmenden am FachDialog des BMU, umfasst der Begriff die verschiedenen Zwischen- und Endprodukte, die unter Verwendung von Nanotechnologien hergestellt werden, sowie die entsprechenden Herstellungsverfahren. Darüber hinaus sind nicht nur die Herstellung der Nanopartikel, ihre Funktionalisierung und Verwendung in Werkstoffen, Gemischen und Produkten zu betrachten, sondern auch die Technologien, die ihre Herstellung erst ermöglichen. Die Methoden und Geräte zur Analytik von Nanomaterialien werden ebenfalls mit dem Begriff Nanotechnologien adressiert[16].

Die Abbildung 1 zeigt dieses breit gefasste Verständnis von Nanotechnologien im schematischen Überblick.

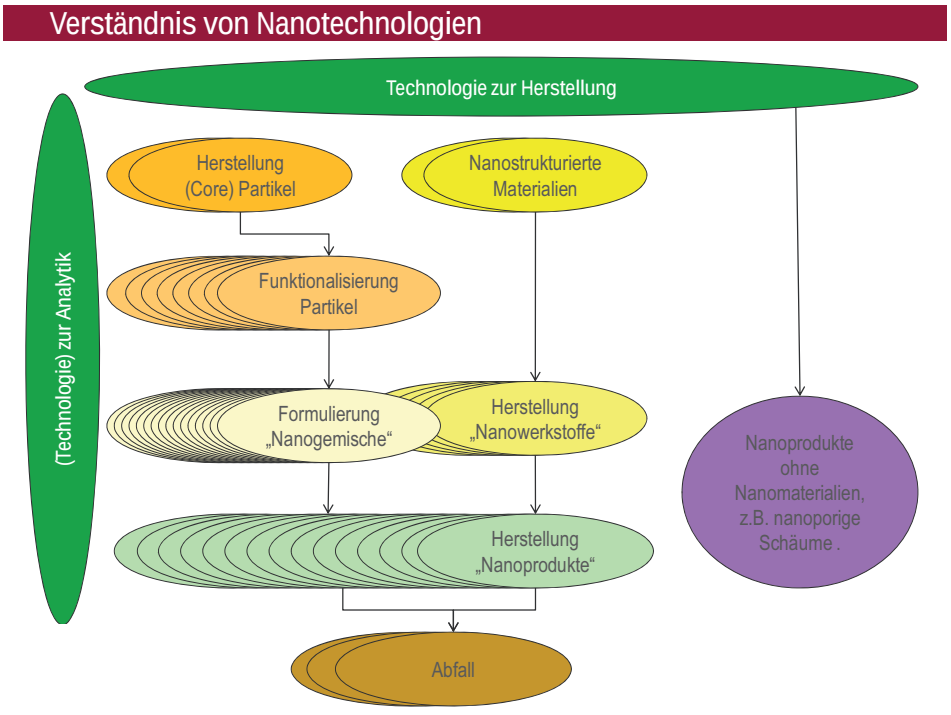

Abbildung 1: Verständnis des Begriffs „Nanotechnologien“

In diesem Bericht wird mit dem Begriff „Nanotechnologien“ die gesamte in der Abbildung aufgeführte Bandbreite von Produkten, Verfahren und Prozessen

[15] http://ec.europa.eu/nanotechnology/index_en.html

[16] Geräte und Methoden zur Expositionsbestimmung von Nanomaterialien, z.B. am Arbeitsplatz, werden in der Regel nicht den Nanotechnologien zugerechnet.

gemeint. Wird der Begriff Nanomaterial verwendet, so wird hiermit die Herstellung und Verwendung von Nanopartikeln im engeren Sinne bezeichnet; andere Technologien, wie die Analytik oder Herstellungsverfahren werden dann nicht eingeschlossen.

6 Nachhaltigkeit von Nanotechnologien

Ein explizites Leitbild für „nachhaltige Nanotechnologien“ wurde bisher nicht formuliert und dokumentiert. In den Diskursen über nachhaltige Chemie werden Nanomaterialien und Nanotechnologien implizit und teilweise explizit „mitgedacht“, z.B. in der OECD und SAICM. Auch in Diskussionen über die Forschungsförderung im Bereich der Nanotechnologien und der Technologieentwicklung allgemein wird Nachhaltigkeit als Konzept häufig aufgegriffen. Die Frage, ob es eines eigenständigen Leitbildes „Nachhaltige Nanotechnologie“ bedarf, bzw. welche Funktion solch ein Leitbild erfüllen könnte, war einer der zentralen Diskussionspunkte im FachDialog des BMU.

In Abbildung 2 wird ein solches mögliches Leitbild „Nachhaltige Nanotechnologie“ in den Kontext anderer Leitbilder und konkretisierender Kriterien und Prinzipien eingeordnet. Sie sind räumlich (Y-Achse) und nach dem Grad ihrer Abstraktheit (X-Achse) geordnet.

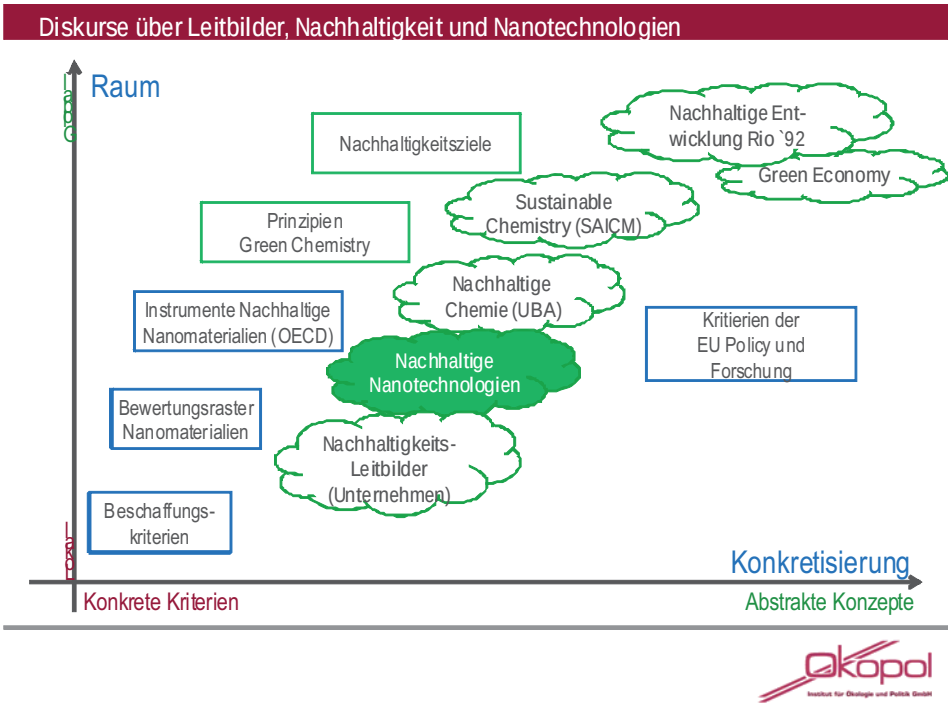

Abbildung 2: Leitbilder und deren Konkretisierungen im Kontext von Nanotechnologien

6.1 Designprinzipien „green nano“

Eine Arbeitsgruppe der NanoKommission (zweite Dialogphase) hat Designprinzipien[17] für nachhaltige Nanomaterialien entwickelt. Diese können als Ausgestaltung der ökologischen Dimension eines Nachhaltigkeitsleitbildes („green nano“) für Nanomaterialien angesehen werden, bei dem es nicht nur um die Vermeidung bzw. Minimierung negativer Effekte, sondern auch die Realisierung positiver Wirkungen auf Mensch und Natur geht.

Die Designprinzipien sind in vier Hauptfelder gegliedert (siehe Abbildung 3), wobei die Innovationshöhe in der Abbildung von links unten nach rechts oben in der Regel zunimmt. Die Designprinzipien sind keine ‚Vorschriften‘ sondern Zielvorstellungen bzw. Orientierungen, die miteinander konkurrieren oder sich gar widersprechen können.

Abbildung 3: Struktur der Designprinzipien

Das Konzept des „benign by design“ propagiert ebenfalls, dass Stoffe nicht nur inhärent sicher sein, sondern zusätzlich auch das Ökosystem nähren und dadurch dazu beitragen sollten, Probleme zu vermeiden. Nanomaterialien sollten so gestaltet sein, dass sie nicht persistent sind[18], keine problematischen Abbau-, Umwandlungs- und Alterungsprodukte bilden und keine kritischen Morphologien aufweisen. Zudem sollten sie möglichst „naturnah“ sein, d.h. die verwendeten Kernpartikel sollten möglichst keine seltenen Elemente sein, sondern in der Natur häufig vorkommen (z.B. Eisen).

Die Chancen und Risiken jeglicher Innovationen werden nicht nur durch die jeweilige Technologie selbst bestimmt, sondern auch durch ihre Einsatzbedingungen, Anwendungszwecke und Anwendungskontexte. Je

[17] www.bmu.de/chemikalien/nanotechnologie/nanodialog/doc/46552.php

[18] Dies gilt nicht für anorganische Nanomaterialien, wobei zwischen der Persistenz der Verbindung als solcher und der Persistenz der Nanoeigenschaften zu unterscheiden ist. Letztere Interpretation der Persistenz kann auch auf anorganische Nanomaterialien angewendet werden.

stärker die Wirkung von (neuen) Materialien, Prozessen und Produkten durch ihre Anwendung bestimmt wird, desto stärker sollte der Anwendungskontext auch in die Bewertung einbezogen werden, um ein umfassendes Bild zu ermöglichen. Die Berücksichtigung der Anwendung ist eine besondere Herausforderung für die Bewertung von Nanomaterialien und Nanotechnologien, da diese als sog. „enabling technology" sehr viele und sehr unterschiedliche Chancen eröffnen und Risiken bergen können.

Die Designprinzipien geben (alleine) keine Orientierung in Hinblick auf eine umfassende Nachhaltigkeit von Nanomaterialien, da sie sich „lediglich" auf die risikoarme, schadstoffarme und ressourcenschonende Gestaltung von Nanomaterialien beziehen. Einerseits sind die soziale und die wirtschaftliche Dimension nicht abgedeckt und andererseits werden die möglichen Anwendungskontexte nur sehr indirekt über die Art des Materials und seine Funktionalität integriert.

6.2 Nachhaltige Nanotechnologien zur Lösung gesellschaftlich relevanter Probleme

Leitbilder können Beiträge zur Lösung gesellschaftlich relevanter Probleme leisten, z. B. indem sie Orientierung über die Art oder Qualität möglicher Lösungen geben (z. B. Nachhaltigkeit), ungewollten Wandel verhindern (z. B. Ausschluss bestimmter Risiken oder Technologien) oder die Formulierung konkreter Ziele und Meilensteine unterstützen.

Es gibt unterschiedliche Auffassungen zwischen und auch innerhalb der verschiedenen Stakeholdergruppen darüber, ob die Formulierung eines gesellschaftlich relevanten Problems und die Suche nach Lösungen dafür die Technologieentwicklung treiben oder ob die Möglichkeiten einer Technologie eine Suche nach Anwendungsfeldern und „zu lösenden Problemen" auslöst.

Im ersten Fall würden Leitbilder sowohl bei der Gewichtung und der Bewertung der Dringlichkeit des formulierten Problems (Einordnung des Bedarfs in ein Wertesystem) als auch der Auswahl der (technologischen) Lösungen steuernd wirken können (welche Technologien können Lösungen innerhalb des erwünschten Wandels ermöglichen). Im zweiten Fall würden Leitbilder stärker auf die Art, wie eine Technologie angewendet wird, wirken, also „später" ansetzen.

Bezogen auf Nanotechnologien waren sich die Teilnehmenden am FachDialog zu „nachhaltigen Nanotechnologien" darin einig, dass Nanotechnologien kein Selbstzweck sind, sondern sie der Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen dienen sollen. Es bestand jedoch Uneinigkeit in der Frage, ob in der Praxis nanotechnologische Innovationen eher durch ihre Möglichkeiten getrieben werden (technology-push) oder durch den gesellschaftlich oder technisch formulierten Bedarf an Lösungen für relevante Probleme (demand-pull). Dieser Diskussion liegt eine Einschätzung darüber zugrunde, ob der frühe Innovationsprozess allein auf die Erzielung bestimmter Materialeigenschaften abzielt, oder ob bereits in frühen Entwicklungsphasen

konkrete Anwendungen (Nutzungskontexte) dieser Nanomaterialien bekannt („vorgedacht“) sind.

Alle Akteure/innen befanden, dass idealerweise dem Einsatz von Nanotechnologien die Definition des Problems und des gesellschaftlichen Bedarfs vorausgehen sollte, sowie eine Abwägung, welche technologischen Möglichkeiten (oder auch Verhaltensalternativen) den identifizierten Bedarf am nachhaltigsten erfüllen können[19]. Viele waren aber der Meinung, dass in der Realität sich Technologien – und auch die Nanotechnologien – in vielen Fällen parallel zur Identifizierung von Problemstellungen und parallel zur Abwägung der Nachhaltigkeit ihrer Anwendung im jeweiligen Kontext entwickeln.

6.3 Bewertung der Anwendung von Nanomaterialien

Bei einer Beurteilung „der Nanotechnologien“ ist die Bewertung von Nanomaterialien der brisanteste und schwierigste Bereich, da einerseits das Anwendungsspektrum eines einzelnen Partikels sehr breit ist und andererseits mit der Freisetzung von Nanomaterialien „als solchen“ die höchsten Risikopotenziale für Mensch und Umwelt verbunden sind. Im Folgenden werden daher einige Diskussionen zur Nachhaltigkeitsbewertung von Nanomaterialien zusammengefasst.

Instrumente zur Bewertung der Anwendung von Nanomaterialien sind eine Form der Konkretisierung eines impliziten Leitbildes „nachhaltige Nanotechnologien“. Die existierenden Instrumente haben unterschiedliche Bewertungsgegenstände, so wurde z. B. in der NanoKommission je ein Kriterienset für die Bewertung von Nanomaterialien („nur Risikoaspekte“) und für Nanoprodukte (einschließlich sozialer und wirtschaftlicher Dimension) entwickelt.

Für eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung von Nanomaterialien ist es unerlässlich, nicht nur den konkreten Bewertungsgegenstand zu definieren, sondern außerdem den jeweiligen Anwendungszweck und Anwendungskontext zu berücksichtigen. Dies ist erforderlich, um alle Aspekte der Nutzen und Risiken sowie der sozialen, ökologischen und wirtschaftlichen Folgen der Anwendung von Nanomaterialien zu erfassen und für den Vergleich mit Alternativen heranzuziehen (siehe Kapitel 4).

Es stellt sich die grundsätzliche Frage, ob in einer frühen Forschungs- und Entwicklungsphase die „Anwendung von Nanomaterialien“ überhaupt bereits bewertet werden kann. Im Wesentlichen werden drei Argumente formuliert, warum eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung auf der Ebene eines isolierten Nanomaterials nicht zu leisten ist:

- Mögliche Risiken leiten sich auch aus dem Freisetzungspotenzial eines Nanomaterials entlang seines gesamten Lebenswegs, einschließlich der Abfallphase ab. Nanomaterialien, die fest in Materialmatrices eingebunden sind, werden z. B. weniger stark

[19] Im Bereich der Grundlagenforschung trifft dies nicht zu, allerdings könnte auch hier die Exploration neuer Möglichkeiten bereits anhand von Designprinzipien oder Leitbildern in Richtung der Nachhaltigkeit gelenkt werden.

freigesetzt (niedrigere Exposition) als solche, die nicht chemisch gebunden vorliegen.

- Die Art eines Produktes sowie der Zweck und die Art und Weise seiner Anwendung sind entscheidende Einflussgrößen auf die weiteren Dimensionen der Nachhaltigkeit:
    - Die Produktart bestimmt auch das Freisetzungspotenzial (z. B. richtet sich die Art der Abfallentsorgung zum Teil nach der Art des Endproduktes) sowie wer exponiert ist (Verbraucherprodukte, Spielzeuge oder solche, die nur in professionelle Anwendungen gelangen) und in welcher Höhe.
    - Der Produktnutzen kann so hoch sein, dass bestimmte Risiken in Kauf genommen bzw. aufgewogen werden. Beispielsweise könnten die gesellschaftlichen / gesundheitlichen Nutzen von Nanoprodukten, die der Krankheitsvermeidung dienen, die möglichen Risiken der Anwendung von Nanomaterialien rechtfertigen.
- Die Bewertung der Nachhaltigkeit ist relativ. Wird ein Nanomaterial ohne Kontext bzgl. der Nachhaltigkeit bewertet, müsste eine absolute Betrachtung vorgenommen werden, da kein Vergleich möglich ist.

Auch Nanomaterialien, die kein Risiko für Umwelt- und Gesundheit bergen, z.°B. weil sie nachweislich keine gefährlichen Eigenschaften haben, können vom Prinzip her nicht nachhaltig sein. Diese wäre z.°B. dann der Fall wenn sie für Produkte verwendet werden, die gesellschaftlich unerwünscht sind.

Eine andere Auffassung, nach der eine weitergehende Nachhaltigkeitsbewertung auch von isolierten Nanomaterialien zumindest ansatzweise möglich ist, basiert auf der Argumentation, dass die Art und die Funktionalisierung von Nanomaterialien teilweise den Anwendungskontext bereits festlegen. Hierbei wird angenommen, dass das Design von Nanomaterialien und die Suche nach Möglichkeiten, bestimmte Eigenschaften zu erzeugen, bereits von erwünschten Funktionalitäten und damit möglichen Anwendungen inspiriert und geleitet ist. Auch die generellen Möglichkeiten, Nanomaterialien in Produkten einzusetzen, können als Indikatoren oder Szenarien für eine Einschätzung der Nachhaltigkeit genutzt werden. Gemäß dieser Auffassung haben also Forscher/innen und Entwickler/innen von neuen Nanomaterialien eine konkrete Funktionalität (Design der technischen Eigenschaften) und vielfach auch eine Anwendung „im Blick“.

Im speziellen Fall des Stoffdesigns mittels der „computational chemistry“ werden zum Beispiel zunächst alle Moleküle „zugelassen“, die prinzipiell die gewünschte Funktionalität haben können. In einem zweiten Schritt werden dann Moleküle ausgeschlossen, die Eigenschaften haben, die auf inakzeptable gefährliche Eigenschaften (und ggf. mögliche Risiken) hindeuten. Außerdem kann bereits in diesem Schritt eine Auswahl auf Kriterien basieren, die sich von einer möglichen zukünftigen Anwendung ableiten.

Für die Entwicklung neuer Werkstoffe ist nach Aussagen der Teilnehmenden im FachDialog die konkrete Anwendung in der Regel nicht bekannt, sondern sind lediglich die Qualitätsanforderungen an das Material definiert. Hierdurch könnten in der Regel zwar bestimmte Anwendungen ausgeschlossen, aber nicht unbedingt die wahrscheinlichen, zukünftigen Anwendungsfelder identifiziert werden, insbesondere da diese auch von wirtschaftlichen Erwägungen der Marktakteure/innen oder von (förder-)politischen Setzungen der gesellschaftlichen Akteure/innen abhängen.

In den Diskussionen um die Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten und Prozessen wurde von allen Teilnehmenden am FachDialog betont, dass zu viele Anforderungen die Innovationstätigkeit und Forschung sowie die Risikobereitschaft von entwickelnden Unternehmen zu stark einschränken.

6.4 Ethische Aspekte der Nachhaltigkeit von Nanotechnologien

In der Debatte um ethische Aspekte der Nachhaltigkeit von Nanotechnologien wurden bislang kaum technologiespezifische Fragestellungen aufgeworfen. Alle Aspekte werden auch in Bezug auf andere Technologien (z.B. die Gentechnik oder die synthetische Biologie) diskutiert, wobei die Relevanz der Teilaspekte naturgemäß etwas variiert. Zentrale Fragen sind neben dem Umgang mit Risiken und Nicht-Wissen um die Folgen der Anwendung von Nanotechnologien, Fragen der globalen Verteilungsgerechtigkeit, der „technischen Gestaltung“ biologischer Systeme und dem damit verbundenen Wandel im Umgang mit Leben sowie die Möglichkeiten der (gesellschaftlichen Einflussnahme auf) Technikgestaltung.

Die Einflussnahme auf die Technikgestaltung ist für Nanomaterialien aufgrund der Vielfalt der Anwendungen sehr komplex. Daher wird das Thema „nano“ in einer Vielzahl von Diskursen (mit jeweils z.T. sehr andersartig gelagerten Randbedingungen) integriert und existiert kaum als eigenständiger Technologiediskurs. Je nach Art des Anwendungsbereiches stehen unterschiedliche ethische Aspekte im Vordergrund[20].

Ethische Prinzipien können orientierend wirken und ebenso „Leitplanken“ für die Technologieentwicklung definieren, wie die Risikodebatte. Allerdings haben ethische Argumente in technologischen Debatten oft weniger Gewicht als wissenschaftliche Argumente. In der gesellschaftlichen Debatte können diese Argumente hingegen oft bedeutsamer sein, als die wissenschaftlichen.

In den Diskussionen um die gesellschaftliche und ökologische Nachhaltigkeit (von Nanotechnologien) sind auch die Grenzen des Wachstums bedeutsam. Dies ist im Kontext der Verteilungsgerechtigkeit und der Verantwortung für die nachfolgenden Generationen auch und insbesondere eine ethische Fragestellung. Die Lage dieser Grenzen wird von unterschiedlichen

[20] In den Diskussionen um das „human enhancement“, also die Verbesserung der Funktionsfähigkeit des menschlichen Körpers, ist z. B. das sich wandelnde Verständnis des Lebens und dem Umgang damit vordringlich. Beim Einsatz von Nanomaterialien in Verbraucherprodukten stehen die Risikodiskussionen sowie der Umgang mit Nichtwissen stärker im Vordergrund, bei anderen Technologien sind die Fragen der Verteilungsgerechtigkeit wichtiger.

Institutionen[21] regelmäßig beschrieben, kann aber nicht sicher quantifiziert werden. Auch hier gibt es zwei Auffassungen, in welchem Zusammenhang die „Grenzen des Wachstums“ und die Technologieentwicklung stehen:

- Technologien können und sollten, z. B. durch Steigerung der Ressourceneffizienz oder Minderung des Energieverbrauchs, dazu beitragen, die Grenzen des Wachstums zu verschieben.
- Technologien sollten lediglich den Spielraum innerhalb der vorgegebenen Wachstumsgrenzen nutzen. Daher müssen gesellschaftliche Bedürfnisse priorisiert und eine Wahl getroffen werden, ob und wie diese mittels (neuen) Technologien befriedigt werden können.

6.5 Umgang mit Nichtwissen

Die Nanotechnologieentwicklung wird von vielfältigen Aktivitäten zur Wissensgenerierung begleitet, um mögliche Risiken zu erkennen und zu vermeiden und um die möglichen Anwendungspotenziale und Chancen zu identifizieren und nutzen. Dennoch fehlen für eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung relevante Kenntnisse und Daten.

Informationslücken über die Gefährdungspotenziale und möglichen Expositionen erschweren eine Einschätzung möglicher Umwelt- und Gesundheitsrisiken. Strategien, wie der Informationsbedarf für eine Bewertung reduziert werden kann, sind insbesondere auch wegen der Vielfalt der Materialien und Anwendungen wichtig. Das „benign by design“ wäre hier ggf. eine Möglichkeit, die Erzeugung von Daten zu Expositionen weitgehend überflüssig zu machen. Die Forschungsaktivitäten zur Modellierung der Gefährlichkeit und Exposition von Nanomaterialien in der EU (Horizon 2020) können ebenfalls wichtige Beiträge zur Deckung des Informationsbedarfs leisten.

Auch ökonomische Daten, die Aussagen über den gesamtwirtschaftlichen Nutzen der Technologieanwendung erlauben, sind praktisch kaum verfügbar. Das liegt u.a. im Charakter der Nanotechnologie als „enabling technology“ begründet, der damit verbundenen Vielfalt an (Möglichkeiten) ihrer Anwendung in sehr vielen unterschiedlichen Produkten. Daher können die jeweiligen Beiträge zur Wertschöpfung, Innovation oder Wettbewerbsfähigkeit kaum abgegrenzt und quantifiziert werden.

Die Möglichkeiten die soziale Dimension der Nanotechnologie „als solche“ zu bewerten, wurden von den Teilnehmern am FachDialog als noch geringer eingestuft, obgleich der Stellenwert auch der sozialen Bewertung von Technologieanwendungen als wichtig eingeschätzt wird.

[21] Siehe z. B. eine der ersten Prognosen im „Medadows Report“ des Club of Rome oder aktuell den „Environmental Outlook 2050“ der OECD.

Ergänzend erscheint es wichtig anzumerken, dass die skizzierten Informationen nicht nur zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Nanoprodukten und Technologien benötigt werden, sondern auch z.B. für gesetzliche Folgenabschätzung[22] der EU.

6.6 Zusammenspiel von Leitbildern und Technologieentwicklung

In der Diskussion des FachDialogs „Nachhaltige Nanotechnologien“ kristallisierte sich das in Abbildung 4 dargestellte Bild über ein Zusammenspiel von Leitbildern und Technologien auf unterschiedlichen Ebenen heraus.

„Nachhaltigkeit“ bzw. „nachhaltige Entwicklung“ ist faktisch zu einem grundlegenden gesellschaftlichen Konzept und Ziel geworden. Das Leitbild der „nachhaltigen Entwicklung“ selbst bleibt dabei aber eher vage und richtet sich an alle gesellschaftlichen Akteure/innen und Prozesse. Es bildet somit die Basis, auf die sich spezifischere Leitbilder beziehen (können). Das Konzept „Nachhaltigkeit“ wird dabei aus einer zugrundeliegenden Weltsicht gespeist, die z.B. globale Gerechtigkeit und den Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen als zentrale Werte beinhaltet.

Leitbilder wie „green economy“ oder „green chemistry“ sind spezifischer und konkretisieren eine Ausgestaltung der Nachhaltigkeit in sehr grundlegenden Feldern des gesellschaftlichen Handelns.

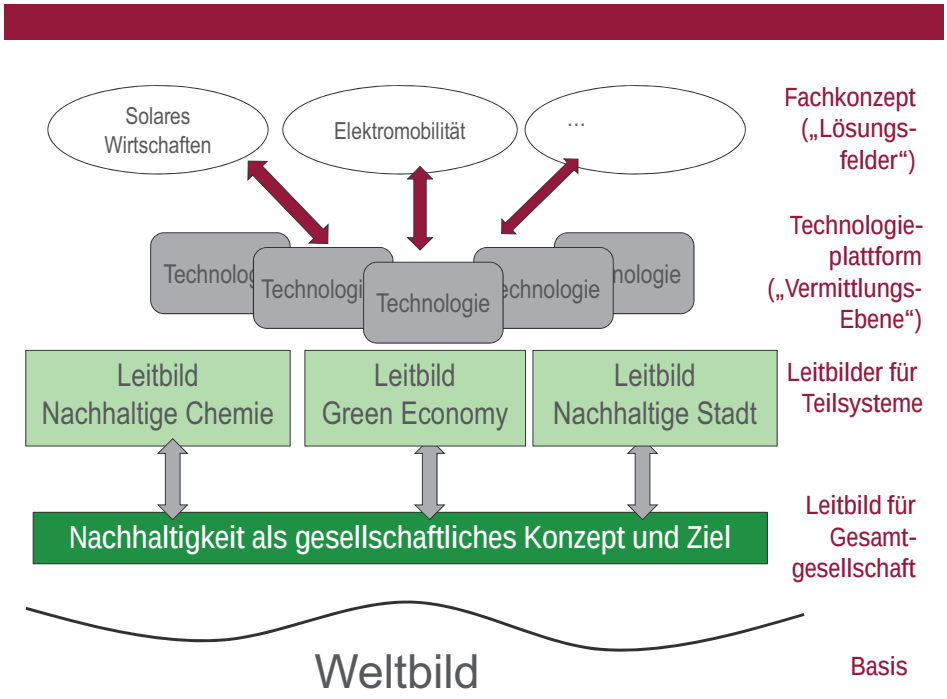

Abbildung 4: Mögliches Zusammenspiel von Leitbildern und Technologien

[22] http://ec.europa.eu/dgs/secretariat_general/index_de.htm (dort auf „Folgenabschätzung“ klicken).

Daneben gibt es –am anderen Ende – konkrete Visionen, wie die „solare Wirtschaft“ oder die „Kreislaufwirtschaft“, die als Leitbilder eher Möglichkeiten des Zusammenführens gesellschaftlicher Bedürfnisse und zu beachtender Randbedingungen (wie die Tragfähig der ökologischen Systeme, aber auch die angestrebte nachhaltige Ausgestaltung der gesellschaftlichen Handlungsfelder) beschreiben. Sie richten sich vorrangig an die Akteure/innen, die an der Umsetzung dieser „Idee“ beteiligt sind.

In solch einem Bild werden die Nanotechnologien eher als Teil der „Technologieplattformen“ gesehen, die eine Mittlerfunktion zwischen diesen unterschiedlichen Ebenen von Leitbildern haben. Technologieplattformen stellen technische Lösungen zur Verfügung, aus denen sich die Akteure/innen dem Bedarf entsprechend und der Zielsetzung folgend, bedienen könnten.

Technologieplattformen haben dabei kein eigenständiges (explizites) Nachhaltigkeitsleitbild. Sie können jedoch anhand von geeigneten Kriterien, z.°B. im Hinblick auf „Risikoarmut“ und „Effizienz“, optimiert werden, so dass innerhalb einer Technologie ausschließlich/vorrangig Lösungen angeboten werden, die sich innerhalb eines „sicheren“ Korridors bewegen und die damit nicht im Widerspruch zu einer angestrebten Nachhaltigkeit der Gesamtlösung oder Anwendung stehen.

Eine solche Strukturierung der verschiedenen Handlungs- und Leitbildebenen macht eine eigenständige Bewertung der Nanotechnologie im Kontext der Nachhaltigkeit weder umsetzbar noch notwendig. Und es bedürfte auch keines umfassenden Leitbildes „nachhaltige Nanotechnologie“. Was es aber bräuchte, wären Prinzipien und Kriterien ähnlich den Designprinzipien „green nano“ der NanoKommission, die eine frühzeitige, orientierende Qualifizierung von nicht-nachhaltigen Verfahren unterstützen können.

7 Zusammenfassung

Nachhaltigkeit ist als gesellschaftliches Konzept und Zielsetzung faktisch in gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entscheidungs- und Entwicklungsprozessen integriert. Die Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten, Prozessen oder Technologieentwicklungen erfordert regelmäßig auch eine umfassende Betrachtung ihres jeweiligen Anwendungszwecks und Anwendungskontexts. Dies gilt insbesondere für Nanomaterialien, da sie in sehr unterschiedlichen Bereichen angewendet werden können.

Ein explizites Leitbild „nachhaltige Nanotechnologien“ existiert derzeit nicht. Allerdings gibt es verschiedene Instrumente und Konkretisierungen, die ein solches Leitbild implizit enthalten, unter anderem das der „nachhaltigen Chemie“. Zur weiteren und stärkeren Verankerung der Nachhaltigkeit in die Technologieentwicklung sollten Nachhaltigkeitsleitbilder und deren Konkretisierungen stärker in den Alltag aller Akteure/innen eingebracht werden, z. B. im Rahmen von schulischer und außerschulischer Bildung oder als Anforderung im Rahmen der Forschungsförderung.