

# **Analyse und strategisches Management der Nachhaltigkeitspotenziale von Nanoprodukten**

NachhaltigkeitsCheck von Nanoprodukten

Endbericht

Freiburg / Berlin / Darmstadt, November 2011

Unterstützt mit Mitteln des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit im  
Auftrag des Umweltbundesamts

## **Autoren:**

Dipl.-Ing. Martin Möller, Büro Freiburg  
Ass. iur. Andreas Hermann, LL.M., Büro Berlin  
Dr. Christoph Pistner, Büro Darmstadt  
Rita Groß, Büro Freiburg  
Peter Küppers, Büro Darmstadt  
Katja Moch, Büro Freiburg  
Siddharth Prakash, Büro Freiburg  
Angelika Spieth-Achtnich, Büro Darmstadt

## **Öko-Institut e.V.**

### **Geschäftsstelle Freiburg**

Postfach 17 71  
79017 Freiburg, Deutschland

### **Hausadresse**

Merzhauser Straße 173  
79100 Freiburg

**Tel.** +49 (0) 761 – 4 52 95-0

**Fax** +49 (0) 761 – 4 52 95-88

### **Büro Darmstadt**

Rheinstraße 95  
64295 Darmstadt, Deutschland

**Tel.** +49 (0) 6151 – 81 91-0

**Fax** +49 (0) 6151 – 81 91-33

### **Büro Berlin**

Schicklerstr. 5-7  
10179 Berlin, Deutschland

**Tel.** +49 (0) 30 – 40 50 85-0

**Fax** +49 (0) 30 – 40 50 85-388

Zur Entlastung der Umwelt ist dieses Dokument für den  
**beidseitigen Druck** ausgelegt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Executive Summary</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Einführung</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Zielstellung</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Vorarbeiten und methodische Anknüpfungspunkte</b>	<b>10</b>
<b>5.1</b>	<b>PROSA</b>	<b>10</b>
<b>5.2</b>	<b>SWOT-Analyse</b>	<b>12</b>
<b>5.3</b>	<b>Kriterienkatalog der Themengruppe 2 des NanoDialogs 2009-2011</b>	<b>18</b>
<b>5.4</b>	<b>Weitere Vorarbeiten</b>	<b>21</b>
5.4.1	Studien zu Nachhaltigkeitsaspekten von Nanotechnologien im Auftrag des Umweltbundesamtes	21
5.4.2	Schweizer Vorsorgeraster	24
5.4.3	Selbstbewertungstool "NanoMeter"	27
<b>6</b>	<b>Grundprinzipien des Nano-NachhaltigkeitsChecks</b>	<b>28</b>
<b>6.1</b>	<b>Nachhaltige Entwicklung als Leitbild</b>	<b>29</b>
<b>6.2</b>	<b>Anwendung des Lebenszyklusansatzes</b>	<b>29</b>
<b>6.3</b>	<b>Universeller Ansatz für eine nanospezifische Analyse</b>	<b>31</b>
<b>6.4</b>	<b>Vergleichende Betrachtung zu einem Referenzprodukt</b>	<b>32</b>
<b>6.5</b>	<b>Rechtzeitige Verankerung im Entwicklungsprozess</b>	<b>32</b>
<b>6.6</b>	<b>Integration des Vorsorgegedankens</b>	<b>33</b>
<b>6.7</b>	<b>Berücksichtigung von Stöfallereignissen</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>Charakterisierung des Analyserasters</b>	<b>35</b>
<b>7.1</b>	<b>Definition der Untersuchungsgegenstände</b>	<b>35</b>
7.1.1	Nanomaterialien	35
7.1.2	Nanoprodukt	36
7.1.3	Referenzprodukt	37
<b>7.2</b>	<b>Festlegung der Systemgrenzen</b>	<b>38</b>
7.2.1	Festlegung des Produktsystems	39
7.2.2	Funktionalität und funktionelle Einheit	40
<b>7.3</b>	<b>Methodische Einbettung und Zuordnung der Schlüsselindikatoren</b>	<b>40</b>

<b>7.4</b>	<b>Beschreibung der Schlüsselindikatoren der Stärken-Schwächen-Analyse im Einzelnen</b>	<b>42</b>
7.4.1	CO <sub>2</sub> -Fußabdruck (Product Carbon Footprint)	42
7.4.2	Energieeffizienz	44
7.4.3	Exposition an Arbeitsplatz	45
7.4.4	Gebrauchsnutzen	46
7.4.5	Lebenszykluskosten	47
7.4.6	Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt	49
7.4.7	Störfallaspekte	50
7.4.8	Symbolischer Nutzen	51
<b>7.5</b>	<b>Beschreibung der Schlüsselindikatoren Chancen-Risiko-Analyse im Einzelnen</b>	<b>52</b>
7.5.1	Beschäftigungswirkung	52
7.5.2	Gesellschaftlicher Nutzen	54
7.5.3	Rechtliche Rahmenbedingungen und Forschungsförderung	55
7.5.4	Recyclingfähigkeit	56
7.5.5	Ressourcenverfügbarkeit	57
7.5.6	Risikowahrnehmung	58
<b>7.6</b>	<b>Auswertung der SWOT-Matrix</b>	<b>60</b>
<b>7.7</b>	<b>Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Erprobung des Analyserasters</b>	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>Ergebnisse des Fallbeispiels pro.Glass Barrier 401</b>	<b>63</b>
<b>8.1</b>	<b>Produktbeschreibung</b>	<b>63</b>
<b>8.2</b>	<b>SWOT-Matrix</b>	<b>66</b>
<b>8.3</b>	<b>Einzelergebnisse der Schlüsselindikatoren</b>	<b>67</b>
8.3.1	Stärken-Schwächen-Analyse	67
8.3.2	Chancen-Risiken-Analyse	71
<b>8.4</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>73</b>
<b>8.5</b>	<b>Strategische Optimierung</b>	<b>74</b>
<b>9</b>	<b>Ergebnisse des Fallbeispiels X-SEED</b>	<b>76</b>
<b>9.1</b>	<b>Produktbeschreibung</b>	<b>76</b>
<b>9.2</b>	<b>SWOT-Matrix</b>	<b>81</b>
<b>9.3</b>	<b>Einzelergebnisse der Schlüsselindikatoren</b>	<b>82</b>
9.3.1	Stärken-Schwächen-Analyse	82
9.3.2	Chancen-Risiken-Analyse	86
<b>9.4</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>89</b>
<b>9.5</b>	<b>Strategische Optimierung</b>	<b>90</b>

<b>10</b>	<b>Vorgesehene Anwendungsbereiche, Stärken und Limitierungen des Instruments</b>	<b>91</b>
<b>11</b>	<b>Weiterentwicklungsmöglichkeiten und Ausblick</b>	<b>95</b>
<b>12</b>	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>98</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	PROSA-Pfadfinder	11
Abbildung 2:	Die Parameter des Vorsorgerasters entlang des Lebenszyklus	25
Abbildung 3:	Beispiel für die Systemgrenzen eines Produktsystems	39
Abbildung 4:	Tauchbad zum Aufbringen von pro.Glass Barrier 401 auf eine Glasscheibe	64
Abbildung 5:	Abhängigkeit des Transmissionsverhaltens von der Wellenlänge für unbeschichtetes und mit pro.Glass Barrier 401 beschichtetes Glas; Messwerte aufgenommen im Lab-Farbraum, L*: Luminanz, a*,b*: Farbkoordinaten	65
Abbildung 6:	Eigenfärbung des beschichteten Glases im Vergleich zu unbeschichtetem Glas und Wettbewerbern	65
Abbildung 7:	SWOT-Matrix mit den Ergebnissen der Schlüsselindikatoren für das Fallbeispiel „pro.Glass Barrier 401“	67
Abbildung 8:	Crystal Speed Hardening (CSH)	78
Abbildung 9:	Betonaushärtung ohne Zugabe von X-SEED	79
Abbildung 10:	Kristallisationskeime bei der Betonaushärtung mit Zugabe von X-SEED	79
Abbildung 11:	SWOT-Matrix mit den Ergebnissen der Schlüsselindikatoren für das Fallbeispiel „X-SEED“ (Material-Szenario)	81
Abbildung 12:	SWOT-Matrix mit den Ergebnissen der Schlüsselindikatoren für das Fallbeispiel „X-SEED“ (Energie-Szenario)	82
Abbildung 13:	Einbettung des Nano-NachhaltigkeitsChecks in die bereits vorhandenen Instrumente der Nachhaltigkeitsanalyse	94

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	2X2-Matrix zur Ableitung von strategischen Implikationen	15
Tabelle 2:	Beispiel einer SWOT-Matrix für das Management von ökologischen Problemstellungen	16
Tabelle 3:	Ergebnisse der SWOT Analyse des Runni-Centre	17
Tabelle 4:	Beispielhafte SWOT-Matrix mit der Zuordnung der Schlüsselindikatoren zu den Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken.	42
Tabelle 5:	Direktansprache von Unternehmen im Rahmen der Interessensanalyse	61



## 1 Zusammenfassung

Im Rahmen der aktuellen Debatte um die Chancen und Risiken nanotechnologischer Anwendungen werden die möglichen Beiträge zu einer nachhaltigen Entwicklung zunehmend kontrovers diskutiert. Eine Versachlichung der Debatte ist nötig. Sie kann jedoch nur auf Grundlage fallspezifischer, am gesamten Lebenszyklus ausgerichteter und möglichst quantitativer Chancen-Risiko-Abwägungen erfolgen. Die methodischen Grundlagen für eine solche systemische Betrachtung fehlen jedoch bislang weitgehend.

Vor diesem Hintergrund stellt das Öko-Institut mit dem Nano-NachhaltigkeitsCheck ein Instrument vor, das ein systematisches Raster zur integrierten Betrachtung der Nachhaltigkeitsaspekte von nanotechnologischen Anwendungen bietet. Aufgrund der gewählten Herangehensweise eignet sich der Nano-NachhaltigkeitsCheck als strategisches Radar für eine interne Abschätzung der Chancen und Risiken, um beispielsweise einerseits Umweltentlastungseffekte und neue Märkte identifizieren zu können, andererseits Fehlinvestitionen sowie Gefahren für die Gesellschaft möglichst zu vermeiden.

Unternehmen, die nanotechnologische Produkte und Anwendungen entwickeln oder herstellen, können mit dem Nano-NachhaltigkeitsCheck eigenes unternehmerisches Handeln selbst evaluieren.

Ziel des Nano-NachhaltigkeitsChecks ist es, Produkte und Anwendungen mit Nanomaterialien auf ihren konkreten Nutzen unter Nachhaltigkeitsaspekten zu überprüfen. Im Zentrum steht ein Analyseraster, mit dem Nanoprodukte (das heißt Produkte, die mit Nanomaterialien erzeugt werden) im Vergleich zu einem bereits existierenden Referenzprodukt ohne Einsatz von Nanomaterialien analysiert werden können. Darüber hinaus ist das Analyseraster auch in der Lage, etwaige Risiken zu adressieren.

Methodisch basiert der Nano-NachhaltigkeitsCheck auf PROSA (Product Sustainability Assessment), einem am Öko-Institut entwickelten Tool zur strategischen Analyse und Bewertung von Produktportfolios, Produkten und Dienstleistungen. PROSA berücksichtigt den kompletten Lebenszyklus und analysiert und bewertet die ökologischen, ökonomischen und sozialen Chancen und Risiken zukünftiger Entwicklungspfade. Mit der zu Grunde gelegten integrierten Sichtweise hilft PROSA, System-Innovationen und Handlungsoptionen in Richtung einer nachhaltigen Entwicklung zu identifizieren, und strukturiert die hierfür erforderlichen Entscheidungsprozesse.

Die beim Nano-NachhaltigkeitsCheck betrachteten Aspekte werden in Form von insgesamt 14 Schlüsselindikatoren abgebildet. Im Zentrum stehen dabei Gesichtspunkte des Umwelt- und Klimaschutzes, die soweit wie möglich quantitativ betrachtet werden. Darüber hinaus werden auch Fragen aus dem Bereich Arbeits- und Gesundheitsschutz, Nutzenaspekte sowie sozio-ökonomische Aspekte untersucht. Aufgrund der Komplexität der Fragestellungen ist bei diesen Gesichtspunkten oftmals nur eine qualitative Betrachtung möglich.

Durch konkret formulierte Kriterien und Leitfragen wird jedoch auch hier die qualitative Betrachtungsweise in eine semi-quantitative, vergleichende Gegenüberstellung zwischen Nano- und Referenzprodukt überführt.

Die Ergebnisse der einzelnen Schlüsselindikatoren werden in einer einheitlichen Darstellung zusammengefasst. Dazu wird die ursprünglich aus der Betriebswirtschaft stammende „SWOT-Analyse“ aufgegriffen und für die Zwecke des Nano-NachhaltigkeitsChecks angepasst. Das etablierte Werkzeug des strategischen Managements verbindet eine nach innen gerichtete Stärken- / Schwächen-Analyse mit einer auf Umfeldfaktoren bezogene Chancen- / Risiken-Analyse.

Beim Nano-NachhaltigkeitsCheck bezieht sich die Stärken- / Schwächen-Analyse auf die intrinsischen Eigenschaften und Potenziale des Produkts, zum Beispiel in Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, Gebrauchsnutzen und Lebenszykluskosten. Ergänzend dazu berücksichtigt die Chancen- / Risiken-Analyse externe Rahmenbedingungen wie Beschäftigungswirkung, gesellschaftlichen Nutzen und Risikowahrnehmung. Jeder einzelne Schlüsselindikator wird jeweils einer dieser beiden Ebenen im Vergleich zwischen Nano- und Referenzprodukt zugeordnet. Schneidet beispielsweise das Nanoprodukt beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im Vergleich zum Referenzprodukt besser ab, handelt es sich bei diesem Schlüsselindikator um eine Stärke. Fällt hingegen die Beschäftigungswirkung geringer aus als beim Referenzprodukt, liegt bei diesem Schlüsselindikator ein Risiko vor. Liegt der Indikator bei beiden Produkten gleichauf, wird dieser als indifferent gewertet und separat ausgewiesen. Auf diese Weise entsteht eine „SWOT-Matrix“ als zentrales Instrument der Ergebniskommunikation. Eine weitergehende Aggregation der Ergebnisse, zum Beispiel zu einer Ein-Punkt-Bewertung, findet nicht statt, da dies mit einem zu hohen Informationsverlust verbunden wäre.

Auf der Grundlage der SWOT-Matrix können schließlich Empfehlungen zur strategischen Optimierung der untersuchten Anwendung erarbeitet werden. Ziel dabei ist es, die positiven Nachhaltigkeitspotenziale der Stärken und Chancen zu maximieren und gleichzeitig mögliche negative Effekte aus Schwächen und Risiken zu minimieren.

In dem vorliegenden Bericht werden neben der Beschreibung der methodischen Vorgehensweise auch die Ergebnisse zweier Fallbeispiele vorgestellt, bei denen in einer Pilotuntersuchung der Nano-NachhaltigkeitsCheck erstmalig angewendet wurde. Dabei handelt es sich um eine Oberflächenbeschichtung für Glas mit hoher UV-Schutzwirkung (pro.Glass® Barrier 401 der Firma Nanogate Industrial Solutions GmbH) sowie einen Betonbeschleuniger (X-SEED® der Firma BASF SE).

Im Rahmen der Fallbeispiele konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe des Nano-NachhaltigkeitsChecks eine differenzierte Betrachtung der Nachhaltigkeitsaspekte eines Nano- im Vergleich zu einem Referenzprodukt möglich ist. Obwohl es sich in beiden Fällen um Produkte handelt, die sich noch in der Phase der Markteinführung befinden, konnten für die Schlüsselindikatoren die erforderlichen Daten ermittelt werden. Die Fallbeispiele zeigen auch, dass derzeit Nanoprodukte mit signifikanten Hebelwirkungen beim CO<sub>2</sub>-Einspar-

potenzial entwickelt werden. Sowohl für Großunternehmen wie BASF als auch für kleinere und mittlere Unternehmen wie Nanogate steht damit ein Instrument zur Verfügung, mit dem entwicklungsbegleitend die vorhandenen Potenziale nanotechnologischer Anwendungen beziffert und systematisch erschlossen werden können. Darüber hinaus können frühzeitig noch bestehende Wissenslücken und gegebenenfalls vorhandene Risiken erkannt sowie geeignete Lösungsstrategien entwickelt werden.

Was der Nano-NachhaltigkeitsCheck allerdings grundsätzlich nicht leisten kann, ist eine abschließende Nachhaltigkeitsbewertung von Nanoprodukten. Hierfür fehlt dem Instrument insbesondere die vollständige Bewertung der human- und ökotoxikologischen Risiken in Hinblick auf Exposition und Gefährdungspotenzial, für die klassische wissenschaftliche Methoden existieren.

Dennoch bietet der Nano-NachhaltigkeitsCheck den Anwendern die Funktion eines Frühwarnsystems und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Richtungssicherheit im Innovationsprozess von Nanoprodukten.

## **2 Executive Summary**

As part of the current debate on the opportunities and risks of nanotechnological applications, the debate on possible contributions to sustainable development is becoming increasingly controversial. It should rather be conducted on a more objective level. This objectification, however, can only be achieved on a case-specific basis, performing – as quantitatively as possible – a risk-and-benefit assessment targeted towards the total life cycle. The methodological basis for such a systemic view, however, is still largely lacking.

Against this background, the Öko-Institut, with the Nano Sustainability Check, provides an instrument offering a systematic grid for an integrated approach relative to sustainability aspects of nanotechnological applications. The approach chosen allows the Nano Sustainability Check to serve as a strategic radar system for an internal estimation of opportunities and risks, in order to be able, for example, to anticipate beneficial effects for the environment and to identify new markets on the one hand, and on the other to strive to avoid bad investments and dangers to the society.

With the help of the Nano Sustainability Check, companies that develop or produce nanotechnological products and applications can carry out themselves an evaluation of their own business activities.

The aim of the Nano Sustainability Check is to examine the sustainability of products and applications containing nano-materials in terms of their practical advantages. The most important feature in this context is an evaluation grid by means of which nano-products (i.e. products that are produced with nano-materials) can be analyzed by comparison with an existing reference product that has been manufactured without the use of nano-materials. In addition, the evaluation grid is able to address any possible risks.

In terms of methodology, the Nano Sustainability Check is based on PROSA (Product Sustainability Assessment), a tool for strategic analysis and assessment of product portfolios, products and services which has been developed by the Öko-Institut. PROSA takes into account the entire life cycle and analyzes and assesses the environmental, economic and social opportunities and risks of future development paths. With its underlying integrated view, PROSA helps to identify system innovations and options for action in line with a sustainable development and structures the decision-making processes necessary to this end.

The aspects investigated within the Nano Sustainability Check are represented in the form of a total of 14 key performance indicators. The focus is on aspects of environmental and climate protection, which are – as far as possible – considered from a quantitative point of view. In addition, questions relating to the fields of occupational safety and health are examined, as well as benefit and socio-economic aspects. Due to the complexity of the issue, in many cases only a qualitative assessment is possible with view to these aspects. Even in such cases, however, the use of specifically formulated criteria and key questions enables a transformation of the qualitative approach into a semi-quantitative, comparative assessment between nano and reference products.

The results of the individual key performance indicators are combined into a single representation. To this purpose, the "SWOT analysis" originally derived from business administration is taken up and adapted for the purposes of the Nano Sustainability Check. The established tool of strategic management combines an inward-looking strength / weakness analysis with an opportunity / threats analysis which is related to environmental factors.

In the framework of the Nano Sustainability Check, the strength / weakness analysis refers to the intrinsic properties and potentials of the product, for example in terms of CO<sub>2</sub> footprint, usability and life cycle costs. Complementarily, the opportunity / threat analysis takes into account external conditions such as impact on employment, social benefits and risk perception. When comparing nano and reference product, each individual key indicator is assigned to one of these two levels. If, for example, the nano-product as compared to the reference product performs better in terms of the CO<sub>2</sub> footprint, this key performance indicator may be regarded as a strength. If, however, the employment effect is lower than that of the reference product, there is a threat in this key performance indicator. If the indicator is on par with both products, it is regarded to be indifferent and is reported separately. In this way, a "SWOT matrix" is created as a central tool in the communication of results. A more extensive aggregation of the results, as through a one-point assessment, will not take place, as this would involve an excessive loss of information.

Based on the SWOT matrix, recommendations for a strategic optimization of the investigated application can finally be developed. Their goal is to maximize the positive potential of

strengths and opportunities with regard to sustainability while minimizing potential negative effects of weaknesses and risks.

Besides the description of the methodical approach, this report contains the results of two case studies in which the Nano Sustainability Check was first applied as part of a pilot survey. These cases concerned a surface coating of glass with high UV protection (pro.Glass® Barrier 401 by Nanogate Industrial Solutions GmbH) and a concrete catalyst (X-SEED® by BASF SE).

Based on these case studies, it could be shown that the Nano Sustainability Check allows for a differentiated consideration of sustainability aspects when comparing a nano-product to a reference product. Although in both cases the products under consideration were still in the phase of market introduction, the data required for the key indicators could be determined. The case studies also show that nano-products with significant leverage effects in the CO<sub>2</sub> savings potential are currently under development. Both large companies such as BASF as well as small and medium businesses like Nanogate are thus provided with a development-accompanying tool that enables them to quantify and systematically harness the existing potentials of nanotechnological applications. Moreover, knowledge gaps that still exist and possible risks can be identified at an early stage. This can help to develop appropriate problem solving strategies.

A final sustainability assessment of nanoproducts, however, is something the Nano-Sustainability Check basically cannot provide. To this purpose, the instrument particularly lacks the comprehensive assessment of human and ecotoxicological risks in view of exposition and hazard potential, for which there are traditional scientific methods.

Nevertheless, the Nano Sustainability Check offers users the facility of an early warning system and thus provides an important indication as to what direction should be taken in the innovation process of nano-products.

### 3 Einführung

Die Nanotechnologien wecken als Zukunftstechnologien große Hoffnungen. So gelten Nanomaterialien in vielen industriellen Anwendungsfeldern als Schlüssel für innovative Produktentwicklungen. Mit der gezielten Erzeugung solcher Materialien können zum Teil völlig neue Funktionalitäten und Eigenschaften generiert und zur Entwicklung neuer Werkstoffe, industrieller Halbzeuge und Produkte genutzt werden. Die dadurch ermöglichten Anwendungen versprechen Chancen in Hinblick auf neue Absatzmärkte, auf medizinischen Fortschritt sowie auf die Schonung von Umwelt und Ressourcen.

Bei Betrachtung der derzeit auf dem Markt befindlichen Produkte fällt das Bild allerdings deutlich nüchterner aus. Prominente Anwendungsbeispiele, die in der Öffentlichkeit häufig diskutiert werden, sind Sonnenschutzcremes mit nanoskaligem Titandioxid, Rieselhilfsmittel für Streuwürze oder mit antibakteriell wirkendem Nanosilber ausgerüstete Textilien.

Andererseits bestehen neben den genannten Applikationen weitere mögliche Anwendungsbereiche beziehungsweise Entwicklungsrichtungen der Nanotechnologien, bei denen tatsächlich erhebliche Lösungsbeiträge für die in den industrialisierten Ländern gesetzten Klimaschutzziele<sup>1</sup> erwartet werden können. Dazu gehören in erster Linie Anwendungen in den Bereichen regenerative Energiebereitstellung, Wärmedämmung, Stromspeicher, neue Werk- und Baustoffe und industrielle Produktionsprozesse. Bei all diesen Technologiebereichen existieren bereits erste vielversprechende Anwendungen beziehungsweise Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen. So existieren bei der regenerativen Energiebereitstellung durch Photovoltaik drei verschiedene Ansätze, mit denen die spezifischen Kosten dieser Technologie erheblich gesenkt und damit ihre Konkurrenzfähigkeit deutlich verbessert werden könnten. Im Einzelnen handelt es sich dabei um Nanokristalle aus Kupfer, Indium, Gallium und Selen („CIGS“), die eine Herstellung der Solarmodule in einem besonders effizienten Druckverfahren „Rolle zu Rolle“ ermöglichen. Daneben werden Zellen aus polymeren Halbleitern entwickelt, bei denen der Elektronentransport mittels Fullerenen erfolgt. Als dritter Ansatz sind die so genannten „Grätzel-Zellen“ zu nennen. Dabei handelt es sich um Farbstoffmoleküle auf Ruthen-Basis, welche die Elektronen an Titandioxid-Nanopartikel abgeben. Nur durch den Einsatz von Nanomaterialien kann bei diesen drei Entwicklungsrichtungen die Funktionalität sowie die für die Kostenreduktion erforderliche Senkung des Ressourcenverbrauchs erreicht werden. Im Bereich der Wärmedämmung sind mit den Aerogelen bereits hocheffiziente nanoporöse

---

<sup>1</sup> Laut der Studie „Modell Deutschland“, die Prognos AG, Öko-Institut und Dr. Hans-Joachim Ziesing im Auftrag vom WWF erstellt hat, müssen weltweit die anthropogenen Treibhausemissionen drastisch reduziert werden, um die Klimaerwärmung auf einem Wert von unter 2°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Für Deutschland seien daher zum Beispiel Minderungen um 95 Prozent bis zum Jahr 2050 erforderlich, was umgerechnet weniger als einer Tonne Treibhausgasemissionen pro Kopf bedeuten würde. 60% dieser Einsparungen müssen durch technologische Innovationen erfolgen, vgl.

<http://www.oeko.de/aktuelles/dok/982.php>

Dämmmaterialien erhältlich, die nachträglich eingebaut werden und damit insbesondere die Altbausanierung erleichtern können. Darüber hinaus wird für die Wärmedämmung von Fenstern an transluzenten (das heißt lichtdurchlässigen) Elementen geforscht, die je nach Sonneneinstrahlung eine wärmedämmende oder eine stromproduzierende Funktion haben. Darüber hinaus wird auf Lithium-Ionen-Akkus hingewiesen, die als nanotechnologische Energiespeicher für regenerativ erzeugten Strom diskutiert werden. Schließlich können Gasmembranen aus neuen Werkstoffen mit Carbon Nanotubes einen wertvollen Beitrag für eine effiziente Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Industrieprozessen (zum Beispiel bei der Stahlgewinnung) leisten.

Wie aufgezeigt wurde, ist das gegenwärtige und insbesondere das zukünftige Anwendungsspektrum von Nanomaterialien sehr vielseitig, doch wie bei jeder neuen Technologie sind auch deren mögliche Risiken und unerwünschte Nebenwirkungen in Betracht zu ziehen und gegenüber den Nutzenpotenzialen abzuwägen. Aufgrund ihrer Kleinheit können Nanopartikel biologische Barrieren wie Zellmembrane durchdringen, die für größere Objekte nicht passierbar sind. Es gibt Anhaltspunkte dafür, dass diese besonderen Eigenschaften von Nanomaterialien auf der einen Seite die Basis für eine Vielzahl technologischer Innovationen und damit auch für Umweltentlastungspotenziale sind, auf der anderen Seite auch Gefährdungspotenziale für Mensch und Umwelt beinhalten können, falls sie unkontrolliert in den menschlichen Körper oder in die Umwelt gelangen. Anhand von Tierversuchen konnte gezeigt werden, dass bestimmte Nanomaterialien über ein relevantes toxikologisches Gefährdungspotenzial verfügen. Zu nennen sind hier vor allem Erbgutschädigungen, Organschäden und Entzündungen, die möglicherweise zu Tumoren führen. Besonders bedenklich für den Menschen gelten freie Nanopartikel, die nicht fest in eine Matrix eingebunden sind und daher inhalativ aufgenommen werden können. Darüber hinaus sind beispielsweise nanoskaliges Titandioxid und Zinkoxid ökotoxikologisch relevant, da sich diese Stoffe im Test für Wasserflöhe als schädlich erwiesen haben. Darüber hinaus kann durch den zunehmenden Einsatz von Nano-Silber nicht ausgeschlossen werden, dass nützliche Bakterien in der Umwelt geschädigt werden.

Die ökologischen und ökonomischen Potenziale einerseits und die noch ungeklärten Fragen zu den Risiken andererseits bilden ein Spannungsverhältnis. So sind insbesondere zahlreiche Fragen hinsichtlich der human- und vor allem ökotoxikologischen Wirkung von Nanomaterialien noch offen und müssen dringend geklärt werden. Nach dem Vorsorgegrundsatz ist dabei der gesamte Lebenszyklus von Nanomaterialien auf mögliche Risiken für Mensch und Umwelt zu untersuchen. Das umfasst auch den Verbleib und eine mögliche Freisetzung von Nanopartikeln am Ende des Lebensweges, wie etwa bei Recycling und Entsorgung. Gleichzeitig drängen jedoch immer mehr neue nanotechnologische Produkte und Anwendungen auf den Markt. In der Praxis ist die Klärung der offenen risikobezogenen Fragestellungen allerdings meist mit einem erheblichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden, da diese auf einer soliden, wissenschaftlich fundierten

Grundlage erörtert werden müssen. Aus diesem Grund „hinkt“ derzeit die Sicherheitsforschung im Bereich der Nanotechnologien systematisch der Produktentwicklung hinterher. Neben dem Schließen der noch vorhandenen Wissenslücken bei der Sicherheitsforschung wird es aber auch darauf ankommen zu bewerten, welchen Beitrag die vorhandenen Innovationspotenziale der einzelnen nanotechnologischen Anwendungen zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten können. Allerdings existieren bislang nur sehr wenige Fallbeispiele und vergleichende Abwägungen hierzu.

Vor diesem Hintergrund kommt einer entwicklungsbegleitenden Betrachtung der relevanten risikobezogenen Fragestellungen, aber auch der vermuteten Chancen in Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung eine wichtige Rolle zu. Eine integrierte Chancen-Risiko-Abwägung während des Forschungs- und Entwicklungsprozesses von Nanoprodukten kann eine ausführliche Bewertung insbesondere der Risikoaspekte im Rahmen der Sicherheitsforschung nicht ersetzen. Allerdings können durch eine frühzeitige Betrachtung der Nachhaltigkeitsaspekte für die Entwickler wertvolle Hinweise bereitgestellt werden, welchen Beitrag die vorhandenen Innovationspotenziale der jeweiligen nanotechnologischen Anwendungen zu einer nachhaltigen Entwicklung tatsächlich leisten können. Darüber hinaus sollte auch überprüft werden, unter welchen Randbedingungen sich die erwarteten beziehungsweise vermuteten Stärken in der Praxis realisieren lassen und welche Risiken und Reboundeffekte möglicherweise bestehen. Die Erfahrungen des Öko-Instituts zeigen, dass Innovationen vor allem dann erfolgreich etabliert werden können, wenn diese strategische Technologiebewertung am konkreten Produkt und entwicklungsbegleitend erfolgt und dabei alle relevanten Akteure zusammenwirken. So lassen sich Entscheidungsspielräume im politischen und gesellschaftlichen Umfeld besonders effektiv nutzen. Allerdings fehlen bislang entsprechende Handlungsanleitungen und einheitliche, auf die Spezifika von nanotechnologischen Produkten und Anwendungen zugeschnittene Indikatoren, die eine möglichst weitgehende quantitative Betrachtungsweise erlauben.

## **4 Zielstellung**

Ziel des Projekts ist es, ein Instrument zu entwickeln, mit dem nach einheitlichen Kriterien die Nachhaltigkeitsaspekte von nanotechnologischen Produkten und Anwendungen überprüft werden können. Dabei sollen Aspekte des Umwelt- und Klimaschutzes im Vordergrund stehen, die so weit wie möglich quantitativ betrachtet werden. Im Zentrum des Vorhabens steht daher die Entwicklung eines Analyserasters zur Betrachtung von nanotechnologischen Produkten und Anwendungen im Vergleich zu einem nicht-nanotechnologischen Referenzprodukt unter Berücksichtigung des gesamten Lebensweges. Neben dem Nutzen für den Umwelt- und Klimaschutz sowie die Chancenwahrnehmung unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten soll das Analyseraster auch in der Lage sein, gegebenenfalls vorhandene Risiken adäquat abzubilden. Die dabei verwendeten Kriterien werden in Form von einheitlichen Schlüsselindikatoren handhabbar gemacht, die sowohl

quantitativ (zum Beispiel Einsparung CO<sub>2</sub>-Äquivalente) oder im Falle von anderen Nutzenaspekten (zum Beispiel Gebrauchsnutzen, symbolischer Nutzen, gesellschaftlicher Nutzen) auch semi-quantitativ oder auch verbal-argumentativ sein können.

In diesem Zusammenhang wird die ursprünglich aus der Betriebswirtschaft stammende „SWOT-Analyse“ aufgegriffen und entsprechend adaptiert. Dabei handelt es sich um ein Werkzeug des strategischen Managements, bei dem sowohl innerbetriebliche Stärken und Schwächen als auch externe Chancen und Risiken betrachtet werden.

Die Auswertung der einzelnen Schlüsselindikatoren mündet in eine integrierte Gesamtbetrachtung, auf deren Grundlage schließlich Empfehlungen zur strategischen Optimierung der konkreten Anwendung erarbeitet werden. Dabei beziehen sich die Empfehlungen sowohl auf die Stärken und Schwächen als auch auf die Chancen und Risiken. Ziel dabei ist es, die positiven Nachhaltigkeitspotenziale der Stärken und Chancen zu maximieren, und gleichzeitig die möglichen Rebound-Effekte aus Schwächen und Risiken zu minimieren.

Um das entwickelte Analyseraster auf seine Praktikabilität zu überprüfen, soll dieses im Rahmen des Projektes bei ausgewählten Fallbeispielen und unter Verwendung von konkreten Daten angewendet werden. Dabei soll insbesondere auch überprüft werden, ob das Instrument bei kleineren und mittelständigen Unternehmen (KMU) einsetzbar ist. Die Verantwortung für die Datenerfassung liegt bei den jeweiligen Unternehmen. Das Öko-Institut bietet allerdings unter notwendiger Wahrung von Betriebsgeheimnissen methodische Hilfestellung an.

Die Ergebnisse des Vorhabens richten sich folglich in erster Linie an Unternehmen, die im Rahmen der Entwicklung und Vermarktung von Nanoprodukten den Nano-Nachhaltigkeits-Check als **Selbstevaluierungsinstrument** zur Überprüfung von Nanoprodukten auf ihren konkreten Nutzen für eine Nachhaltige Entwicklung („Nachhaltigkeitsradar“) verwenden können.

Weiterhin richtet sich das Vorhaben auch an Ministerien und Behörden, da das Analyseraster selbst sowie die Ergebnisse aus der Betrachtung von Fallbeispielen bei staatlichen Förderstellen gegebenenfalls auch zur Fokussierung und Neuausrichtung von Fördermitteln oder zu einer Anpassung des Rechtsrahmens herangezogen werden können.

Zielgruppe des Projekts sind aber nicht zuletzt auch Umwelt- und Verbraucherschutzverbände sowie die allgemeine Öffentlichkeit, die sich zunehmend für die Quantifizierung der Chancen und Risiken von nanotechnischen Anwendungen und Produkten interessiert.

## 5 Vorarbeiten und methodische Anknüpfungspunkte

Im folgenden Kapitel soll ein Überblick über relevante Vorarbeiten und methodische Ansätze gegeben werden, die bei der Bearbeitung des Projektes aufgegriffen und weiterentwickelt wurden, um die oben genannten Zielsetzungen zu erreichen. Im Vordergrund stehen dabei die PROSA-Methode des Öko-Instituts (siehe Kapitel 5.1), die SWOT-Analyse (siehe Kapitel 5.2) sowie der Kriterienkatalog der Themengruppe 2 des NanoDialogs (siehe Kapitel 5.2). Darüber hinaus werden in Kapitel 5.4 noch drei weitere Anknüpfungspunkte überblicksartig vorgestellt.

### 5.1 PROSA

PROSA (Product Sustainability Assessment) ist eine vom Öko-Institut e.V. entwickelte Methode zur strategischen Analyse und Bewertung der Nachhaltigkeitspotenziale von Produktportfolios, Produkten und Dienstleistungen (vergleiche Griebhammer et al. 2007, [www.prosa.org](http://www.prosa.org)). Besondere Schwerpunkte liegen dabei gegenüber der klassischen Ökobilanz auf der gleichzeitigen Analyse sozialer und ökonomischer Aspekte sowie auf dem Einbezug von Nutzenaspekten und Konsumforschung.

Das Ziel ist die Identifizierung von System-Innovationen und Handlungsoptionen in Richtung einer nachhaltigen Entwicklung. PROSA strukturiert die hierfür erforderlichen Entscheidungsprozesse und reduziert dabei die vorhandene Komplexität auf das Wesentliche.

PROSA berücksichtigt den kompletten Lebenszyklus und analysiert und bewertet die ökologischen, ökonomischen und sozialen Chancen und Risiken zukünftiger Entwicklungspfade. Dabei wird so weit wie möglich auf bereits etablierte Einzel-Tools zurückgegriffen (Megatrend-Analyse, Ökobilanz, Lebenszykluskostenrechnung, Sozialbilanz et cetera).

Aufgrund der offenen Struktur von PROSA können auch Nachhaltigkeitsanalysen für Technologien durchgeführt werden. Hinzu kommt, dass im Gegensatz zu Ökobilanzen und Lebenszykluskostenrechnungen bei PROSA der Nutzen deutlich intensiver analysiert wird, weil er letztlich über die Akzeptanz bei den Konsumenten entscheidet und weil eine Bewertung bei höheren ökologischen oder sozialen Risiken produktpolitisch begründet und verantwortet werden muss (vergleiche auch die sozioökonomische Nutzenanalyse bei REACH oder der Öko-Design-Richtlinie der EU).

Vor diesem Hintergrund eignet sich der PROSA-Ansatz insbesondere auch für die Entwicklung einer vergleichenden Untersuchung der nanotechnischen Produkte und Anwendungen, deren Beiträge zu einer nachhaltigen Entwicklung in der aktuellen Debatte in zunehmendem Maße diskutiert werden (vergleiche BMU-NanoDialog). Hierfür ist eine systematisch angelegte integrierte Chancen-Risiko-Abwägung erforderlich, für die bis dato jedoch noch keine einheitliche Methode zur Verfügung steht.

PROSA dient als eine methodische Grundlage für den Nano-NachhaltigkeitsCheck, der für das Management als strategisches Radar für Chancen und Risiken wirken soll, um

Zukunftsmärkte und neue Konsumentenbedürfnisse zu identifizieren, Fehlinvestitionen möglichst zu vermeiden und die mit der Entwicklung und Einführung der Nanotechnologien verbundenen Chancen auch realisieren zu können.

Der zeitliche Ablauf von PROSA orientiert sich an den typischen Phasen von Strategiefindungsprozessen und wird mit dem so genannten Pfadfinder strukturiert (vgl. Abbildung 1).

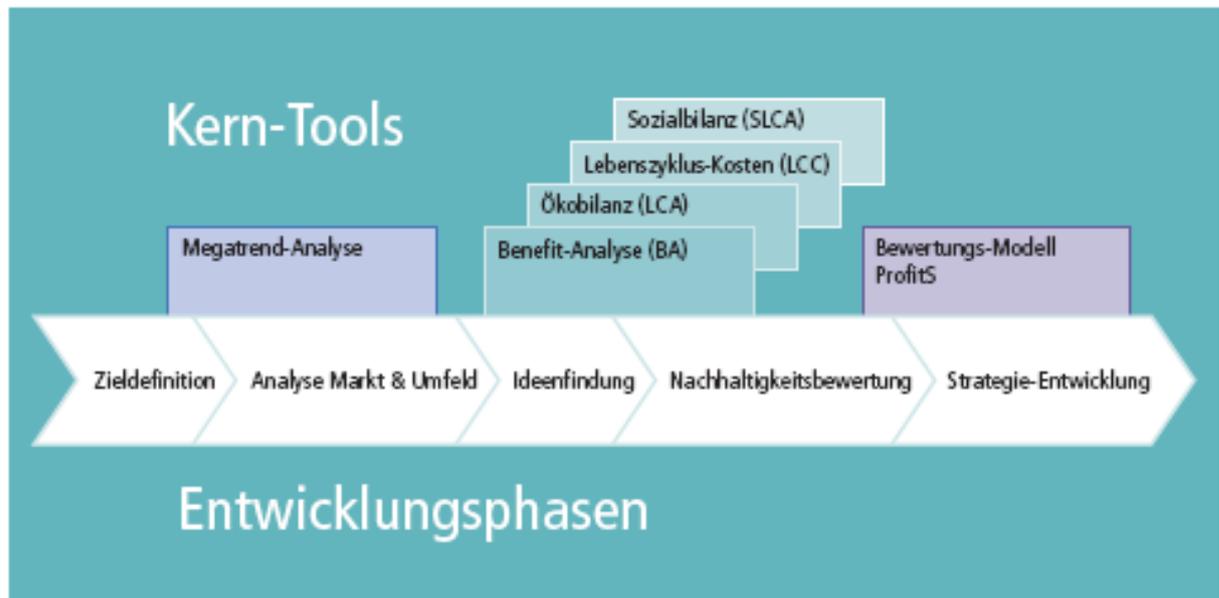


Abbildung 1: PROSA-Pfadfinder (Grießhammer et al. 2007)

Der Pfadfinder beschreibt die idealtypische Durchführung von PROSA. Bei der Anwendung im Unternehmen können unternehmensspezifische Management-Tools, Checklisten oder Bewertungsmodelle ohne Weiteres übernommen werden. PROSA wird dabei prozessorientiert und iterativ durchgeführt – erste orientierende Analysen werden später vertieft, neue Ideen oder unerwartete Ergebnisse können zu einer Änderung beziehungsweise Überarbeitung der ersten Phasen führen.

Die wesentlichen Bestandteile von PROSA umfassen

- die Produktportfolio-Nachhaltigkeits-Analyse,
- die Lebenszykluskostenrechnung (LCC),
- die Ökobilanz (LCA),
- die Sozialbilanz (SLCA) und das Bewertungsmodell SocioGrade,
- die Benefit-Analyse (BA) und das Bewertungsmodell BeneGrade sowie
- das Gesamtbewertungsmodell ProfitS.

Dabei greift PROSA auf ein Set bereits etablierter Einzel-Tools zurück. Die Tools sind überwiegend gängige und ausgearbeitete Tools, die in den meisten großen Unternehmen und

der Produktpolitik üblicherweise eingesetzt werden, wie zum Beispiel Megatrendanalysen, Konsumforschung oder Ökobilanzen. Neu entwickelt wurden für PROSA die drei Kern-Tools Sozialbilanz, Benefit-Analyse (auf Basis der Konsumforschung) und das Bewertungsmodell ProfitS (Products-fit-to-Sustainability).

Im Rahmen des Nano-NachhaltigkeitsChecks sollen bereits ausgewählte Produkte einer Chancen-Risiko-Analyse unterzogen werden. Daher spielen insbesondere die Tools zur ökobilanziellen Analyse, zur Lebenszykluskostenrechnung, zur Sozialbilanz und zur Nutzenanalyse (BeneGrade) eine besondere Rolle.

Die Durchführung von Ökobilanzen ist in der ISO-Norm 14040 und 14044 detailliert beschrieben (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044). Die Grundstruktur der Ökobilanz mit ihren vier Phasen (Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachanalyse, Wirkungsabschätzung sowie Auswertung) und die grundsätzliche methodische Vorgehensweise bei der Ökobilanz werden bei den weiteren Kern-Tools Lebenszykluskostenrechnung und Sozialbilanz soweit möglich direkt, sonst sinngemäß übernommen. Mit der Lebenszykluskostenrechnung werden die relevanten Kosten ermittelt, die für ein Produkt und die betrachteten Alternativen entlang des Produktlebenszyklus für einen oder mehrere Akteure entstehen. Ein weiteres Kern-Tool innerhalb von PROSA ist die Sozialbilanz. Bei der Durchführung muss auf die Übereinstimmung der wesentlichen Festlegungen mit der Ökobilanz und der Lebenszykluskosten-Rechnung geachtet werden. Die sozialen Aspekte werden entlang der Produktlinie untersucht, in der Regel im Vergleich zu einer Alternative. Soweit möglich sollten dabei Stakeholder einbezogen werden. Mit der Benefit-Analyse wird schließlich der Nutzen von Produkten und Dienstleistungen analysiert und bewertet - aus Sicht der Nutzer oder - bei Bedarf - aus Sicht der Produktpolitik. Die Nutzer sind vor allem die privaten Haushalte beziehungsweise Konsumenten, können aber auch gewerbliche Nutzer, die öffentliche Verwaltung oder Großorganisationen wie etwa die Kirchen sein. Mit der Benefit-Analyse werden je nach Fragestellung der Gebrauchsnutzen, der symbolische Nutzen und der gesellschaftliche Nutzen analysiert.

Umfang und Tiefe der Analyse können bei den einzelnen Kern-Tools in PROSA zum Teil deutlich größer sein, als sich dies im Rahmen der angestrebten Selbstevaluierung von Unternehmen durch einen Nano-NachhaltigkeitsCheck realisieren lässt. Daher ist eine Anpassung der Prüf- und Bewertungstiefe erforderlich. Darüber hinaus sind die verschiedenen Tools auf die im Themenfeld „Nanotechnologien“ auftretenden besonderen Fragestellungen anzupassen.

## **5.2 SWOT-Analyse**

Bei der SWOT-Analyse handelt es sich um ein formalisiertes Instrument der strategischen Planung, um innerbetriebliche Stärken und Schwächen als auch externe Chancen und Risiken in Projekten oder Geschäftsprozessen bewerten zu können. SWOT ist ein englisches Akronym und steht für „Strengths“ (Stärken), „Weaknesses“ (Schwächen),

„Opportunities“ (Chancen) und „Threats“ (Gefahren). In Deutschland wird die SWOT-Analyse übersetzt mit „Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken“.

Die Wurzeln der SWOT-Analyse reichen bis ins fünfte Jahrhundert vor Christus zurück. Bereits zu dieser Zeit wurden in China die Prinzipien einer Analyse, die sich sowohl auf intrinsische als auch auf Umfeldfaktoren stützt, im Rahmen von militärstrategischen Planungen propagiert (Grant 2000). Der Ursprung eines zeitgenössischen Instruments zur strategischen Planung in Unternehmen liegt in den sechziger und siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Einige Quellen erwähnen in diesem Zusammenhang ein Forschungsprojekt, welches in dieser Zeit an der Stanford Universität von Albert Humphrey durchgeführt wurde, um unternehmerische Planungsfehler zu identifizieren (Morrison 2011). Humphrey prägte den Begriff der „SOFT Analysis“ (englisches Akronym für „satisfactory“, „opportunity“, „fault“ und „threat“), der 1964 von Urick und Orr aufgegriffen wurde und in die bis heute verwendete Abkürzung „SWOT“ überführt wurde. Darüber hinaus wurde das Konzept der SWOT-Analyse auch in Großbritannien eingeführt, wo es Anerkennung unter strategischen Planern und Managementberatern erhielt (Thakur 2010). Andere Quellen schreiben die neuzeitlichen Ursprünge der SWOT-Analyse hingegen der Harvard Business School zu (Kotler et al. 2010; Friesner 2011).

Aus methodischer Sicht handelt es sich bei der SWOT-Analyse um ein vergleichsweise einfaches Instrument, das keine umfangreichen technischen Fähigkeiten beziehungsweise aufwändige Einarbeitung benötigt. Allerdings ist ein umfassendes Verständnis über die Besonderheiten und den gegenwärtigen Zustand des Unternehmens sowie seines Umfeldes erforderlich. (Mehta 2000). Der Kerngedanke einer SWOT besteht darin, sich die eigenen Stärken und Schwächen zum Beispiel bei der Erreichung eines Unternehmensziels oder bei der Entwicklung eines Produkts bewusst zu machen und darüber hinaus auch das Umfeld sorgfältig auf vorhandene Chancen und Risiken<sup>2</sup> zu untersuchen. In diesem Zusammenhang bilden die Stärken das ab, was ein Akteur (beispielsweise ein Unternehmen) in Bezug auf Verfahrensabläufe oder bei der Produktentwicklung bereits gut gemacht hat, während die Schwächen sich auf weniger gut funktionierende Verfahrensabläufe oder Aspekte der Produktentwicklung beziehen. Die Chancen beinhalten alle potenziell günstigen Rahmenbedingungen für die untersuchten Abläufe. Zu erwartende Hindernisse und Engpässe werden hingegen im Rahmen der Risiken angesprochen.

Ausgehend von dieser Ist-Standsanalyse trifft dann das Unternehmen Entscheidungen, welche der identifizierten Stärken genutzt und welche Chancen realisiert werden sollen. Auf diese Weise bietet die SWOT-Analyse die Grundlage für die erfolgreiche Umsetzung eines Projekts oder eines Plans. Sie versetzt Entscheidungsträger in die Lage, Strategien zu ent-

---

<sup>2</sup> Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass unter Risiken in diesem Zusammenhang nicht das Produkt aus [Eintrittswahrscheinlichkeit](#) und Schadensausmaß (Definition bei den Ingenieur- und Umweltwissenschaften) verstanden wird, sondern es sich gemäß der wirtschaftswissenschaftlichen Sichtweise um Handlungsrisiken handelt, welche Auswirkungen auf das Erreichen von Zielen haben können.

wickeln, um gewünschte Ergebnisse effektiv und effizient zu erreichen. Dies setzt jedoch voraus, dass entsprechende Ziele beziehungsweise Endzustände definiert wurden.

Eine allgemeine Anleitung zur Durchführung einer SWOT-Analyse in einem Unternehmen existiert nicht, in der Praxis hat sich jedoch üblicherweise folgender Ansatz etabliert:

1. Definition eines eindeutigen Ziels beziehungsweise Endzustands;
2. Suche nach den Stärken und Schwächen im Rahmen einer nach innen gerichteten Unternehmensanalyse;
3. Suche nach den relevanten Chancen und Risiken im Rahmen einer nach außen gerichteten „Umweltanalyse“;<sup>3</sup>
4. Auswertung und Zusammenführung der Unternehmens- und Umweltanalyse, um den Nutzen aus Stärken und Chancen zu maximieren und die Verluste aus Schwächen und Risiken zu minimieren;
5. Betrachtung der Aspekte, welche die Erreichung der Ziele ermöglichen;
6. Planung der Strategie entsprechend der vorliegenden Ergebnisse.

Vor diesem Hintergrund ist es für eine erfolgreiche Anwendung der SWOT-Methode empfehlenswert, die Erkenntnisse in Form einer Matrix zusammenzufassen. Die Darstellung in einer Matrix kann auf verschiedene Weise und mit verschiedenen Zielsetzungen erfolgen.

Eine Möglichkeit zur Prioritätensetzung ist die von Wehrich (1982) vorgeschlagene 2X2-Matrix, welche die internen Stärken und Schwächen mit den externen Chancen und Risiken verknüpft, um daraus strategische Implikationen abzuleiten. Dabei können alle identifizierten Aspekte der vier Kategorien zusammengeführt und integriert betrachtet werden (vergleiche folgende Tabelle):

---

<sup>3</sup> Hierbei steht nicht die natürliche Umwelt im Mittelpunkt, sondern eher die sozio-ökonomische „Umwelt“ des Unternehmens im Vordergrund. Daher wird oftmals auch der Begriff „Umfeldanalyse“ verwendet.

Tabelle 1: 2X2-Matrix zur Ableitung von strategischen Implikationen (nach Wehrich 1982)

	<b>Interne Stärken</b> (Beibehalten, Ausbauen und wirksam einsetzen)	<b>Interne Schwächen</b> (Abhilfe oder Ausstieg)
<b>Interner Blickwinkel</b> (priorisieren und optimieren)	<b>Betrachtung der Stärken / Chancen-Kombination</b> Offensichtliche eigene Prioritäten	<b>Betrachtung der Schwächen / Chancen-Kombination</b> Potenziell lohnenswerte Optionen
<b>Externer Blickwinkel</b> (dagegenhalten)	<b>Betrachtung der Stärken / Risiken-Kombination</b> Einfach zu verteidigen und dagegenzuhalten	<b>Betrachtung der Schwächen / Risiken-Kombination</b> Potenziell hohe Risiken

Aus der Zusammenführung der Stärken und Chancen wird ersichtlich, wie die internen Stärken dazu beitragen können, um die Chancen zu realisieren. Die Kombination der Stärken und Risiken zeigt auf, wie unter Ausnutzung der Stärken externe Risiken vermieden beziehungsweise minimiert werden können. Die Schwächen-Chancen-Relation ermöglicht Hinweise zur Beseitigung interner Schwächen durch externe Chancen und die Gegenüberstellung der Schwächen und Risiken gibt Auskünfte darüber, welche Handlungen vermieden werden sollten.

Nachdem in den zurückliegenden Jahren gesellschaftliche Umweltschutzanforderungen zunehmend strategische Bedeutung für Unternehmen erlangt haben, müssen diese auch bei der Strategiebildung adäquat berücksichtigt werden. Meffert und Kirchgeorg (1998) schlagen daher vor, je nach „Exponiertheitsgrad“ der Unternehmens gegenüber Umweltaspekten die aus der Unternehmensanalyse abgeleiteten Stärken und Schwächen den Chancen und Risiken der ökologischen Problemstellungen gegenüberzustellen, um daraus strategische Entscheidungen für das Umweltmanagement ableiten zu können (siehe folgende Tabelle):

Tabelle 2: Beispiel einer SWOT-Matrix für das Management von ökologischen Problemstellungen (Meffert / Kirchgeorg1998)

	<b>Chancen</b>	<b>Risiken</b>
<b>Stärken</b>	Unternehmen ist im Gegensatz zur Konkurrenz in der Lage, sein technisches Know-how auf den Markt für Umweltschutzgüter zu übertragen. Ausweitung des Tätigkeitsbereichs.	Unternehmen begegnet der Einbeziehung ökologischer Kriterien in die Kaufentscheidung <sup>4</sup> durch das Angebot umweltfreundlicher Produkte.
<b>Schwächen</b>	Neue Umweltschutzgesetze bieten neue Absatzchancen. Fehlende Flexibilität des Managements verhindert rechtzeitigen Markteintritt.	Neue wissenschaftliche Erkenntnisse über negative ökologische Wirkungen des Produktprogrammes können wegen finanzieller Mittel nicht berücksichtigt werden.

Als Fallbeispiel für eine konkrete SWOT-Analyse soll die Einführung eines ökologischen Zertifizierungsschemas der Forstwirtschaft in Finnland vorgestellt werden. Dieses Fallbeispiel wurde ausgewählt, da es sich um eine interessante Anwendung der SWOT-Methode bei einer ökologischen Initiative handelt, die dazu beigetragen hat, eine Reihe von zum Teil widersprüchlichen Faktoren zu klären.

In den späten neunziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts prüfte die finnische Forstwirtschaft die Einführung von neuen Zertifizierungen und Öko-Labels, um ihre Akzeptanz und Wettbewerbsfähigkeit auf internationaler Ebene zu steigern (Kurttila et al 2000). Die zentrale Frage bestand darin, auf eine zertifizierte Forstwirtschaft umzustellen oder bei der herkömmlichen, mengenorientierten Wirtschaftsweise zu bleiben. Um diese Frage zu beantworten, wurden von externen Experten eine SWOT-Analyse durchgeführt und in Zusammenarbeit mit dem Forstwirtschaftsdirektor die Schlüsselfaktoren für die neue Strategieoption einer zertifizierten Forstwirtschaft zusammengetragen (siehe folgende Tabelle):

<sup>4</sup> Hierbei handelt es sich um die Kaufentscheidung der Verbraucher/innen.

Tabelle 3: Ergebnisse der SWOT Analyse des Runni Centre (nach Kurttila et al 2000)

<p><b>Stärken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorhandene Kompetenzen zur Entwicklung eines Zertifizierungssystems</li> <li>• Geringere Anhängigkeiten von Holzprodukten</li> <li>• Geringe "Ökokosten" durch die Zertifizierung (dank günstiger Forststrukturen)</li> </ul>	<p><b>Chancen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Veränderungen bei den Konsumgewohnheiten (steigende Nachfrage für zertifiziertes Holz)</li> <li>• Erzielen von Premiumpreisen für zertifiziertes Holz</li> <li>• Verbesserung der Biodiversität in der Umwelt</li> </ul>
<p><b>Schwächen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativ kleine Forstflächen verfügbar</li> <li>• Monotone Forste</li> <li>• Geringere Einnahmen aus Holzschnitt</li> </ul>	<p><b>Risiken</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verringerung der Profitabilität</li> <li>• Einschränkung der Nutzungsmöglichkeiten</li> <li>• Negatives Image im Falle einer Aufgabe des Zertifizierungssystems</li> </ul>

Aufgrund ihrer Einsetzbarkeit im Rahmen von Strategie- und Produktentwicklung eignet sich die SWOT-Analyse insbesondere auch für die Gegenüberstellung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken bei der unternehmensinternen Analyse der Nachhaltigkeit eigener nanotechnologischer Anwendungen. So lässt sich auf Basis einer SWOT-Betrachtung herausarbeiten, wo die Stärken eines Nanoprodukts liegen und wie mit diesen Stärken gegebenenfalls Lösungsansätze für gesellschaftliche Fragestellungen entwickelt werden können. Darüber wird auf fallspezifischer Ebene auf die möglicherweise vorhandenen internen Schwächen und externen Risiken eingegangen, die in einer integrierten Sichtweise gegenüber den Stärken und Chancen abgewogen werden können. In der Praxis besteht hier allerdings die Schwierigkeit darin, im Rahmen der Umfeldanalyse alle relevanten Chancen und Risiken zu identifizieren. Dies ist insbesondere dann nicht einfach, wenn die SWOT-Analyse relativ frühzeitig im Entwicklungsprozess eingesetzt wird und die Annahmen über die Nutzungs- und Nachgebrauchsphase noch mit einem erheblichen Unsicherheitsfaktor verbunden sind. Darüber hinaus sollte vermieden werden, Chancen aus der Umfeldanalyse mit intrinsischen Stärken zu verwechseln. Diese Gefahr besteht in erster Linie dann, wenn die betrachteten Produkte beziehungsweise Produktsysteme nicht hinreichend genau definiert sind und außerdem keine ausreichende Klarheit über die verwendeten Kriterien und Indikatoren besteht.

Bei Beachtung der genannten Schwierigkeiten und Herausforderungen wird die Methodik der SWOT-Analyse jedoch als ein geeigneter Ansatz erachtet, um im Sinne einer Selbst-evaluierung während des Entwicklungsprozesses eine Grundlage für die strategische Planung im Unternehmen sowie für Entscheidungen in Hinblick auf Detailfragestellungen (zum Beispiel bezüglich der Auswahl eines von mehreren geeigneten Nanomaterialien) zu schaffen. Als Darstellungsform bietet sich dabei die bei dem vorgestellten Fallbeispiel wiedergegebene SWOT-Matrix mit einer getrennten Erfassung und Gegenüberstellung von

Stärken und Schwächen sowie von Chancen und Risiken an (vergleiche Tabelle 3). Dadurch wird eine strukturierte und gleichzeitig transparente Darstellung von mehreren Indikatoren beziehungsweise Kriterien ermöglicht. Diese Basis bildet einen guten Ausgangspunkt, um in einem weiteren Schritt strategische Optimierungspotenziale anhand der Gegenüberstellung von Indikatoren in den Bereichen Stärken und Schwächen sowie von Chancen und Risiken zu ermitteln.

### **5.3 Kriterienkatalog der Themengruppe 2 des NanoDialogs 2009-2011**

In der ersten Phase des NanoDialogs der Bundesregierung (2006-2008) wurden verschiedene Nanoprodukte hinsichtlich ihrer Risiko- und Nutzenpotenziale beschrieben. Da ein Vergleich dieser Beschreibungen untereinander beziehungsweise eine Interpretation der Ergebnisse nur schwer möglich war, erhielt in der zweiten Dialogphase (2009-2011) die Themengruppe 2 den Arbeitsauftrag, „eine Methode zu erarbeiten, in der Nutzen- und Risikopotenziale von Nanoprodukten systematisch erfasst, transparent beschrieben und bewertet werden können. Das zu erarbeitende Bewertungsinstrument sollte von verschiedenen Anwendergruppen nutzbar sein und anhand von mindestens zwei Beispielen getestet werden.“ (BMU 2011)

Zentrales Ergebnis der Arbeiten des Stakeholderdiskurses<sup>5</sup> in der Themengruppe 2 war ein „Leitfaden zur Erhebung und Gegenüberstellung von Nutzen- und Risikoaspekten von Nanoprodukten“. Dieser Leitfaden soll vor allem dazu dienen, weitere fallspezifische Stakeholderdiskurse über mögliche Nutzen- und Risikopotenziale von Nanoprodukten zu strukturieren und eine erste Orientierung zu den Nutzen- und Risikoaspekten der betrachteten nanotechnologischen Anwendung zu geben. Diese werden jedoch nicht mit Bewertungsindikatoren gegeneinander abgewogen, da diese Bewertung weitergehenden Instrumenten (zum Beispiel Ökobilanzen, regulatorischen Risikobewertungen) vorbehalten bleiben soll, die im Anschluss an die Anwendung des Leitfadens herangezogen werden können. Die ursprüngliche Zielsetzung, eine indikatorbasierte methodische Vorgehensweise zur Bewertung der Nutzen- und Risikoaspekte zu erarbeiten, konnte damit nicht erreicht werden. Neben den methodischen Schwierigkeiten, objektive und allgemein anwendbare Bewertungen der Parameter zu entwickeln, spielten hierbei nicht zuletzt auch Zeit- und Ressourcengründe eine wichtige Rolle. Dennoch wurden für die Anwendung des Leitfadens von der Themengruppe 2 zwei interessante Hilfsmittel mit einem so genannten Produktsteckbrief und einem Kriterienkatalog entwickelt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

Der Produktsteckbrief dient dazu, das Endprodukt und das jeweils dabei eingesetzte Nanomaterial zu charakterisieren. Hierfür werden vom Hersteller vorhandene Informationen, zum

---

<sup>5</sup> Das Öko-Institut hat sich durch die Teilnahme von Herrn Martin Möller aktiv an den Arbeiten der Themengruppe beteiligt.

Beispiel aus dem Sicherheitsdatenblatt, zusammengestellt. Darüber hinaus wird in diesem Dokument auch das Referenzprodukt definiert, welches bezüglich der untersuchten Funktionalität keine Nanomaterialien enthält und das für die Analyse der Nutzen- und Risikoaspekte als Vergleichsobjekt herangezogen wird.<sup>6</sup>

Der erarbeitete Kriterienkatalog enthält Kriterien sowohl zu Nutzen- als auch zu Risikoaspekten. Beide Kriteriensets sind in die fünf Kategorien „Umwelt“, „Verbraucher“, „Arbeitnehmer“, „Gesellschaft“ und „Unternehmen“ untergliedert, wobei innerhalb jeder Kategorie bis zu sechs verschiedene Kriterien aufgeführt sind, die zum Teil durch weitere Unterkriterien erläutert werden. Dieses Dokument, das als Excel-Datei online verfügbar ist, erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern repräsentiert verschiedene, von den Stakeholdern in der Themengruppe 2 als relevant erachtete Aspekte.

Bei den Nutzenaspekten werden innerhalb der fünf Kategorien so genannte Kernkriterien besonders hervorgehoben, deren Betrachtung für die Anwender des Kriterienkatalogs obligatorisch ist.

Die Kernkriterien sind im Einzelnen (vergleiche BMU 2011):

#### Nutzen für die Umwelt

- Verringerung des Ressourcenverbrauchs: Energie
- Verringerung des Ressourcenverbrauchs: Wasser
- Verringerung des Ressourcenverbrauchs: Rohstoffe
- Vermeidung von Treibhausgasemissionen
- Verringerung von umweltbelastenden Emissionen
- Verringerung der Menge und Gefährlichkeit von Abfällen

#### Nutzen für Verbraucher

- Produkte mit höherem Gebrauchsnutzen
- Produkte fördern Sicherheit in der Gebrauchsphase (inkl. Schutz vor Krankheiten)
- Preis-Leistungsverhältnis für das Produkt ist für den Verbraucher besser

#### Nutzen für die Arbeitnehmer

- Vorteile durch einfachere oder sicherere Handhabung
- Schutz der Gesundheit am Arbeitsplatz (Risikomanagement)

---

<sup>6</sup> Vgl. hierzu den Abschlussbericht der Themengruppe 2 der NanoKommission, Leitfaden zur Erhebung und Gegenüberstellung von Nutzen- und Risikoaspekten von Nanoprodukten, online abrufbar unter: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano\\_abschlussbericht2\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano_abschlussbericht2_bf.pdf)

### Nutzen für die Gesellschaft

- Geringere Kosten für den Umwelt- und Gesundheitsschutz
- Neue, qualifizierte Arbeitsplätze, Sicherung von Arbeitsplätzen
- Produkte werden leistungsfähiger, Verbesserung der Exportchancen, Marktposition, Wettbewerbschancen

### Nutzen für Unternehmen

- Aufbau neuer Märkte, Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit
- Steigerung der Qualität und der Leistung des Produktes
- Kostenreduzierung, zum Beispiel durch Optimierung der Fertigungsprozesse
- Erhöhte Arbeits- und Prozesssicherheit

Der erarbeitete Leitfaden ist so aufgebaut und dokumentiert, dass er von verschiedenen Anwender- beziehungsweise Stakeholdergruppen verwendet werden kann. Im Einzelnen sind dies (BMU 2011):

- Entwickler in Unternehmen, die eine Ersteinschätzung von Nutzen- und Risikoaspekten neuer Produkte vornehmen möchten;
- Marketingexperten in Unternehmen, welche eine transparente Kommunikation der Nutzen- und Risikoaspekten eines Nanoprodukts beabsichtigen;
- Behörden, die beim Vollzug oder bei Genehmigungen sowie bei der Bewilligung der Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten die Nutzen- und Risikoaspekte einstufen wollen;
- Nichtregierungsorganisationen, die positive beziehungsweise negative Empfehlungen zu Nanoprodukten abgeben und diese Einschätzung mit Unternehmen, Behörden, Medien und der Öffentlichkeit kommunizieren möchten.

Die erarbeiteten Kriterien wurden im Zuge der Entwicklung des Leitfadens anhand von fünf Fallbeispielen einem Praxistests unterzogen. Neben bereits auf dem Markt befindlichen Produkten wie Glasreinigern, PET-Flaschen, Markisengewebe wurden dabei auch Produkte im Entwicklungsstadium (Textilreinigung) sowie sehr frühe Stadien der Materialentwicklung (Windrotorblätter aus CNT-haltigen Materialien) als Beispiele herangezogen. Nur bei zwei der fünf Fallbeispiele war es möglich, den Kriterienkatalog der Themengruppe 2 vollständig anzuwenden und die Ergebnisse für die Veröffentlichung aufzubereiten. Dabei handelte es sich um ein mit Nanomaterial ausgerüstetes Markisengewebe sowie um PET-Flaschen mit nanoskaligem Titannitrid. Diese Praxisanwendung des Instruments zeigte, dass der Kriterienkatalog prinzipiell für eine qualitative beziehungsweise überblicksartige Gegenüberstellung der Nutzen- und Risikoaspekte geeignet ist. So war es innerhalb eines überschaubaren Zeitraums möglich, relativ vollständige, schlüssige und nachvollziehbare Aussagen zu den zu Grunde gelegten Kriterien zusammenzustellen. Im Abschlussbericht der Themen-

gruppe 2 der NanoKommission wird aber auch darauf hingewiesen, dass die erzielten „Ergebnisse nur ein erster Schritt in der Betrachtung von potenziellen Nutzen und Risiken von Nanoprodukten“ sein können und einer „tiefer gehenden Prüfung und nach Möglichkeit auch einer Quantifizierung“ bedürfen. Weiter wird empfohlen, die Ergebnisse des Projektes „Nachhaltigkeitscheck für Nanoprodukte“ in den Leitfaden zu integrieren beziehungsweise den Leitfaden als „Vorstufe“ für den Nano-NachhaltigkeitsCheck zu verwenden (BMU 2011).

## **5.4 Weitere Vorarbeiten**

Als weitere relevante Vorarbeiten wurden die Studien zu Nachhaltigkeitsaspekten von Nanotechnologien identifiziert, die das Umweltbundesamt in der Vergangenheit bereits beauftragt hatte. Ebenfalls wichtige Anknüpfungspunkte für die methodische Vorgehensweise beim Nano-NachhaltigkeitsCheck sind das Schweizer Vorsorgeraster und das Selbstbewertungstool „NanoMeter“. Diese Vorarbeiten werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

### **5.4.1 Studien zu Nachhaltigkeitsaspekten von Nanotechnologien im Auftrag des Umweltbundesamtes**

Im Jahr 2009 wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes zwei Studien zu den Auswirkungen der Nanotechnologien auf den Bereich des Umweltschutzes abgeschlossen.

In der Studie „Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte“ (Steinfeld 2010) sollten umwelt- und nachhaltigkeitsbezogene Chancen und Risiken nanotechnischer Innovationen spezifiziert und soweit möglich quantifiziert werden. Dabei wurden insbesondere nicht nur unmittelbare Umweltentlastungspotenziale durch Anwendungen im Bereich der Umwelttechnologien selbst, sondern explizit auch Entlastungspotenziale durch Verbesserungen in allgemeinen Produktionsprozessen aufgrund nanotechnischer Verfahren erfasst. Hierzu wurde zunächst ein Screening nanotechnischer Anwendungen durchgeführt. In einem zweiten Schritt wurden auf der Basis des Screenings wesentliche umweltentlastende, aber auch nicht intendierte, möglicherweise umweltbelastende Wirkungspotenziale zunächst qualitativ identifiziert. Anhand von vier Fallbeispielen wurden daraufhin vertiefende, lebenszyklusorientierte Untersuchungen ausgewählter Verfahren oder Produkte durchgeführt und abschließend die rein umweltbezogene Bewertung durch eine Betrachtung möglicher Beschäftigungsaspekte ergänzt.

Für die Bewertung von Entlastungseffekten für die Umwelt im Rahmen der vertiefenden Untersuchungen wurde zunächst von einer ökobilanziellen Vorgehensweise ausgegangen, wobei allerdings bereits verschiedene methodische Probleme für eine umfassende Bewertung neuer, im Entstehen befindlicher nanotechnischer Verfahren und Produkte ausgewiesen wurden. Die Modellierung erfolgte mit der Ökobilanzsoftware Umberto, basierend auf der Methode des „Center of Environmental Science of Leiden University“ (CML). Wesentliche Wirkungskategorien umfassen dabei den abiotischen Ressourcenverbrauch,

den Treibhauseffekt, die Versauerung, die Eutrophierung (Überdüngung), den Ozonabbau sowie die photochemische Oxidantienbildung (Sommersmog). Über diese Methodik hinaus wurden spezielle Risikoaspekte bei Umgang mit Nanomaterialien durch eine Besorgnisanalyse erfasst. Im Rahmen einer Besorgnisanalyse werden spezielle Entlastungs- und Besorgniskriterien für den Umgang mit Nanomaterialien untersucht, wie sie von der Arbeitsgruppe „Risiken und Sicherheitsforschung“ der NanoKommission des Ministeriums für Umwelt, Reaktorsicherheit und Naturschutz erarbeitet wurden.

Als Fallbeispiele wurden untersucht:

- die Herstellung lötfähiger Endoberflächen auf Leiterplatten,
- die Anwendung von Carbon-Nanoröhren in Folien in der Halbleiterindustrie,
- die Energiespeicherung in Lithium-Ionen Batterien sowie
- die Veränderung von Verarbeitungseigenschaften von Polybutylenterephthalat (PBT)-Kunststoffen.

Dabei wurde insgesamt festgestellt, dass zwar nicht per se von ökologischen Entlastungspotenzialen bei nanotechnologischen Anwendungen ausgegangen werden kann, jedoch die verwendete Methodik einer vergleichenden Betrachtung von Funktionalitäten geeignet war, mehr oder weniger hohe Umweltentlastungspotenziale für die Mehrzahl der untersuchten Anwendungskontexte auszuweisen.

So ergaben sich für die Herstellung von lötfähigen Endoberflächen mittels eines nanotechnischen Verfahrens im Vergleich zu konventionellen Verfahren in allen Umweltwirkungskategorien um einen Faktor 4 bis 20, gegenüber bestimmten Verfahren sogar um bis zu einem Faktor 390 reduzierte Werte. Die begleitend durchgeführte Besorgnisanalyse wies für das nanotechnische Verfahren gleichzeitig ein geringes Besorgnispotenzial aus. Für die Verwendung von Carbon-Nanotubes wurden demgegenüber geringere Einsparpotenziale im zweistelligen Prozentbereich ausgewiesen. Diesen stehen noch einige Besorgnis erregende Hinweise im Bereich der freien Carbon-Nanoröhren entgegen. Für die Anwendung von Lithium-Ionen Batterien im öffentlichen Personennahverkehr wurde auf der Basis existierender Technologien noch kein Durchbruch erwartet, erst für ein Zukunftsszenario konnten um 20% reduzierte Umweltwirkungen im Vergleich zu konventionellen Dieselstadtbussen ausgewiesen werden. Allerdings zeigten sich an diesem Fallbeispiel auch die noch hohen Unsicherheiten in der quantitativen Bestimmung der Umweltauswirkungen für eine noch in der Entwicklung befindlichen Technologie. Im vierten Fallbeispiel wurde durch die Verbesserungen im Verarbeitungsprozess von technischen Kunststoffen eine Energieeinsparung von ca. 9% erreicht. Diese Einsparung führte auch zu entsprechenden Verbesserungen in anderen Umweltaspekten.

Im Rahmen der abschließenden Untersuchung von Beschäftigungseffekten durch Nanotechnologien wurde eine positive Entwicklungserwartung bei Nanotechnologieunternehmen

ausgewiesen. Diese würde allerdings nicht notwendigerweise mit einem tatsächlichen Aufbau neuer Arbeitsplätze einhergehen. Aufgrund der Eigenschaften der Nanotechnologien als „enabling technologies“<sup>7</sup> sei vielmehr eine Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit und damit ein Erhalt und eine Stärkung bereits bestehender Arbeitsverhältnisse und nur in einem geringeren Umfang mit einer Schaffung neuer expliziter „Nano“-Arbeitsplätze zu rechnen.

Ziel der „Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz“ (Martens 2010) war eine qualitative und wo möglich quantitative Darstellung von Chancen und Risiken nanotechnologischer Produkte und Verfahren im Bereich des Umweltschutzes. Ein Schwerpunkt wurde dabei auf die Sektoren Wasser und Luft gelegt. Dabei wurde im Rahmen der Studie zunächst eine Bestandsaufnahme von Forschungs- und Entwicklungsansätzen sowie bereits am Markt befindlicher Produkte durchgeführt. Aus diesen wurden zwei Fallbeispiele – die solare Behandlung von mit Tetrachlorethen belastetem Wasser sowie ein PKW-Kombinationsfilter – einer ökobilanziellen Betrachtung unterzogen.

Im Rahmen der Bestandsaufnahme wurden als wichtige Technologiefelder für den Sektor Wasser Ansätze zur Filtration/Separation, zur Funktionalisierung von Oberflächen, zur Sorption von Nanokatalysatoren sowie von Nanoreagenzien identifiziert. Als bereits im Einsatz befindlich wurden dabei insbesondere nanotechnologische Produkte in der Trinkwasseraufbereitung, der Abwasserreinigung und der Grundwassersanierung benannt. Im Sektor Luft wurden neben den Technologiefeldern Filtration/Separation und Nanokatalysatoren auch speziell Autoabgaskatalysatoren betrachtet. Als bereits im Einsatz wurden nanotechnologische Produkte in den Bereichen der Autoabgaskatalysatoren sowie bei Luftfiltern und Anwendungen zur Entfernung von Luftschadstoffen ausgewiesen. Insgesamt wurde dabei eine Auswahl von knapp vierzig deutschen Unternehmen mit Produkten/Verfahren im Bereich Nanotechnologie und Umwelt identifiziert.

Im Anschluss an die Bestandsaufnahme wurde für zwei konkrete Produkte in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 und 14044 eine ökobilanzielle Betrachtung durchgeführt, um eine Einschätzung zu den Chancen und Risiken der nanotechnologischen Produkte und Verfahren im Bereich des Umweltschutzes zu gewinnen. Dazu wurden in einer ersten Phase die jeweiligen Sachbilanzen im Verlaufe des Lebensweges eines Produkts ermittelt. Daran anschließend wurden potenzielle Umweltauswirkungen bestimmt, in dem die Sachbilanzen wichtigen Wirkungskategorien zugeordnet und für diese Kategorien aggregierte Werte berechnet wurden. In einer abschließenden Phase wurden die gewonnenen Erkenntnisse diskutiert und schwerpunktmäßig basierend auf der Methode Eco-Indicator 99 hinsichtlich

---

<sup>7</sup> Bei einer „(key) enabling technology“ (zu deutsch „Schlüsseltechnologie“) handelt es sich um eine Technologie, die mit einem hohen Forschungs- und Entwicklungsaufwand, schnellen Innovationszyklen sowie einem hohen Kapitaleinsatz verbunden ist. Eine Schlüsseltechnologie ermöglicht Innovationen bei Prozessen, Gütern und Dienstleistungen in allen Wirtschaftsbereichen und besitzt daher systemische Relevanz (vergleiche EU-Kommission 2009).

der Schutzgüter „Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit“, „Qualität des Ökosystems“ und „Ressourcen“, aber auch anhand der CML-Methode bewertet.

In der Fallstudie 1 wurde dabei die Reinigung von mit Tetrachlorethen belastetem Wasser durch ein Halbleiter-Photokatalyseverfahren unter Nutzung eines nanoskaligen Titandioxids im Vergleich zu einer Anwendung des konventionellen Photo-Fenton-Verfahrens unter Nutzung von Eisen(III)-Verbindungen mit Wasserstoffperoxid untersucht. Analysiert wurden dabei der Material und Energiebedarf sowie die verwendeten Chemikalien auch unter Berücksichtigung der Vorketten. Während sich für beide Verfahren in einem (kleinen) Batch-System etwa gleich hohe Umweltbelastungen durch die verschiedenen Wirkungskategorien ergeben, zeigt sich bei einem langjährigen kontinuierlichen Einsatz eine Verschiebung in den Wirkungskategorien. Für einen langjährigen Einsatz dominiert unter den unterstellten Randbedingungen der Ressourcenverbrauch für die Herstellung des nanoskaligen Titandioxids die Gesamtbewertung, das nanotechnologische Verfahren weist damit eine höhere Umweltbelastung auf als das konventionelle Verfahren.

In der Fallstudie 2 wurde die Zuluftfilterung eines PKW mittels eines nanofaserbeschichteten Filters mit einem herkömmlichen Kombinationsfilter verglichen. Schwerpunkte der Analysen lagen dabei auf der Produktion sowie der Gebrauchsphase. Für einen einzelnen Filter wurden nur sehr geringe Unterschiede in Hinblick auf eine mögliche Kraftstoff-Einsparung und eine entsprechende Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen festgestellt, jedoch wurde aufgrund der möglichen Skalierungseffekte (hohe Zahl an substituierbaren PKW-Filtern) dennoch ein relevanter Einspareffekt durch die nanotechnologische Anwendung identifiziert. Dem standen beim Vergleich der Umweltauswirkungen auf die betrachteten Schutzgüter wiederum nur marginale Differenzen entgegen, so dass im Ergebnis dieser Fallstudie ein positives Abschneiden des nanotechnischen Produkts ausgewiesen wurde.

#### 5.4.2 Schweizer Vorsorgeraster

Der Schweizer „Vorsorgeraster Synthetische Nanomaterialien“ richtet sich an Akteure in Industrie, Gewerbe, Handel, Behörden, Versicherungen und Forschungslabors, die mit Prozessen und Produkten mit synthetischen Nanomaterialien zu tun haben. Mit dem öffentlich verfügbaren Vorsorgeraster in Form eines Excel-Tools können die Akteure die Produkte und Prozesse mit synthetischen Nanomaterialien auf mögliche Risikopotenziale für Arbeitnehmer, Verbraucher und Umwelt prüfen und dadurch einen möglichen vorsorglichen Handlungsbedarf frühzeitig erkennen. Der Vorsorgeraster stärkt somit die Eigenverantwortung von Industrie und Gewerbe, um das Risikopotenzial beziehungsweise den Vorsorgebedarf für die menschliche Gesundheit und die Umwelt über den gesamten Lebenszyklus von Nanomaterialien abschätzen zu können (siehe Abbildung 2).

Das Instrument wurde im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Gesundheit (BAG) und des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) im Jahr 2008 entwickelt und nach einer Testphase 2009 öffentlich zugänglich gemacht. Der Vorsorgeraster wird beständig weiterentwickelt und

ist in der aktuellen Version V2\_1\_d.xls (Stand: Juli 2011) zusammen mit weiterführenden Informationen in vier Sprachen<sup>8</sup> im Internet<sup>9</sup> verfügbar:



Abbildung 2: Die Parameter des Vorsorgerasters entlang des Lebenszyklus (aus Höck et al. 2011)

Im Vorsorgeraster wird davon ausgegangen, dass nanospezifische Risiken nur dann entstehen, wenn synthetische Nanomaterialien, die mit mindestens zwei Dimensionen im Nanometer-Bereich liegen, freigesetzt werden. Die Angaben beziehen sich daher für ein bestimmtes Nanomaterial in einer definierten Umgebung. Ändert sich die physikalische Umgebung (wie Lösungsmittel, Matrix/Substrat, Aggregatzustand, et cetera) oder die jeweilige Gebrauchsbedingung, muss ein neuer Vorsorgeraster erstellt werden.

Der Vorsorgeraster stützt sich auf eine begrenzte Anzahl von Bewertungsparametern:

- Die **spezifischen Rahmenbedingungen** umfassen zum einen die Größenordnung der Primärpartikel, die mögliche Bildung von Agglomeraten sowie eine mögliche Deagglomeration unter physiologischen und Umweltbedingungen. Zum anderen wird darunter der Informationsstand über die Herkunft der Ausgangsmaterialien sowie über den weiteren Lebensweg der Nanomaterialien bewertet.
- Das **Wirkungspotenzial** der Nanomaterialien wird über die Parameter Reaktivität (Redoxaktivität und/oder katalytische Aktivität) und Stabilität (Halbwertszeit im Körper und in der Umwelt) abgeschätzt.
- Die **potenzielle Exposition** des Menschen (Arbeiter und Verbraucher) werden über Angaben zur physikalischen Umgebung der Nanopartikel (Luft, flüssige Medien oder feste Matrix) sowie der Masse (bis 1,2 mg, 1,2 – 12 mg, mehr als 12 mg) und der

<sup>8</sup> Deutsch, Englisch, Französisch und Italienisch.

<sup>9</sup> Vgl. <http://www.bag.admin.ch/themen/chemikalien/00228/00510/05626/index.html>.

Häufigkeit eines Kontaktes mit den Nanomaterialien (monatlich, wöchentlich, täglich) ermittelt. In Bezug auf die potenzielle Exposition von Arbeitnehmern wird auch der „worst case“ abgefragt in Form der möglichen Masse an Nanomaterialien, mit der ein Arbeiter im "worst case" in Kontakt kommen kann (bis 12 mg, 12 – 120 mg, mehr als 120 mg) .

Beim potenziellen Eintrag in die Umwelt wird zwischen Produktions- und Gebrauchsphase unterschieden; dabei stehen jeweils die Massen von bis 5 kg, 5 – 500 kg, mehr als 500 kg zur Auswahl. Während der Produktionsphase (inklusive. Herstellung, Verarbeitung, Verpackung, Transport und Entsorgung) wird die Masse an Nanomaterialien, die über Abwasser, Abluft oder Abfall in die Umwelt gelangt, bewertet. Bei der Gebrauchsphase wird die Masse an Nanomaterialien in Gebrauchsprodukten pro Jahr mit und ohne spezifische Entsorgung abgefragt. Zuletzt werden die Umwelteinträge über eine spezifische Entsorgung oder Recycling nach dem Gebrauch über die Masse an entsorgten Nanomaterialien pro Jahr ermittelt.

Auf Basis der oben beschriebenen Parameter wird für jeden definierten Schritt im Lebenszyklus der Nanomaterialien im Produkt das Risikopotenzial beziehungsweise der Vorsorgebedarf für Arbeitnehmer, Verbraucher und Umwelt abgeschätzt. Die Bewertungsparameter sind mit vorgegebenen Angaben zum Auswählen versehen. Beispielsweise liegen bei der Frage zur Stabilität (Halbwertszeit) der Nanomaterialien in der Umwelt die möglichen Antworten „Stunden“, „Tage-Wochen“ und „Monate“ in einem Auswahlmenü vor. Diese Angaben sind mit Punktzahlen (in dem Fall für niedrige Stabilität = 1, mittel = 5 und hoch = 9) hinterlegt. Die Punktzahlen fließen in die weiteren Berechnungen zum Vorsorgebedarf ein. Die Berechnungen sind in der „Wegleitung zum Vorsorgeraster für synthetische Nanomaterialien“ (Höck et al. 2011) ausführlich beschrieben.

Je nach Punktzahl erfolgt eine Zuordnung in zwei Klassen (Höck et al. 2011): Bei **Klasse A** (0-20 Punkte) kann der nanospezifische Handlungsbedarf für die betrachteten Materialien, Produkte und Anwendungen auch ohne Vorliegen weiterer Abklärungen als gering eingestuft werden. Bei **Klasse B** (>20 Punkte) ist ein nanospezifischer Handlungsbedarf gegeben. Bestehende Maßnahmen sollten geprüft oder neue Maßnahmen evaluiert werden. Weiterführende Abklärungen oder gegebenenfalls Risikoreduktionsmaßnahmen bezüglich Entwicklung, Herstellung, Gebrauch und Entsorgung sind im Sinne der Vorsorge erforderlich (Höck et al. 2011).

Eine hohe Punktzahl und eine Einstufung in Klasse B können auch dadurch zustande kommen, dass aufgrund von Nicht-Wissen eine vorsorgliche hohe Bewertung gewählt wurde. Dann weist die hohe Punktzahl auf einen hohen Bedarf an Wissensbeschaffung, weiteren Abklärungen und Wissensprüfung sowie eventuell gezielten Maßnahmen hin.

### 5.4.3 Selbstbewertungstool "NanoMeter"

Beim NanoMeter handelt es sich um ein internetbasiertes **Screening-Instrument** zur Bewertung von Anwendungen mit Nanomaterialien, die sich noch in der Entwicklung befinden und wendet sich an Forscher und Entwickler. Ziel des NanoMeters ist es, Aspekte zu beleuchten, um die öffentliche Akzeptanz und damit den Markterfolg der in der Entwicklung befindlichen Nano-Anwendung zu verbessern.

Das NanoMeter wurde im Rahmen des Projektes observatoryNANO entwickelt, das durch das siebte europäische Forschungsrahmenprogramm von 2008 bis 2012 gefördert und vom britischen „Institute of Nanotechnology“ geleitet wird. Im Projekt sind europaweit eine Reihe weiterer Projektpartner eingebunden.<sup>10</sup> Das NanoMeter ist im Internet unter folgender Adresse zu erreichen: <http://www.observatorynano.eu/project/questionnaire/nanometer/>. Die Informationen sind ausschließlich auf Englisch verfügbar.

Mit dem NanoMeter wird die Einschätzung des Forschers und Entwicklers über die zukünftige Nano-Anwendung zu sechs Themen abgefragt:

- Umwelt, Gesundheit und Sicherheit,
- Energie- und Ressourcenbedarf,
- Gebrauchsnutzen,
- Nutzen und Risiken für die Gesellschaft,
- Produktverantwortung und
- Engagement in Hinblick auf Stakeholderdialoge.

Die Fragen werden durch Ankreuzen beantwortet, wobei die Einschätzung **rein qualitativ** erfolgt. Beispielsweise lautet die erste Frage im Bereich „Umwelt, Gesundheit und Sicherheit“, wie die menschliche Exposition mit ungebundenen Nanomaterialien während Produktion, Nutzung und Entsorgung der betreffenden Anwendung eingeschätzt wird. Zum Ankreuzen stehen die Einschätzungen „hoch“, „mittel“, „gering“, „Nanomaterialien können unter keinen Umständen frei gesetzt werden“ oder „nicht zutreffend“ zur Verfügung.

Einige Fragen beziehen sich auf den Vergleich zum herkömmlichen Produkt ohne Nanomaterialien (Referenzprodukt). So wird zur Entsorgung die Einschätzung abgefragt, ob der

---

<sup>10</sup> Die europäischen Partner des observatoryNANO-Projektes sind: VDI Technologiezentrum GmbH, Deutschland; Commissariat à l'énergie, Frankreich; Institute of Occupational Medicine, Großbritannien; triple innova, Deutschland; Spinverse, Finnland; Bax & Willems Consulting Venturing (B&W), Spanien; National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Niederlande; Technische Universität Darmstadt, Deutschland; AIRI/Nanotec IT, Italien; Nano and Micro Technology Consulting (NMTC), Deutschland; Eidgenössische Materialprüfungs und Forschungsanstalt (EMPA), Schweiz; Nanoethics Centre, University of Aarhus, Dänemark; UNU-MERIT, Niederlande; Technology Centre AS CR (TCASCR), Tschechien.

Einsatz des Nanomaterials die Abfallbehandlung<sup>11</sup> im Vergleich zur herkömmlichen Anwendung ohne Nanomaterialien verbessert, nicht beeinflusst oder mindert, ob mit derzeitiger Technologie eine Verwertung nicht möglich ist oder ob die Frage nicht zutreffend ist.

Bei allen Antworten soll zudem angegeben werden, wie belastbar die jeweils getroffenen Einschätzung sind, das heißt ob der Nutzer sich seiner Angaben „sehr sicher“, „ziemlich sicher“, beziehungsweise „nicht sicher“ ist.

Abschließend werden die Antworten in einer Tabelle zusammengefasst. Dabei werden die Antworten als runde Markierung auf einer vierstufigen Skala zwischen Risiko für einen Markterfolg und Nutzen eingetragen. Dabei wird beispielsweise eine hohe menschliche Exposition als Risiko, eine geringe Exposition hingegen als Nutzen abgebildet. Die runden Markierungen sind je nach der Selbsteinschätzung der Belastbarkeit der Einschätzung mehr oder weniger ausgefüllt.

Mit dieser Darstellungsweise können Wissenslücken aufgedeckt werden. Falls relativ viele Fragen nur mit geringer Sicherheit beantwortet werden konnten, wird empfohlen, bei diesen Aspekten die Beratung interner oder externer Experten (zum Beispiel Partnern aus der Lieferkette) einzuholen. Bei den Antworten, die einem Risiko zugeordnet wurden, wird empfohlen, diejenigen Aspekte zu identifizieren, die für die relevanten Akteure am kritischsten sind und diese im Entwicklungsteam zu bearbeiten. Die Antworten, die einen Nutzen ergaben, sollen verifiziert und für einen Marktvorteil genutzt werden. Über die separate Auswertung der Nutzen- und Risikoaspekte hinaus wird angeregt, das integrierte Nutzen-Risiko-Verhältnis für verschiedene Akteure zu untersuchen.

## **6 Grundprinzipien des Nano-NachhaltigkeitsChecks**

Vor dem Hintergrund der gewählten Zielstellung und den methodischen Anknüpfungspunkten werden im folgenden Kapitel die Grundprinzipien des Nano-NachhaltigkeitsChecks erläutert. Ausgehend von dem allgemeinen Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung (siehe Kapitel 6.1) und der konsequenten Anwendungen des Lebenszyklusansatzes (siehe Kapitel 6.2) besteht einer der Kerngedanken des Instruments darin, einen universellen Ansatz für eine nanospezifische Analyse der Nachhaltigkeitsaspekte zur Verfügung zu stellen (siehe Kapitel 6.3). Weitere wichtige Grundpfeiler bilden die vergleichende Analyse zu einem Referenzprodukt (siehe Kapitel 6.4) sowie eine rechtzeitige Verankerung im Entwicklungsprozess (siehe Kapitel 6.5). Darüber hinaus stellen die Integration des Vorsorgegedankens (siehe Kapitel 6.6) und daraus resultierend die Berücksichtigung von Störfallereignissen (siehe Kapitel 6.6) wichtige Wesensmerkmale des Nano-NachhaltigkeitsChecks dar.

---

<sup>11</sup> zum Beispiel: bezüglich Wiederverwendbarkeit, Recyclingfähigkeit, Abbaubarkeit, in Deponien oder bei Verbrennung.

## 6.1 Nachhaltige Entwicklung als Leitbild

Wie aus Titel und Zielsetzung ersichtlich wird, steht beim Nano-NachhaltigkeitsCheck das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung im Mittelpunkt. Entsprechend der Empfehlungen der Enquête-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestags wird unter dem Begriff der Nachhaltigkeit die integrierte Betrachtung von drei Dimensionen verstanden:

- die ökologische Dimension
- die ökonomische Dimension
- die soziale Dimension.

Dazu müssen die Wechselbeziehungen und Wechselwirkungen zwischen den drei Dimensionen und der Zielsetzung ermittelt und beachtet werden. Dabei geht es jedoch nicht um die Zusammenführung dreier nebeneinander stehender Säulen, sondern um die Entwicklung einer dreidimensionalen Perspektive aus der Erfahrungswirklichkeit.

„Eines ist seit der Weltkonferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro zumindest klar geworden: Alles Wirtschaften und damit auch die Wohlfahrt im klassischen Sinne stehen unter dem Vorbehalt der ökologischen Tragfähigkeit. Ebenso klar geworden ist, dass „auch ökologische Ziele (...) kaum umgesetzt werden (können), wenn es Menschen aufgrund ihrer materiellen Bedingungen schwer gemacht wird, Rücksicht auf ökologische Ziele zu nehmen.“ (Enquête-Kommission 1998).

Nachhaltige Entwicklung ist folglich nur schrittweise über evolutive, gesellschaftspolitische Konkretisierungs- und Willensbildungsprozesse zu verwirklichen, in denen die unterschiedlichen Perspektiven und Interessen der Individuen und gesellschaftlichen Gruppen aufeinander abgestimmt werden.

Aufgrund der herausragenden Bedeutung der ökologischen Tragfähigkeit ist es im Sinne einer zielgerichteten Vorgehensweise erforderlich, beim Nano-NachhaltigkeitsCheck einen Schwerpunkt auf Aspekte des Umwelt- und Klimaschutz zu setzen und die damit verbundenen Aspekte besonders ausführlich zu betrachten. Mit dieser Schwerpunktsetzung sollen jedoch weder die ökonomische noch die soziale Dimension der Nachhaltigkeit abgewertet oder gar ausgeblendet werden. Vielmehr müssen diese durch eine ausreichende Anzahl von Indikatoren im Rahmen der Analysematrix repräsentiert sein.

## 6.2 Anwendung des Lebenszyklusansatzes

Grundsätzlich zeichnen sich industrielle Systeme durch Prozesse und Aktivitäten aus, die komplex miteinander verknüpft sind. Um die Chancen und Risiken von industriellen Produkten adäquat einschätzen zu können, ist daher ein ganzheitlicher Ansatz erforderlich.

Der Lebenszyklusansatz ist ein solcher ganzheitlicher Ansatz für die Bewertung von ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten eines Produkts, eines Prozesses oder einer

Dienstleistung, der aus dem methodischen Konzept von Produkt-Ökobilanzen (englisch „Life Cycle Assessment“, LCA) abgeleitet ist und auch einen der Kernaspekte von PROSA (siehe Kapitel 5.1) darstellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass jeder Lebensweg eines Produkts oder einer Dienstleistung mit der Extraktion und der Aufbereitung von Rohstoffen beginnt, gefolgt durch Weiterverarbeitung, Transport und Gebrauch und schließlich mit der Abfallbehandlung endet. Aufgrund der berücksichtigten Prozesse wird der Lebenszyklusansatz auch als Cradle-to-grave-Ansatz (deutsch „von der Wiege bis zur Bahre“) bezeichnet. Die Verwendung des Lebenszyklusansatzes ermöglicht es, die wichtigsten (positiven wie negativen) Auswirkungen eines Produktsystems zu identifizieren.

Insbesondere hilft dieser Ansatz dabei, gegebenenfalls vorhandene Zielkonflikte und Problemverlagerungen aufzudecken. Dabei handelt es sich sowohl um Problemverlagerungen zwischen den einzelnen Lebenswegabschnitten (wie Verlagerungen von Umweltbelastungen von der Herstellungs- in die Nutzenphase) sowie zwischen verschiedenen Umweltaspekten beziehungsweise -medien (zum Beispiel CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Luft und versauernd wirkende Substanzen in Wasser und Boden).

Im Rahmen dieser allgemeinen Vorgehensweise sind die folgenden drei Perspektiven besonders relevant:<sup>12</sup>

- Standortbezogene Perspektive (innerhalb des “gate”)

Auf dieser Ebene fokussiert sich der Lebenszyklusansatz auf die Bewertung von alternativen Materialien beziehungsweise der Modifizierung von Prozessen, vor allem um den Energie- und Ressourcenverbrauch sowie die Exposition von Beschäftigten und Umwelt zu reduzieren.

- Vorketten-Perspektive (in Richtung “cradle”)

Der Schwerpunkt des Lebenszyklusansatzes in der Vorketten-Perspektive liegt in der Bewertung und gegebenenfalls Optimierung des Supply-Chain-Management und dabei insbesondere auf der Reduzierung der „ökologischen Rucksäcke“ der verwendeten Stoffe und Energien.

- Nachketten-Perspektive (“gate to grave”)

Im Rahmen der Nachketten-Perspektive konzentriert sich die Untersuchung auf die Optimierung der Nutzenphase (zum Beispiel Reduzierung des Energiebedarfs, Verlängerung der Produktlebensdauer, Reduzierung der Exposition gegenüber den Verbraucher/innen)

---

<sup>12</sup> Vgl. Socolof, M. L.; Life Cycle Assessment and Life-cycle Thinking, Performance Track Teleseminar, [www.epa.gov/perftrac/LCA%20teleseminar-1-26-05.ppt](http://www.epa.gov/perftrac/LCA%20teleseminar-1-26-05.ppt).

und eine systematische Bewertung der Prozesse am Ende des Lebenszyklusses (zum Beispiel Abwasserreinigung, Recycling, Abfallverbrennung).

Der Fokus der Diskussion zu Nanomaterialien lag bisher eher auf deren Produktion und Anwendung. Wie Erfahrungen aus vielen anderen Gebieten zeigen, gewinnt aber mit zunehmendem Einsatz von Stoffen auch die Frage des sicheren Recyclings und der Entsorgung an Bedeutung. Es reicht nicht, die nanotechnologischen Anwendungen nur in der Nutzungsphase zu bewerten. Insbesondere auch die nachgelagerten Prozessketten müssen betrachtet werden. Daher sollte im Rahmen des Analyserasters beispielsweise thematisiert werden, ob die bestehenden Entsorgungssysteme in der Lage sind, Nanomaterialien zu erfassen und sicher zu behandeln (vergleiche Möller et al. 2010).

### **6.3 Universeller Ansatz für eine nanospezifische Analyse**

Aus technisch-naturwissenschaftlicher Sicht stellen Nanomaterialien keine homogene Stoffgruppe dar. Es handelt es sich dabei um physikalisch und strukturell sehr unterschiedliche Stoffe. Auch ihre chemische Zusammensetzung und ihr Potenzial für chemische und biochemische Reaktionen sind sehr unterschiedlich. Deswegen müssen im Rahmen einer fallspezifischen Betrachtung diejenigen Sachverhalte der Analyse der Nachhaltigkeitsaspekte zu Grunde gelegt werden, die für ein konkretes Nanomaterial in einer konkreten Anwendung jeweils relevant sind. Eine undifferenzierte Übertragung von Erkenntnissen über ein Nanomaterial auf ein anderes widerspricht einer fundierten naturwissenschaftlichen Vorgehensweise.

Trotz der Notwendigkeit einer fallspezifischen Betrachtung soll mit dem Analyseraster ein allgemeiner Ansatz für ein Selbstevaluierungsinstrument zur Verfügung gestellt werden. Hierfür ist es erforderlich, bei den zu Grunde liegenden Indikatoren und Kriterien alle relevanten Nachhaltigkeitsaspekte zu erfassen. Dazu müssen bei der Entwicklung des Analyserasters entlang des Lebensweges von nanotechnologischen Produkten die prinzipiell wichtigsten Interaktionen mit der natürlichen Umwelt, aber auch mit dem ökonomischen und sozialen Gefüge betrachtet werden, um dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung zu genügen. Durch die gewählte Sichtweise wird sichergestellt, dass die ermittelten Indikatoren und Kriterien die speziell für nanotechnologische Entwicklungen relevanten Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigen und die Betrachtung damit über eine allgemeine Technologiebewertung im allgemeinen Sinne hinausgeht. Dabei wird die Betrachtung einer Grundgesamtheit aller für Nanoprodukte relevanten Nachhaltigkeitsaspekte auch dazu führen, dass im konkreten Fallbeispiel verschiedene Indikatoren nicht relevant sind beziehungsweise in Hinblick auf die vergleichende Betrachtung indifferent ausfallen werden.

Um den Aufwand bei der Anwendung des Analyserasters in einem akzeptablen Rahmen zu halten, ist es erforderlich, standardisierte Indikatoren mit genau definierten Untersuchungskriterien und einer eindeutigen Beschreibung der Vorgehensweise bei der

zugehörigen Datenerfassung zu entwickeln. In diesem Zusammenhang werden Leitfäden für die Datenerfassung und Analyse benötigt, die neben einer Beschreibung der methodischen Grundlagen auch eine Schritt-für-Schritt-Anleitung für die Datenerfassung beinhalten. Dies bildet auch die Grundlage für eine möglichst weitgehende Quantifizierung der Nachhaltigkeitsaspekte. Auch bei Gesichtspunkten, bei denen aus Komplexitätsgründen oder nicht ausreichender Datenbasis eine Quantifizierung nicht möglich ist, kann auf Basis von einheitlichen Kriterien und Leitfragen zumindest eine semi-quantitative Betrachtung durchgeführt werden.

Zur weiteren Vereinfachung und Vereinheitlichung der Datenerfassung sollten für das Analyseraster zudem elektronische Tools bereitgestellt werden, die über Eingabemasken für die ermittelten Daten verfügen und eine automatische Berechnung der Indikatorergebnisse vornehmen.

#### **6.4 Vergleichende Betrachtung zu einem Referenzprodukt**

Eines der Grundprinzipien des Nano-NachhaltigkeitsChecks ist die Feststellung, dass es keinen absoluten Maßstab gibt, durch den ein ökologisches beziehungsweise nachhaltiges Produkt sinnvoll definiert werden könnte. Aus diesem Grund können belastbare Aussagen über die Nachhaltigkeit eines Produktes nur im Kontext einer Untersuchung bestimmter Funktionen(en) getroffen werden. Dies setzt eine ausführliche Betrachtung der verschiedenen Nutzenaspekte des Produkts voraus. Außerdem impliziert dieser Grundgedanke eine vergleichende Betrachtung des nanotechnologischen relativ zu einem bereits bestehenden Produkt.

Da im Rahmen des Nano-NachhaltigkeitsChecks diejenigen Nachhaltigkeitsaspekte herausgearbeitet werden sollen, die sich spezifisch durch den Einsatz von Nanomaterialien beziehungsweise der Nanotechnologien im Sinne einer „enabling technology“ ergeben, muss es sich bei dem Referenzprodukt um ein Produkt handeln, bei dem bezüglich der untersuchten Funktionalität (siehe hierzu funktionelle Einheit, Kapitel 7.2.2) keine Nanomaterialien verwendet werden.

#### **6.5 Rechtzeitige Verankerung im Entwicklungsprozess**

Das Ziel des Nano-NachhaltigkeitsChecks liegt im Aufzeigen der mit einem konkreten Nanoprodukt verbundenen Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken. Damit sollen Möglichkeiten erschlossen werden, in einem entwicklungsbegleitenden Ansatz die vorhandenen Chancen optimal zu realisieren und potenzielle Risiken im Frühfeld zu erkennen und soweit wie möglich zu reduzieren. Eine rein beschreibende Analyse ohne die Möglichkeit auf die eigentliche Produktentwicklung Einfluss zu nehmen, würde nur in sehr geringem Umfang zu einer Stärkung der Nachhaltigkeit beitragen können. Aufgrund dieser Zielsetzung ergibt sich ein Spannungsfeld in Hinblick auf die zeitliche Verankerung der

Analyse: Wird zu früh im Entwicklungsprozess angesetzt, so sind noch nicht alle Chancen und Risiken identifizierbar oder ausreichend quantifizierbar, wird zu spät im Entwicklungsprozess angesetzt, so verbleiben keine ausreichenden Gestaltungsfreiräume mehr. Eine solche Betrachtung hätte dann nur noch affirmativen Charakter und widerspricht damit auch einem wichtigen Kerngedanken der SWOT-Methodik (vergleiche Kapitel 5.2).

Aus diesem Grund sollte sich der Nano-NachhaltigkeitsCheck vorrangig an Produkte richten, die kurz vor oder in der Markteinführung stehen. Zu diesem Zeitpunkt sind einerseits viele der Randbedingungen im Lebenszyklus des Produkts (wie etwa Ressourcenverbräuche, Herstellungsprozesse, Nutzungseigenschaften, et cetera) mit einer ausreichenden Genauigkeit festgelegt und eine belastbare Datenbasis für eine möglichst weitgehende Quantifizierung der Nachhaltigkeitsaspekte vorhanden. Auf der anderen Seite ist das Produkt noch nicht so am Markt etabliert, dass sich keine Spielräume mehr für die weitere Produktentwicklung beziehungsweise für eine Optimierung ergeben.

Grundsätzlich kann jedoch auch bereits in einem relativ frühen Stadium der Produktentwicklung mit einer Evaluation begonnen werden. Diese wird zu diesem Zeitpunkt notwendigerweise stärker qualitativen Charakter aufweisen und daher eher geeignet sein, bereits frühzeitig wesentliche zu berücksichtigende Aspekte (wie beispielsweise Recyclingfragen) in den Blick zu nehmen. Mit der weiteren Konkretisierung der Produktgestaltung kann dann iterativ auch eine Konkretisierung und weitere Quantifizierung der Betrachtung vorgenommen werden.

## 6.6 Integration des Vorsorgegedankens

Bei dem gewählten Ansatz eines Selbstevaluierungsinstruments, das während des Entwicklungsprozesses von nanotechnologischen Produkten zum Einsatz kommen soll, stellt sich unmittelbar die Frage nach dem Umgang mit Wissenslücken beziehungsweise unsicheren Informationen und Annahmen. Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, nimmt die Unsicherheit bei der Datenbasis zu, je früher im Entwicklungsprozess das Analyseraster zum Einsatz kommt. Dies hat zur Folge, dass in dem zu Grunde liegenden Analyseraster sowie in den Indikatoren der Vorsorgegedanke in adäquater Weise berücksichtigt werden muss. Dazu ist im Analyseraster und bei bestimmten Indikatoren zu berücksichtigen, ob es erste wissenschaftliche Hinweise auf ernste oder irreversible mögliche Schäden für Mensch oder Umwelt gibt, die durch die verwendeten Materialien (Nanomaterialien) verursacht werden können. Auch eine wissenschaftlich plausible Risikohypothese für den möglichen Eintritt von Schäden sollte Anlass zur Vorsorge geben. Die Integration des Vorsorgegedankens orientiert sich dabei an den Überlegungen, die der Europäische Gerichtshof (EuGH) für die Anwendung des Vorsorgeprinzips durch den Gesetzgeber in zahlreichen Urteilen aufgestellt hat.<sup>13</sup> Danach ist das Vorsorgeprinzip in der

---

<sup>13</sup> Vgl. zum Beispiel EuGH, Rs. T-13/99 (Pfizer Animal Health ././ Rat), Slg. 2002, II-3305, Rndnr. 143.

Praxis insbesondere in den Fällen anzuwenden, in denen aufgrund einer objektiven wissenschaftlichen Bewertung Grund für die Besorgnis besteht, dass die möglichen Gefahren für die Umwelt und Gesundheit von Menschen, Tieren oder Pflanzen nicht hinnehmbar oder mit einem hohen Schutzniveau unvereinbar sein können.<sup>14</sup> Droht also die Gefahr irreversibler und schwerer Schäden für die Gesundheit von Menschen, Tieren oder Pflanzen sowie die Umwelt und ist der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang oder Umfang der Risiken eines Produktes oder Prozesses noch nicht nachgewiesen, so kann dies nicht als Grund für die Verzögerung von Maßnahmen angeführt werden.<sup>15</sup>

## 6.7 Berücksichtigung von Stöfallereignissen

Eine generelle Gefährdungsbeurteilung beziehungsweise Risikoabschätzung und damit die Festsetzung von begründeten Grenzwerten zum Schutz von Menschen und Umwelt sind für Nanomaterialien derzeit in der Regel noch nicht möglich. Im Rahmen vorhandener Ansätze zur Risikobetrachtung wie dem „Vorsorgeraster für Synthetische Nanomaterialien“ (Höck et al. 2011) werden mögliche Risikopotenziale synthetischer Nanomaterialien und deren Anwendungen für Mensch und Umwelt bestimmt und der Vorsorgebedarf für Arbeitnehmer, Verbraucher und Umwelt abgeschätzt. Dabei bleiben die Auswirkungen möglicher Störfälle bislang jedoch explizit unberücksichtigt.

Seit einigen Jahrzehnten spielt aber die Frage, wie sich Störfälle bei der Produktion und Weiterverarbeitung von Chemikalien vermeiden und beherrschen lassen, eine immer größere Rolle. In Deutschland bestehen entsprechende Regelungen zum Beispiel mit der Störfallverordnung. Eine systematische Diskussion zur Möglichkeit von Störfällen im Zusammenhang mit Nanomaterialien findet jedoch bislang praktisch nicht statt.

Mit Blick auf die Möglichkeit von Störfällen wurde die grundsätzliche Eignung der Störfallverordnung zur Berücksichtigung auch von Nanomaterialien bereits durch die Europäische Kommission festgestellt. Dennoch verweist sie hinsichtlich der „Umsetzung von Rechtsvorschriften“ gleichzeitig darauf, dass „derzeit ... die wissenschaftliche Grundlage, die zum vollständigen Verständnis aller Eigenschaften und Gefahren von Nanomaterialien notwendig ist, in nur unzureichender Weise vorhanden“ ist (vergleiche EU-Kommission 2008). Auch finden Nanomaterialien im Rahmen der Störfallverordnung keine explizite Berücksichtigung.

---

<sup>14</sup> Mitteilung der Kommission über die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips KOM(2000)(1) vom 2.2.2000, im Folgenden: Mitteilung der Kommission.

<sup>15</sup> Vom EuGH werden diese Voraussetzungen für die Anwendung des Vorsorgeprinzips gefordert in: EuGH, Rs. T-13/99 (Pfizer Animal Health ./ Rat), Slg. 2002, II-3305, Rndnr. 143. Nach der Mitteilung der Kommission, a.a.O., S. 3 ist das Vorsorgeprinzip anzuwenden «insbesondere in den Fällen, in denen aufgrund einer objektiven wissenschaftlichen Bewertung berechtigter Grund für die Besorgnis besteht, dass die möglichen Gefahren für die Umwelt und die Gesundheit von Menschen, Tieren oder Pflanzen nicht hinnehmbar oder mit dem hohen Schutzniveau der Gemeinschaft unvereinbar sein könnten».

Es ist aber bisher nicht systematisch untersucht, ob diese Regelungen hinreichend gut erfassen, wie sich Nanomaterialien bei Störfällen verhalten und auswirken. Dabei ist unter anderem die Frage zu klären, wie groß das Risiko ist, dass entsprechende Partikel infolge eines Störfalles freigesetzt werden können. Im Ergebnis muss ein realistisches Bild erarbeitet werden, welche Störfälle möglich sind und welche Auswirkungen freigesetzte Nanopartikel auf die Arbeitnehmer, die Bevölkerung oder die Umwelt haben können.

Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich, im Rahmen des Analyserasters neben dem Normalbetrieb bei der Herstellung und Verarbeitung von Nanomaterialien auch die bekannten Effekte hinsichtlich ihrer Relevanz bei Störfällen zu betrachten und durch geeignete Kriterien zu erfassen.

## **7 Charakterisierung des Analyserasters**

Im vorliegenden Kapitel wird das im Rahmen des Projekts entwickelte Analyseraster für die systematische Betrachtung der Nachhaltigkeitsaspekte von nanotechnologischen Produkten und Anwendungen vorgestellt. Hierfür werden zunächst die im Nano-NachhaltigkeitsCheck betrachteten Untersuchungsgegenstände definiert (siehe Kapitel 7.1) und relevante Aspekte zur Festlegung der Systemgrenzen der zu Grunde liegenden Prozessketten dargelegt (siehe Kapitel 7.2). Im Anschluss daran werden in Kapitel 7.3 die verwendeten Schlüsselindikatoren aufgeführt sowie eine methodische Einbettung und Zuordnung der Schlüsselindikatoren vorgenommen. In Kapitel 7.4 werden die Schlüsselindikatoren der Stärken-Schwächen-Analyse im Einzelnen beschrieben, gefolgt von einer detaillierten Beschreibung der Schlüsselindikatoren der Chancen-Risiko-Analyse in Kapitel 7.5. Die Eckpunkte zur Auswertung der Schlüsselindikatoren enthält schließlich Kapitel 7.6 und in Kapitel 7.7 wird die Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Erprobung des Analyserasters beschrieben.

### **7.1 Definition der Untersuchungsgegenstände**

#### **7.1.1 Nanomaterialien**

Zur Definition von Nanomaterialien wurden in der Vergangenheit bereits zahlreiche Vorschläge erarbeitet sowohl auf internationaler und nationaler Ebene als auch von verschiedenen Akteuren (wie Normungsgremien, wissenschaftlichen Einrichtungen, Ministerien und Behörden oder Umweltverbänden).

Eine rechtsverbindliche Definition von Nanomaterialien existiert bislang auf EU-Ebene nur in der Kosmetik-Verordnung, die auch in Deutschland unmittelbar gilt. Darüber hinaus finden sich in der EU oder Deutschland keine weiteren rechtsverbindlichen Definitionen für Nanomaterialien.

Vor diesem Hintergrund werden für die Zwecke des Nano-NachhaltigkeitsChecks Nanomaterialien wie folgt definiert:

*„Nanomaterialien sind zielgerichtet hergestellte Materialien, die zwischen 0,5 nm und 200 nm in mindestens einer Dimension liegen (Primärteilchen), und daraus abgeleitete Agglomerate und Aggregate.“*

Als Untergrenze für das Spektrum der Nanomaterialien wurde der Wert 0,5 nm gewählt, der die bislang verwendete Untergrenze „in der Größenordnung 1 nm“ aufgreift und präzisiert. Eine solche Ausweitung des Spektrums auf den Größenbereich unterhalb von 1,0 nm ist erforderlich, da einige in der Öffentlichkeit unter Nachhaltigkeitsaspekten häufig diskutierten Nanomaterialien in diesem Größenbereich liegen. So beträgt beispielsweise der Durchmesser eines C60-Fullerens 0,7 nm.

Die obere Grenze des Spektrums wurde auf 200 nm festgelegt. Da auch oberhalb von 100 nm nanospezifische Effekte bei den physikalisch-chemischen Eigenschaften der vorliegenden Stoffe nicht ausgeschlossen werden können, wurde im Sinne eines moderaten Sicherheitszuschlags der Wert 200 nm gewählt<sup>16</sup>.

### 7.1.2 Nanoprodukt

Für die Definition des Begriffs „Nanoprodukt“ wird an die EU-weit eingeführten Definitionen in der REACH-Verordnung<sup>17</sup> angeknüpft.

Entsprechend verschiedener möglicher Untersuchungsobjekte sollte der Begriff „Nanoprodukt“ als Sammelbegriff definiert werden für:

- Nanomaterial,
- Gemische, die Nanomaterialien enthalten, sowie
- Halbfertig- und Endprodukte, die Nanomaterialien enthalten.

Die Definition des Begriffs „Nanomaterial“ richtet sich nach dem Definitionsvorschlag im vorherigen Abschnitt.

Für den Begriff „Gemisch“ wird die Definition in Art. 3 Nr. 2 REACH angewendet, wonach es sich um

*„Gemenge oder Lösungen handelt, die aus zwei oder mehr Stoffen bestehen.“*

Mit der Verwendung der Begriffsdefinition aus der REACH-Verordnung wird auf eine europaweit eingeführte und verbindliche Regelung zurückgegriffen, die auch im Kontext von Exporten sowie Importen in die EU den Regelungsadressaten bekannt ist.

Gleiches gilt für eine Definition der Halbfertig- und Endprodukte, die Nanomaterialien enthalten. Zu deren Definition wird auf den Begriff „Erzeugnis“ nach Art. 3 Nr. 3 REACH zurückgegriffen. Der Erzeugnisbegriff nach REACH umfasst neben Endprodukten auch Halbfertigprodukte, wobei dann die Abgrenzung zwischen Stoff, Gemisch und Erzeugnis problema-

<sup>16</sup> Vergleiche hierzu auch (Hermann / Möller 2010).

<sup>17</sup> Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 für die Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien

tisch sein kann. Unter einem Erzeugnis im Sinne von REACH ist nach Art. 3 Nr. 3 REACH-VO ein „Gegenstand zu verstehen, der bei der Herstellung eine spezifische Form, Oberfläche oder Gestalt erhält, die in größerem Maß als die chemische Zusammensetzung seine Funktion bestimmt“.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen wird für die Zwecke des NachhaltigkeitsChecks folgende Definition des Begriffs „Nanoprodukt“ vorgesehen. „Nanoprodukte“ umfassen:

- Nanomaterialien entsprechend der Definition aus Kapitel 7.1.1,
- Gemische nach der Definitionen in Art. 3 Nr. 2 REACH, die Nanomaterialien enthalten sowie
- Erzeugnisse entsprechend der Definition in Art. 3 Nr. 3 REACH, wenn sie Nanomaterialien im Sinne von Kapitel 7.1.1 enthalten; unabhängig davon, in welcher Konzentration das Nanomaterial im Erzeugnis enthalten ist.

### 7.1.3 Referenzprodukt

Wie in Kapitel 6.4 dargelegt wurde, soll im Rahmen des Nano-NachhaltigkeitsChecks eine vergleichende Betrachtung zu einem nicht-nanotechnologischen Referenzprodukt vorgenommen werden. Bezüglich der Definition des Referenzprodukts wird auf den Bericht der Themengruppe 2 der NanoKommission verwiesen. Die dort dokumentierte Definition für das Referenzprodukt wurde in enger Abstimmung mit der Entwicklung des Analyserasters für den Nano-NachhaltigkeitsCheck erarbeitet und vom Hauptautor des hier vorliegenden Berichts verfasst. Um die methodischen Grundlagen zwischen beiden Instrumenten so weit wie möglich zu harmonisieren, wird die Definition des Referenzprodukt unverändert aus dem Abschlussbereich der Themengruppe 2 übernommen (vergleiche BMU 2010):

„Bei dem Referenzprodukt sollte es sich grundsätzlich um ein Produkt handeln, bei dem bezüglich der untersuchten Funktionalität<sup>18</sup> keine Nanomaterialien verwendet werden. Grund hierfür ist, dass im Rahmen des Vergleichs zwischen Nano- und Referenzprodukt diejenigen Nutzen- und Risikoaspekte herausgearbeitet werden sollen, die sich spezifisch durch den Einsatz von Nanomaterialien beziehungsweise der Nanotechnologien ergeben.

Bei der Auswahl des Referenzprodukts ist zu beachten, dass sowohl Nano- als auch Referenzprodukt über die gleiche grundlegende technische Funktionalität verfügen. Das Prinzip der funktionellen Äquivalenz ist sehr wichtig, da sonst Alternativen untersucht und bewertet würden, die nicht vergleichbar sind. Aus diesem Grund sollten die Nutzenaspekte der untersuchten Produkte zu Beginn der Untersuchung genau analysiert und benannt werden. Ausgehend von dieser Untersuchung ist dann festzulegen, bei welchen Nutzen-

---

<sup>18</sup> Sollten bei einer weiteren Funktionalität des Referenzprodukts, die für den Vergleich mit dem Nanoprodukt nicht relevant ist, Nanomaterialien eingesetzt werden, so ist dies unproblematisch. Ein mögliches Beispiel hierfür wären Nanomaterialien, die sowohl beim Nano- als auch beim Referenzprodukt für den gleichen Zweck und im gleichen Umfang schon seit vielen Jahren verwendet werden.

aspekten es sich um grundlegende technische Funktionalitäten handelt und welche eher einen Zusatznutzen bilden.

Falls es sich bei dem Nanoprodukt um ein völlig neuartiges Produkt oder ein Produkt mit bislang nicht realisierbaren Eigenschaften handelt, ist es im Einzelfall nicht möglich, ein Referenzprodukt mit der gleichen grundlegenden technischen Funktionalität zu spezifizieren. In diesem Fall muss dann bei der Festlegung des Referenzprodukts auf ein Produkt ausgewichen werden, das der Funktionalität des Nanoprodukts am nächsten kommt<sup>19</sup>. Die Auswahl sollte durch die Frage geleitet werden, welches konventionelle Produkt das Nanoprodukt bei seiner Markteinführung beziehungsweise bei einer zunehmenden Nachfrage gegebenenfalls substituieren kann. Sollten mehrere „Kandidaten“ für das Referenzprodukt in Frage kommen, empfiehlt es sich, dabei auch den derzeitigen Marktanteil mit zu berücksichtigen.

In jedem Fall sollten die bei der Auswahl des Referenzprodukts getroffenen Annahmen nachvollziehbar dokumentiert und als ergänzende Information zu den Ergebnissen der Einschätzung zur Verfügung gestellt werden.“

Grundsätzlich ist es natürlich auch möglich, mit dem Analyseraster des Nano-NachhaltigkeitsChecks vergleichende Untersuchungen von Nanoprodukten untereinander durchzuführen. Beispielsweise könnte eine interessante Forschungs- und Entwicklungsfragestellung darin bestehen, welcher relative Vorteil mit der Verwendung eines anderen beziehungsweise neuartigen Nanomaterials verbunden ist. Auch bei dieser Fragestellung können die entwickelten Schlüsselindikatoren verwendet werden. Allerdings steht ein solcher Ansatz nicht im Mittelpunkt des Projekts „Nano-NachhaltigkeitsCheck“ und wird demzufolge hier nicht weiter untersucht.

## **7.2 Festlegung der Systemgrenzen**

Mit der Wahl der Systemgrenzen wird festgelegt, welche Module bei der Ermittlung der Schlüsselindikatoren berücksichtigt werden sollen. Module wiederum stellen diejenigen Prozesse, Tätigkeiten oder Aspekte des untersuchten Produktsystems dar, für die Daten gesammelt werden.

Grundsätzlich besteht beim Nano-NachhaltigkeitCheck der Anspruch, den gesamten Lebensweg der untersuchten Nanoprodukte von der Rohstoffgewinnung bis zur Behandlung von Abfällen zu untersuchen (siehe Kapitel 6.1). Aufgrund der gewählten Schwerpunktsetzung auf quantifizierbare Aspekte im Hinblick auf den Umwelt- und Klimaschutz müssen jedoch zur Komplexitätsreduktion sowie aus Zeit- und Ressourcengründen Vereinfachungen vorgenommen werden. Im folgenden Kapitel werden nach einer einführenden Charakteri-

---

<sup>19</sup> Je nach untersuchtem Produkt kann es sich beim Referenzprodukt im Extremfall jedoch auch um eine so genannte „Nullvariante“ handeln, falls die untersuchte Funktionalität ausschließlich durch eine nanotechnologische Anwendung bereitgestellt werden kann.

sierung des Lebenszyklusansatzes Möglichkeiten zur Vereinfachung aufgezeigt. Auf die bei den einzelnen Schlüsselindikatoren jeweils vorgenommenen Vereinfachungen wird in den jeweiligen Leitfäden<sup>20</sup> zur Ermittlung des Schlüsselindikators eingegangen.

### 7.2.1 Festlegung des Produktsystems

Mögliche Vereinfachungen eines vollständigen Lebenszyklusansatzes können darin bestehen, eine oder mehrere der genannten Perspektiven auszublenden oder nur cursorisch zu behandeln. Bei einer solchen Vorgehensweise muss jedoch sichergestellt werden, dass trotzdem alle für den Schlüsselindikator relevanten Aspekte berücksichtigt werden und die oben beschriebene Problemverlagerung von einem Lebenswegabschnitt in einen anderen ausgeschlossen werden kann.

In diesem Zusammenhang wird empfohlen, sowohl für das Nanoprodukt als auch für das Referenzprodukt eine schematische Übersicht des Produktsystems aufzustellen, aus der alle relevanten Prozesse, Stoff- und Energieflüsse sowie die Wechselwirkungen zwischen den Prozessen hervorgehen (siehe folgende Abbildung).

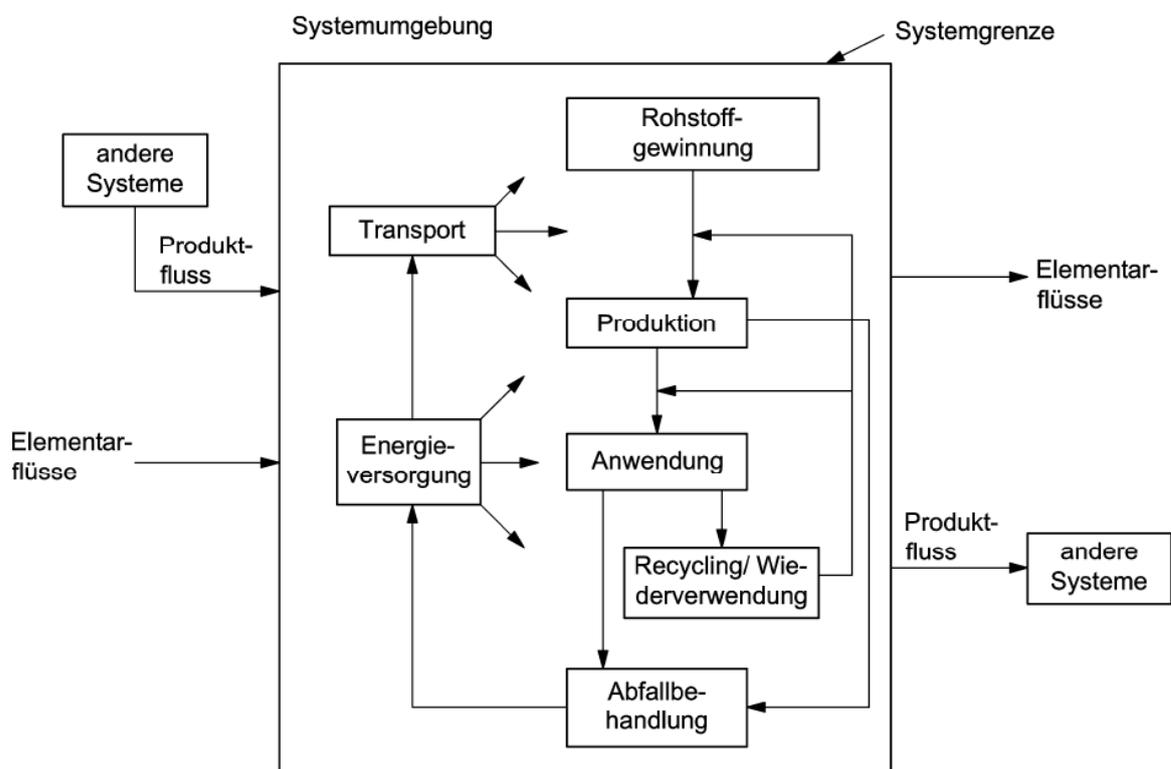


Abbildung 3: Beispiel für die Systemgrenzen eines Produktsystems (DIN EN ISO 14040)

<sup>20</sup> Die einzelnen Leitfäden befinden sich in der Anlage zu diesem Endbericht.

Die Systemgrenzen für das Nanoprodukt und das Referenzprodukt müssen so gewählt werden, dass alle Prozesse, Stoff- und Energieflüsse sowie Aspekte, die zur Erfüllung der Funktionalität (siehe Kapitel 7.2.2) des Produktsystems und für einen fairen Vergleich zwischen den beiden Alternativen relevant sind, sich innerhalb der Systemgrenzen der Untersuchung befinden. Beispielsweise sollten Energieeinsparungen während der Nutzenphase, die sich durch bestimmte Produktbestandteile ergeben, ebenso Bestandteil der Untersuchung sein wie etwaige Zusatzaufwendungen beziehungsweise Emissionen bei der Abfallbehandlung.

### **7.2.2 Funktionalität und funktionelle Einheit**

Beim Vergleich zwischen Nanoprodukt und dem Referenzprodukt ist zu beachten, dass die beiden Alternativen über die gleiche technische Funktionalität verfügen. Dieses Prinzip der funktionellen Äquivalenz ist sehr wichtig, da sonst Alternativen untersucht und bewertet würden, die nicht vergleichbar sind. Aus diesem Grund sollten die Nutzenaspekte der untersuchten Produkte zu Beginn der Untersuchung genau analysiert und benannt werden. Ausgehend von dieser Untersuchung ist dann festzulegen, bei welchen Nutzenaspekten es sich um grundlegende technische Funktionalitäten handelt und welche eher einen Zusatznutzen bilden.

Die Identifizierung der grundlegenden gemeinsamen Funktionalität der Vergleichsobjekte bildet schließlich die Basis für die Ermittlung der funktionellen Einheit. Die funktionelle Einheit stellt den quantifizierten Nutzen dar, der für Nanoprodukt und Referenzprodukt gleichermaßen Gültigkeit besitzt und durch physikalische Größen ausgedrückt werden sollte (zum Beispiel 1000 kg Endprodukt, 1000 m<sup>2</sup> behandelte Oberfläche). Diese Größe dient als Vergleichseinheit der Untersuchung und als Bezugsgröße für alle Ergebnisse der Schlüsselindikatoren.

### **7.3 Methodische Einbettung und Zuordnung der Schlüsselindikatoren**

Die beim Nano-NachhaltigkeitsCheck verwendeten Schlüsselindikatoren werden in die ursprünglich aus der Betriebswirtschaft stammende „SWOT-Analyse“ methodisch eingebettet. Die Grundlagen hierfür wurden in Kapitel 5.2 bereits erläutert. Für die Zwecke des Nano-NachhaltigkeitsChecks wurde die SWOT-Methode adaptiert. Die Stärken-Schwächen-Analyse bezieht sich im Sinne des Nano-NachhaltigkeitsChecks folglich auf die intrinsischen Eigenschaften und Potenziale des Produkts beispielsweise im Hinblick auf CO<sub>2</sub>-Einsparung und Toxikologie, während die Chancen-Risiken-Analyse auf externe (ökologische, wirtschaftliche, rechtliche und gesellschaftliche) Rahmenbedingungen abzielt. Dazu zählen Implikationen wie Hemmnisse durch rechtliche Vorschriften (zum Beispiel Produktrealisierung wird wegen unklarer Rechtslage bei Haftung nicht realisiert) oder mangelnde Recyclingfähigkeit, Verfügbarkeiten von Rohstoffen, Beschäftigungslage / Arbeitsplatzeffekte sowie gesellschaftliche Wertvorstellungen und Megatrends.

Konkret gehören zur Stärken-Schwächen-Analyse die folgenden Indikatoren:

- CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (Product Carbon Footprint)
- Energieeffizienz
- Exposition an Arbeitsplatz
- Gebrauchsnutzen
- Lebenszykluskosten
- Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt
- Störfallanalyse
- Symbolischer Nutzen

Die Chancen-Risiko-Analyse wird mittels der folgenden Indikatoren durchgeführt:

- Beschäftigungswirkung
- Gesellschaftlicher Nutzen
- Rechtliche Rahmenbedingungen und Forschungsförderung
- Recyclingfähigkeit
- Ressourcenverfügbarkeit
- Risikowahrnehmung

Innerhalb dieser beiden Gruppen erfolgt die Zuordnung der Schlüsselindikatoren je nach dem Ergebnis des Vergleichs zwischen Nano- und Referenzprodukt. Schneidet zum Beispiel das Nanoprodukt beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im Vergleich zum Referenzprodukt besser ab, handelt es sich bei diesem Schlüsselindikator um eine Stärke. Zeigen sich beispielsweise andererseits jedoch Nachteile bei der Recyclingfähigkeit, liegt bei diesem Schlüsselindikator ein Risiko vor.

In der folgenden Tabelle wird beispielhaft für ein hypothetisches Fallbeispiel die Zuordnung der Schlüsselindikatoren dargestellt.

Tabelle 4: Beispielhafte SWOT-Matrix für ein hypothetisches Fallbeispiel mit der Zuordnung der Schlüsselindikatoren zu den Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken.

Stärken	Schwächen
CO <sub>2</sub> -Fußabdruck Energieeffizienz Gebrauchsnutzen Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt Störfallaspekte Symbolischer Nutzen	Exposition am Arbeitsplatz Lebenszykluskosten
Chancen	Risiken
Beschäftigungswirkung Gesellschaftlicher Nutzen Rechtliche Rahmenbedingungen und Forschungsförderung Ressourcenverfügbarkeit	Recyclingfähigkeit Risikowahrnehmung

#### 7.4 Beschreibung der Schlüsselindikatoren der Stärken-Schwächen-Analyse im Einzelnen

Im Folgenden werden die bei der Stärken-Schwächen-Analyse verwendeten Schlüsselindikatoren charakterisiert. Für weitere Hintergrundinformationen sowie eine detaillierte Anleitung zur Erfassung der Schlüsselindikatoren wird auf die ausführlichen Leitfäden verwiesen, die im Rahmen des Projekts für jeden Schlüsselindikator erarbeitet wurden. Diese befinden sich in der Anlage zu diesem Bericht.

##### 7.4.1 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (Product Carbon Footprint)

Angesichts der vielversprechenden Potenziale und Lösungsansätze, die nanotechnologische Neuentwicklungen zu den vorhandenen Klimaschutzziele bieten (vergleiche hierzu Kapitel 3), kommt dem Schlüsselindikator „CO<sub>2</sub>-Fußabdruck“ im Rahmen des Nano-NachhaltigkeitsChecks eine besondere Bedeutung zu. Bei diesem Schlüsselindikator handelt es sich um einen quantitativen Parameter, der das Treibhausgaspotenzial des Nanoprodukts im Vergleich zum Referenzprodukt vergleichbarer Funktionalität zum Ausdruck bringt. Das Treibhausgaspotenzial bezeichnet die Bilanz aller klimarelevanten Emissionen entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produkts in einer definierten Anwendung und bezogen auf eine definierte Nutzeinheit (funktionelle Einheit).<sup>21</sup> Treibhausgas-Emissionen im Sinne dieser Definition sind all diejenigen gasförmigen Stoffe, für die vom Weltklimarat IPCC ein Koeffizient für das Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potenzial = GWP) definiert wurde. Der Lebenszyklus der Vergleichsobjekte beinhaltet dabei die gesamte Wertschöpfungskette, von Herstellung und Transport der Rohstoffe und Vorprodukte über Produktion und Distribution bis hin zur Nutzung, Nachnutzung und Entsorgung. Bezüglich

<sup>21</sup> Vgl. Grießhammer / Hochfeld; Memorandum Product Carbon Footprint, Berlin 2009

der grundsätzlichen Vorgehensweise wird auf (DIN EN ISO 14040) verwiesen. Ergänzende Informationen zur methodischen Vorgehensweise befinden sich in (PAS 2050).

Die Auswertung für den Schlüsselindikator „CO<sub>2</sub>-Fußabdruck“ entspricht der Wirkungsabschätzung einer Ökobilanz, wobei allerdings nur die Wirkungskategorie des Treibhauspotenzials ermittelt wird. In diesem Schritt werden die im Rahmen der Datenerfassung ermittelten Sachbilanzdaten klassifiziert<sup>22</sup> und charakterisiert<sup>23</sup> und zum Schlüsselindikator aggregiert. Neben einer absoluten Darstellung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks soll (sofern vorhanden) auch die relative CO<sub>2</sub>-Einsparung durch das Nanoprodukt im Vergleich zum Referenzprodukt ausgewiesen werden. Folglich führt die Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks zu folgenden beiden Ergebnissen:

1. **Absoluter CO<sub>2</sub>-Fußabdruck** des Nanoprodukts und des Referenzprodukts bezogen auf die funktionelle Einheit; die Einheit dieser Größe wird als „Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente“ (abgekürzt: kg CO<sub>2</sub>e) festgelegt.
2. **Relative CO<sub>2</sub>e-Einsparung** in der Form „1/X“, wobei „1“ für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Nanoprodukts und „X“ für die CO<sub>2</sub>e-Einsparung steht, die durch das Nanoprodukt während des Lebenszyklus im Vergleich zum Referenzprodukt erzielt werden kann; diese Größe ist dimensionslos.

Sofern die Datenbasis dies erlaubt, ist darüber hinaus bei der CO<sub>2</sub>e-Einsparung eine Hochrechnung erwünscht, die ausgehend von der CO<sub>2</sub>e-Einsparung pro funktionelle Einheit und bezogen auf das weltweite Potenzial (bei heutigen Marktdaten) durchgeführt werden sollte („Kür“). Diese Größe verfügt über die Einheit „Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente“ (abgekürzt: kg CO<sub>2</sub>e). Sofern von den Unternehmen gewünscht, kann darüber hinaus auch noch ein Marktausblick versucht werden.

Das Excel-Tool "CO<sub>2</sub>-Fußabdruck" bietet im Rahmen des "Nano-NachhaltigkeitsChecks" eine Unterstützung zur Ermittlung des Schlüsselindikators "CO<sub>2</sub>-Fußabdruck", vor allem indem es Sachbilanzdaten für einige zentral wichtige Prozesse zur Auswahl und Verwendung bereithält sowie die erforderlichen Rechenschritte zur Aggregation der Sachbilanzdaten übernimmt. Obwohl mit Hilfe dieses Werkzeugs alle Schritte zur Ermittlung des Schlüsselindikators vollzogen werden können, sollte es stets zusammen mit dem zugehörigen Leitfaden verwendet werden.

---

<sup>22</sup> Klassifizierung bedeutet die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den ausgewählten Wirkungskategorien (vergleiche DIN EN ISO 14040).

<sup>23</sup> Charakterisierung wird die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators bezeichnet. Hierfür kommen Charakterisierungsfaktoren zum Einsatz, die aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurden (vergleiche DIN EN ISO 14040).

## 7.4.2 Energieeffizienz

Der Schlüsselindikator „Energieeffizienz“ stellt einen quantitativen Parameter dar, der den Kumulierten Energieaufwand des Nanoprodukts im Vergleich zum Referenzprodukt vergleichbarer Funktionalität und bezogen auf eine definierte Nutzeinheit (funktionelle Einheit) zum Ausdruck bringt. Der Kumulierte Energieaufwand (KEA) ist die Summe aller während des Lebenszyklus von Nano- und Referenzprodukt auftretenden Primärenergieinputs, inklusive der zur Materialherstellung.

Der Lebenszyklus der Vergleichsobjekte beinhaltet dabei die gesamte Wertschöpfungskette, von Herstellung und Transport der Rohstoffe und Vorprodukte über Produktion und Distribution bis hin zur Nutzung, Nachnutzung und Entsorgung.

Gemäß dem ökonomischen Minimalprinzip wird unter Maximierung der Energieeffizienz verstanden, dass die funktionelle Einheit mit möglichst wenig Energieeinsatz realisiert wird.

Für alle innerhalb der Systemgrenzen identifizierten und relevanten Endenergiemengen, Energieträger, Stoffe, Dienstleistungen und Transporte müssen die jeweiligen Primärenergieinhalte ermittelt werden. Die dafür erforderlichen spezifischen KEA-Daten (zum Beispiel MJ Primärenergie / kWh Elektrizität) können entsprechenden Datenbanken, zum Beispiel GEMIS<sup>24</sup> entnommen werden.

Je nach Ressourcenquelle werden die ermittelten Primärenergieinhalte eine der folgenden drei Komponenten des Kumulierten Energieaufwandes zugeordnet:

- $KEA_{\text{nicht-erneuerbar}}$ : Summe des Kumulierten Energieaufwands aus fossilen und nuklearen Quellen;
- $KEA_{\text{erneuerbar}}$ : Summe des Kumulierten Energieaufwands aus erneuerbaren Quellen sowie
- $KEA_{\text{andere}}$ : Summe des Kumulierten Energieaufwands aus energetisch genutzten Reststoffen (zum Beispiel Abfall).

Aus Sicht der Ressourcen spiegelt der Gesamt-KEA (das heißt die Summe des gesamten Kumulierten Energieaufwandes, unabhängig vom jeweiligen Energieträger) keine Knappheiten wider, vor allem weil auch erhebliche Anteile regenerativer und recycelter Energie enthalten sein können. Daher wird im Rahmen der gewählten Zielstellung für die Ermittlung der Energieeffizienz der  $KEA_{\text{nicht-erneuerbar}}$  herangezogen. Neben einer absoluten Darstellung der Energieeffizienz soll (sofern vorhanden) auch die Energieeinsparung durch das Nanoprodukt im Vergleich zum Referenzprodukt ausgewiesen werden. Folglich führt die Ermittlung der Energieeffizienz zu folgenden beiden Ergebnissen:

<sup>24</sup> GEMIS ist eine öffentlich zugängliche Datenbank für Energiesysteme, Stoffe und Dienstleistungen, online abrufbar unter [www.gemis.de](http://www.gemis.de).

1. **Absolute Energieeffizienz** des Nanoprodukts und des Referenzprodukts bezogen auf die funktionelle Einheit; die Einheit dieser Größe wird als „Megajoule“ (abgekürzt: MJ) festgelegt.
2. **Energieeinsparung** in der Form „1/X“, wobei „1“ für die Energieeffizienz des Nanoprodukts und „X“ für die Energieeinsparung steht, die durch das Nanoprodukt während des Lebenszyklus im Vergleich zum Referenzprodukt erzielt werden kann; diese Größe ist dimensionslos.

Sofern die Datenbasis dies erlaubt, ist darüber hinaus bei der Energieeffizienz eine Hochrechnung erwünscht, die ausgehend von der Energieeinsparung pro funktionelle Einheit und bezogen auf das weltweite Potenzial (bei heutigen Marktdaten) durchgeführt werden sollte („Kür“). Diese Größe verfügt über die Einheit „Megajoule“ (abgekürzt: MJ). Sofern von den Unternehmen gewünscht, kann darüber hinaus auch noch ein Marktausblick versucht werden.

Das Excel-Tool „Energieeffizienz“ bietet analog dem Excel-Tool für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eine Unterstützung zur Ermittlung des Schlüsselindikators "Energieeffizienz", vor allem indem es Sachbilanzdaten für einige zentral wichtige Prozesse zur Auswahl und Verwendung bereithält sowie die erforderlichen Rechenschritte zur Aggregation der Sachbilanzdaten übernimmt.

### 7.4.3 Exposition an Arbeitsplatz

Mit dem Schlüsselindikator „Exposition am Arbeitsplatz“ wird analysiert, ob bei der Herstellung des Nanoprodukts zum erforderlichen Schutz der Arbeitnehmer beziehungsweise zur Vorsorge ein höherer, ein vergleichbarer oder ein geringerer relativer Aufwand betrieben werden muss als bei der Herstellung des Referenzprodukts. Entscheidend für den Aufwand und die damit entstehenden Kosten sind die Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung, also das Gefährdungspotenzial, insbesondere aber die daraus abgeleiteten Schutzvorkehrungen und Maßnahmen zur Überwachung, wobei die entstehenden Kosten in Relation zu den Gesamtkosten für Bau und Betrieb der jeweiligen Anlage stehen und entsprechend zu beurteilen sind.

Da eine Abschätzung des Aufwandes für Arbeitsschutzmaßnahmen auf der absoluten Kostenebene generell schwierig ist, wird eine semi-quantitative Bestimmung vorgenommen.

Entscheidend für die Betrachtung ist der Aufwand für die erforderlichen Schutz- und Überwachungsmaßnahmen, der anhand von Leitfragen in den folgenden Bereichen abzuschätzen ist:

- Technische Maßnahmen;
- Organisatorische Maßnahmen;
- Persönliche Schutzausrüstungen;

- Überwachungsmaßnahmen.

Beispielsweise werden im Bereich der technischen Maßnahmen folgende Aspekte betrachtet:

- Aufwand / Kosten für die Substitution gefährlicher Stoffe und Materialien durch solche mit geringeren gesundheitlichen Gefährdungen
- Aufwand / Kosten für die Substitution von Verfahren / Arbeitsschritten durch solche mit geringeren Gefährdungen
- Aufwand / Kosten für den Einsatz geschlossener und / oder gekapselter Anlagen und Anlagenteile
- Aufwand / Kosten für das Aufstellen und Betreiben von Quellenabsaugungen mit anschließender Reinigung der Abluft.

Als jeweilige Ergebnis wird ein Wert zwischen -3 und +3 ermittelt und angegeben, wobei eine Null der „Exposition am Arbeitsplatz“ des Referenzprodukts entspricht, ein positiver Wert einen Vorteil gegenüber dem Referenzprodukt ausweist und ein negativer Wert einen entsprechenden Nachteil. Die jeweils vorgenommenen Einschätzungen müssen begründet werden.

#### 7.4.4 Gebrauchsnutzen

Im Rahmen des Schlüsselindikators „Gebrauchsnutzen“ wird für das analysierte Produkt dargestellt, ob sich über die definierte funktionelle Einheit hinaus weitere Unterschiede im unmittelbaren Produktnutzen feststellen lassen. Bezugspunkt für die Diskussion der Nutzenaspekte ist dabei das jeweilige, durch die funktionelle Einheit definierte Endprodukt. Als zentrale Kriterien sollten für diesen Indikator in jedem Fall diskutiert werden:

- Welche Zusatzleistung wird durch das Nanoprodukt zur Verfügung gestellt?
- Wie stellt sich die Haltbarkeit des Nanoprodukts im Vergleich zum Referenz-Produkt dar?
- Ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der Zuverlässigkeit in der Funktion?
- Sind Unterschiede hinsichtlich der Produktsicherheit vorhanden?
- Ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der Instandhaltbarkeit des Produkts?
- Wie stellt sich die Bedarfsgerechtigkeit des Nanoprodukts im Vergleich zu seinem Referenzprodukt dar?
- Ergeben sich für den Nutzer Komfortunterschiede?
- Stehen dem Nutzer gute Kundeninformationen zur Verfügung?

Weitere Kriterien können produktspezifisch ergänzt werden.

Für die Analyse der einzelnen Kriterien ist soweit möglich auf standardisierte Messverfahren beziehungsweise Qualitätssicherungssysteme zurückzugreifen. Liegen für einzelne Kriterien entsprechende nationale oder internationale Normen oder Richtlinien vor (beispielsweise zur

Haltbarkeit oder Zuverlässigkeit), so ist auf diese Bezug zu nehmen. Liegen im Einzelfall (noch) keine entsprechenden Daten vor, kann eine Einschätzung auf Basis einer knappen qualitativen Beschreibung erfolgen. Dies ist entsprechend auszuweisen.

Die vom jeweiligen Unternehmen erarbeitete Darstellung zu den oben genannten Einzelkriterien wird schließlich einer semi-quantitativen Gesamteinschätzung unterzogen. Hierzu ist sowohl eine Betrachtung der einzelnen Kriterien für das Nanoprodukt im Vergleich zum definierten Referenzprodukt wie eine produktspezifische Wichtung der einzelnen Kriterien erforderlich.

Auf Basis einer qualitativen und/oder bereits quantitativen Beschreibung zu den einzelnen Untersuchungskriterien wird durch das Unternehmen eine quantitative Einordnung des einzelnen Kriteriums auf einer Skala von -3 bis +3 vorgenommen. Dabei entspricht bei einem Wert „Null“ der jeweilige Nutzenaspekt des Nanoprodukts demjenigen des Referenzprodukts. Positive Werte weisen Vorteile gegenüber dem Referenzprodukt aus (leichter Vorteil, Vorteil, erheblicher Vorteil), negative Werte entsprechende Nachteile.

Darüber hinaus wird eine Wichtung der verschiedenen analysierten Kriterien für diesen Indikator vorgeschlagen. Hierfür soll zunächst von einer einheitlichen Wichtung aller Kriterien mit dem numerischen Wert 1 ausgegangen werden. Sofern die Unternehmen jedoch eine abweichende Bedeutung einzelner Kriterien für das analysierte Nanoprodukt identifizierten, kann diesem durch eine geänderte Wichtung des jeweiligen Kriteriums Rechnung getragen werden. Für eine geänderte Wichtung ist jeweils produkt- und kriterienspezifisch eine Begründung anzugeben. Dabei kann entweder davon ausgegangen werden, dass das Kriterium für das betrachtete Produkt nicht relevant ist (dann ist auch keine weitere Betrachtung für dieses Kriterium erforderlich), oder dass das Kriterium eine hohe Bedeutung für das spezifische Produkt aufweist (dann kann der Wichtungsfaktor verdoppelt werden).

Für die Auswertung des Schlüsselindikators „Gebrauchsnutzen“ steht das Excel-Tool „Nano-Benegrade“ zur Verfügung, mit dessen Hilfe alle Schlüsselindikatoren zu den Nutzenaspekten ermittelt werden.

#### **7.4.5 Lebenszykluskosten**

Die Lebenszykluskosten werden definiert als die Berechnung und Bewertung aller Kosten (ausgedrückt in Euro und bezogen auf die funktionelle Einheit), die mit einem bestimmten Produkt verbunden sind und direkt durch einen oder mehrere Akteure im Lebenszyklus dieses Produkts getragen werden (siehe Hunkeler et al. 2008). Eine solche Berechnung ist – im Gegensatz zur isolierten Betrachtung des Anschaffungs- beziehungsweise Investitionspreises – insbesondere bei Produkten sinnvoll, bei denen ein bedeutender Anteil der Kosten während der Nutzungsphase oder Entsorgung des analysierten Produkts auftritt.

Die methodischen Grundlagen für die Durchführung von Lebenszykluskostenanalysen sind für unterschiedliche Anwendungen in verschiedenen internationalen und nationalen Stan-

dards und Richtlinien verankert (vergleiche zum Beispiel ISO 15663-2:2001). Einige Aspekte werden auch von konventionellen Methoden der Investitionskostenrechnung behandelt.

Da im Rahmen des Nano-NachhaltigkeitsChecks die Nachhaltigkeitsaspekte durch nanotechnologische Anwendungen im Vordergrund stehen, wird empfohlen, die Lebenszykluskosten nicht aus Entwicklerperspektive, sondern aus der Perspektive der Konsumenten zu ermitteln. Dies können je nach untersuchtem Fallbeispiel die Endkonsumenten oder aber auch Kunden aus dem B2B-Bereich<sup>25</sup> sein.

Bei den einzelnen Kostenelementen ist bedeutsam, wann diese anfallen. So werden beispielsweise zukünftige Kosten in der Regel geringer bewertet als aktuelle Kosten.<sup>26</sup> Aus diesem Grund müssen alle Kosten bezüglich ihres zeitlichen Anfalls und entsprechend auf- oder abgezinst werden (Diskontierung). Der Diskontsatz sollte so gewählt werden, dass er die reale Situation am ehesten widerspiegelt. Von der zeitlichen Bewertung der Kosten kann folglich nur dann abgesehen werden, wenn im Laufe der Nutzungsphase oder zum Zeitpunkt der Entsorgung keine weiteren Kosten entstehen oder die dadurch resultierenden Beträge im Vergleich zu anderen Kostenfaktoren sehr gering ausfallen.

Die Berücksichtigung der Diskontierung erfolgt bei der Berechnung der Lebenszykluskosten mit Hilfe der Kapitalwert- beziehungsweise der Annuitätenmethode. Bei beiden Methoden schneidet diejenige Alternative am besten ab, die den geringsten Wert aufweist, die also entweder den geringsten Kapitalwert oder die geringste Annuität hat. Die Ergebnisse können sich jedoch unterscheiden, je nachdem, ob die untersuchten Alternativen die gleiche Nutzungsdauer haben oder nicht:

- Haben Nanoprodukt und Referenzprodukt die gleiche Nutzungsdauer, so erhält man mit beiden Methoden das gleiche Ergebnis – somit weist die gleiche Alternative bei beiden Methoden den geringsten Wert auf. Die erhaltenen absoluten Ergebnisse sind jedoch unterschiedlich.
- Haben Nanoprodukt und Referenzprodukt (teilweise) eine unterschiedliche Lebens- / Nutzungsdauer, so liefert die Annuitätenmethode die aussagekräftigeren Ergebnisse, wenn gleichzeitig davon ausgegangen wird, dass nach Ende der Nutzungsdauer eine Reinvestition erfolgt. Der Aspekt einer unterschiedlichen Lebens- / Nutzungsdauer zwischen den Vergleichsobjekten kann beim Nano-NachhaltigkeitsCheck besonders relevant werden: Dabei ist es zum einen möglich, dass das Nanoprodukt (zum Beispiel aufgrund einer Oberflächenveredelung) eine höhere Lebensdauer als das Referenzprodukt aufweist; ebenso ist aber auch der umgekehrte Fall denkbar, wenn

<sup>25</sup> Business-to-Business-Bereich

<sup>26</sup> Dies begründet sich daraus, dass Geld, das sofort aufgebracht werden muss, entweder nicht anderweitig (das heißt in der Regel gewinnbringend) angelegt werden kann, oder umgekehrt als Kredit aufgenommen werden muss, für den Zinsen bezahlt werden müssen.

das Nanoprodukt wegen eines vorzeitigen Verlusts seiner Funktionalität (zum Beispiel infolge Abnutzung und Verschleiß) eine geringere Lebensdauer aufweist.

Für die Berechnung steht ein Excel-Tool zur Verfügung, welches die Diskontierung und die Kapitalwerte (beziehungsweise Annuitäten) für Nano- und Referenzprodukt automatisch berechnet.

#### **7.4.6 Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt**

Der Schlüsselindikator „Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt“ analysiert, ob es durch den Einsatz der untersuchten Nanomaterialien und/oder nano-haltigen Produkte zu einem Risiko für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt kommen kann. Darüber hinaus wird untersucht, ob die Verwendung des Nanoprodukts beziehungsweise -materials zu einer Vermeidung gesundheits- und umweltgefährlicher Stoffe führt, so dass dem Nanoprodukt/Material im Vergleich zum nano-freien Referenzprodukt Entlastungspotenziale im Gesundheits- und Umweltschutz zugeschrieben werden können.

Für die Risikoabschätzung im Human- und Umweltbereich wird eine semi-quantitative Bestimmung vorgeschlagen, die sich an dem Vorsorgeraster für synthetische Nanomaterialien des Schweizer Bundesamtes für Gesundheit anlehnt (vergleiche Höck et al. 2011). Auf Basis einer begrenzten Anzahl von Analyseparametern werden die Risikopotenziale für Arbeitnehmer, Verbraucher und Umwelt abgeschätzt und in Form eines Zahlenwertes dargestellt, welcher zu einer Einstufung in verschiedene (Risiko-)Klassen führt. Aus dieser Einstufung leitet sich dann gegebenenfalls ein Vorsorgebedarf ab.

Dabei wird der Vorsorgebedarf in Abhängigkeit vom Wirkungs- beziehungsweise Gefährdungspotenzial auf der einen Seite und von der potenziellen Exposition des Menschen oder dem Eintrag in die Umwelt auf der anderen Seite dargestellt:

- Das Wirkungs- beziehungsweise Gefährdungspotenzial wird über die Parameter Reaktivität und Stabilität der Nanomaterialien abgeschätzt.
- Die Wahrscheinlichkeit und das Ausmaß einer Exposition (= potenzielle Exposition) von Menschen (Arbeiter und Verbraucher) werden über Angaben zur physikalischen Umgebung der Nanopartikel (das heißt Luft, flüssige Medien oder feste Matrix) sowie der Masse und Häufigkeit eines Kontaktes mit den Nanopartikeln ermittelt.
- Der potenzielle Eintrag in die Umwelt über Abluft, Abwasser oder (un)spezifische Entsorgung während der Produktions- und Gebrauchsphase wird über die Masse an entsorgten Nanopartikeln oder über die Gesamtmenge der Nanopartikel in vermarkteten Gebrauchsprodukten ermittelt.

Neben den Parametern für das Wirkungspotenzial und die Exposition werden auch Parameter für „Spezifische Rahmenbedingungen“ berücksichtigt: Diese umfassen zum einen die Größenordnung der Primärpartikel, die Bildung von Agglomeraten sowie eine mögliche Deagglomeration unter physiologischen und Umweltbedingungen. Zum anderen wird da-

runter der Informationsstand über die Herkunft der Ausgangsmaterialien sowie über den weiteren Lebensweg der Nanomaterialien bewertet.

Falls im Referenzprodukt gefährliche Stoffe enthalten sind, deren Einsatz durch Verwendung des Nanoproduktes/Materials vermieden beziehungsweise ersetzt werden kann, so wird diese Vermeidung oder Substitution gefährlicher Stoffe als Zusatzindikator bewertet und qualitativ beschrieben.

Mittels der Klassierung wird der jeweilige vorsorgliche Handlungsbedarf aufgezeigt. Daraus ergibt sich auch die Einordnung in die Nano-SWOT-Matrix:

- **Klasse A:** Die nanospezifischen Risiken können auch ohne Vorliegen weiterer Risikoabklärungen der Nanomaterialien als gering eingestuft werden.
- **Klasse B:** Mögliche nanospezifische Risiken sind nicht auszuschließen. Weiterführende Risikoabklärungen oder gegebenenfalls Risikoreduktionsmaßnahmen bezüglich Herstellung, Gebrauch und Entsorgung sind im Sinne der Vorsorge erforderlich.

Kommt die Einschätzung im Rahmen der Analyse zum Schluss, dass ein Vorsorgebedarf besteht (Einordnung in Klasse B), ist dieser Schlüsselindikator im Rahmen der Nano-SWOT-Matrix den Schwächen zuzuordnen, ansonsten wird er den Stärken zugerechnet.

#### 7.4.7 Störfallaspekte

Der Schlüsselindikator „Störfallaspekte“ bezeichnet ein semi-quantitatives Verfahren zur Abschätzung des Störfallpotenzials bei der Herstellung des Nanoprodukts. Unter „Störfall“ wird hier in Anlehnung an die Störfallverordnung ein Ereignis, wie zum Beispiel eine Emission, ein Brand oder eine Explosion größeren Ausmaßes verstanden, das sich aus einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs ergibt und das innerhalb oder außerhalb des Betriebsbereichs oder der Anlage zu einer ernststen Gefahr führt.

Das Verfahren baut in wesentlichen Teilen auf den bereits im Rahmen des Indikators „Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt“ vorgenommenen Untersuchungen auf. Ausgangsbasis für die Abschätzungen zum Störfallpotenzial stellt das „Vorsorgeraster für synthetische Nanomaterialien“ dar, welches auch dem Indikator „Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt“ zugrunde liegt. Im Rahmen des hier untersuchten Indikators bestehen jedoch Unterschiede bei der Bestimmung der möglichen Exposition des Menschen im Rahmen von Störfällen. Dabei wird zwischen Arbeitnehmern und der Bevölkerung unterschieden. Auswirkungen auf die Umwelt werden zurzeit noch nicht betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass ein seltener störfallbedingter Eintrag von Nanomaterialien in die Umwelt immer noch gering gegenüber einer (unkontrollierten) Freisetzung über die Produkte / Abfallströme ist.

Die Auswertung für den Schlüsselindikator „Störfallaspekte“ orientiert sich am Vorgehen im Vorsorgeraster für synthetische Nanomaterialien, wird aber durch störfallspezifische Aspekte

ergänzt beziehungsweise abgewandelt. Beispielsweise wird die Wahrscheinlichkeit und das Ausmaß einer Exposition von Menschen (Arbeitnehmern und Bevölkerung) über Angaben zur physikalischen Umgebung der Nanopartikel (das heißt Luft, flüssige Medien oder feste Matrix) sowie weiteren Parametern (Vorhandensein störfallauslösender Bedingungen, betroffene Masse, Anzahl betroffener Arbeitnehmer, Freisetzung, Entfernung zur Bevölkerung) ermittelt. Bezüglich der Vorgehensweise wird an dieser Stelle aus Platzgründen auf den zugehörigen Leitfaden verwiesen. Die Abschätzung erfolgt mit Hilfe eines Excel-Tools „Störfallraster“ und hat eine Punktzahl zum Ergebnis. Entsprechend dem Vorgehen im „Vorsorgeraster für synthetische Nanomaterialien“ wird für eine Punktzahl bis einschließlich 20 eine Zuordnung in Klasse A, in allen anderen Fällen in Klasse B vorgenommen:

- **Klasse A:** Die nanospezifischen Risiken können auch ohne Vorliegen weiterer Risikoabklärungen als gering eingestuft werden.
- **Klasse B:** Mögliche störfallspezifische Risiken sind nicht auszuschließen. Weiterführende Risikoabklärungen oder gegebenenfalls Risikoreduktionsmaßnahmen sind im Sinne der Vorsorge erforderlich.

Kommt die Einschätzung im Rahmen der Analyse zum Schluss, dass ein Vorsorgebedarf besteht (Einordnung in Klasse B), ist dieser Schlüsselindikator im Rahmen der SWOT-Analyse den Schwächen zuzuordnen, ansonsten kann er den Stärken zugerechnet werden.

#### 7.4.8 Symbolischer Nutzen

Im Rahmen des Schlüsselindikators „Symbolischer Nutzen“ wird für das analysierte Produkt dargestellt, ob sich über die definierte „funktionelle Einheit“ hinaus weitere Unterschiede im Produktnutzen, feststellen lassen, die in der Regel nicht messbarer beziehungsweise unmittelbar quantifizierbarer Natur sind. Dabei wird anerkannt, dass der Nutzen eines Produktes nicht nur aus seiner eigentlichen Funktion (Gebrauchsnutzen) besteht, sondern oftmals weitere Faktoren über die Zufriedenheit oder Unzufriedenheit mit einem Produkt entscheiden. Ein möglicher Zusatznutzen kann auf dem Image von Produkten oder Unternehmen basieren – und stellt damit keinen Gebrauchsnutzen, sondern einen symbolischen Nutzen dar.

Der symbolische Nutzen wird über das Produkt und seine Vermarktung transportiert und löst Gefühle oder Stimmungen aus wie Prestige, Identitätsstiftung oder Freude am Produkt. Als zentrale Kriterien sollten daher für diesen Indikator in jedem Fall diskutiert werden:

- Eröffnen sich neue Möglichkeiten im Bereich des Produktdesigns (Äußere Erscheinung, Geschmack, Haptik, Akustik oder ähnliches)?
- Trägt das Produkt zur Prestigebildung bei?
- Vermittelt das Produkt besonderen Genuss, Vergnügen, Freude beziehungsweise hat es einen hohen Erlebniswert?

Weitere Kriterien können produktspezifisch ergänzt werden.

Wie beim Schlüsselindikator „Gebrauchsnutzen“ wird auf Basis der vom jeweiligen Unternehmen erarbeiteten Darstellung zu den oben genannten Einzelkriterien eine semi-quantitative Gesamtbetrachtung durchgeführt (vgl. Kapitel 7.4.4, Einzelheiten zur Vorgehensweise siehe dort). Die Auswertung erfolgt daher ebenfalls mittels des Excel-Tools „Nano-Benegrade“.

## 7.5 Beschreibung der Schlüsselindikatoren Chancen-Risiko-Analyse im Einzelnen

Im Folgenden werden die bei der Chancen-Risiko-Analyse verwendeten Schlüsselindikatoren beschrieben. Wie schon bei den Schlüsselindikatoren der Stärken-Schwächen-Analyse erwähnt, befinden sich weitere Hintergrundinformationen sowie eine detaillierte Anleitung zur Erfassung in den Leitfäden, die im Rahmen des Projekts für jeden Schlüsselindikator erarbeitet wurden. Diese können der Anlage zu diesem Bericht entnommen werden.

### 7.5.1 Beschäftigungswirkung

Im Rahmen der wirtschaftlichen und sozialen Bewertung von neuen Technologien beziehungsweise neuen Produkten / Dienstleistungen nimmt die Schaffung neuer und die Sicherung bestehender Arbeitsplätze (positive Beschäftigungswirkung) als Indikator eine wichtige Rolle ein. Im Vordergrund stehen dabei häufig die Schaffung oder der Erhalt so genannter direkter und indirekter Arbeitsplätze, die über einen multiplikativen Prozess von den Geldzahlungen (zum Beispiel für Löhne, Investitionen et cetera) mit der wirtschaftlichen Entwicklung der Technologie beziehungsweise dem Produkt / der Dienstleistung verknüpft werden können.

Die Ermittlung der Beschäftigungswirkung als Schlüsselindikator im Rahmen der Nachhaltigkeitsbetrachtung von Nanoprodukten beschränkt sich auf die direkten Beschäftigungswirkungen und berücksichtigt nur die Bruttoeffekte,<sup>27</sup> indirekte Wirkungen und Nettoeffekte<sup>28</sup> werden nicht berücksichtigt.

---

<sup>27</sup> Darunter sind alle im Zusammenhang mit der Herstellung des Nanoprodukts verbundenen Arbeitsplätze zu verstehen.

Beim Schlüsselindikator „Beschäftigungswirkung“ handelt es sich um einen quantitativen Indikator, der die Anzahl der Stammbeschäftigten beschreibt, die mit einem Nanoprodukt und dem Referenzprodukt pro funktionelle Einheit des Nanoprodukts beschäftigt sind. Zu erfassen ist die Anzahl der in einem Unternehmen/Konzern tätigen Mitarbeiter/-innen, die mit der Forschung und Entwicklung (FuE), Herstellung, Vermarktung, dem Vertrieb von nanotechnologischen Komponenten und Produkten (Nanoprodukt) ausschließlich oder zumindest überwiegend beschäftigt sind. Die vorgenannten Zahlen sind bezogen auf die funktionelle Produkteinheit anzugeben. Der Indikator umfasst in vorgenannter Weise auch die Anzahl der Stammbeschäftigten bei den vor- und nachgelagerten Unternehmen in der Wertschöpfungskette.

Es wird davon ausgegangen, dass die Erfassungstiefe beim eigenen Unternehmen größer sein wird als in den vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsketten. Im eigenen Unternehmen sind alle Beschäftigten zu erfassen, die mit der Forschung und Entwicklung (FuE), Herstellung, Vermarktung und dem Vertrieb im gesamten Unternehmen beziehungsweise Konzern ausschließlich oder überwiegend tätig sind. Sind Beschäftigte nicht nur mit der Herstellung oder Entwicklung von Nanoprodukten betraut, sondern stellen auch andere Produkte her, zum Beispiel in unterschiedlichen Produktionszyklen, so werden sie trotzdem erfasst, wenn die Tätigkeit im Zusammenhang mit dem untersuchten Nanoprodukt mehr als die Hälfte ihrer Arbeitszeit ausmacht. Die Beschäftigtenzahl ist auf die funktionelle Einheit des hergestellten Produkts zu beziehen, zum Beispiel pro Tonne oder Stück hergestelltes Nanoprodukt.

Neben der Abschätzung der absoluten Beschäftigung in einem Unternehmen beziehungsweise Konzern ist auch die Dynamik der Beschäftigungsentwicklung von großem Interesse, um Aussagen über die Entwicklung der von der Nanotechnologie abhängigen Arbeitsplätze treffen zu können. Dabei sind sowohl die in der Vergangenheit bereits erfolgte Entwicklung als auch die potenziellen Aussichten für die Zukunft von Interesse.

Die „Beschäftigungswirkung“ ist in den Bereich „Chance“ einzustufen, wenn die Nettobeschäftigung (gemessen in Vollzeitstellen pro funktionelle Einheit) im Untersuchungszeitraum gleich geblieben oder gestiegen ist. Von einer Chance ist auch dann auszugehen, wenn in einem (neuen) Geschäftsfeld zu Beginn des Untersuchungszeitraums eine hohe Beschäftigung vorliegt, die dann aber rückläufig ist, wie möglicherweise bei reinen Forschungsunternehmen zu Nanoprodukten ohne eine anschließende Vermarktung dieser Produkte. Andernfalls soll der Indikator im Rahmen der SWOT-Analyse in den Bereich „Risiko“ eingestuft werden.

---

<sup>28</sup> Im Gegensatz zum Bruttoeffekt berücksichtigt der Nettoeffekt, dass durch den Einsatz der Nanotechnologien andere Technologien und Produkte ersetzt werden, so dass gegebenenfalls Arbeitsplätze an anderer Stelle in einem Unternehmen oder in der Wertschöpfungskette entfallen.

### 7.5.2 Gesellschaftlicher Nutzen

Der Schlüsselindikator „Gesellschaftlicher Nutzen“ analysiert, ob das betrachtete Produkt einen signifikanten Einfluss auf ein gesellschaftlich relevantes Themenfeld aufweist. Insgesamt sind in die Betrachtung mit besonderem Schwerpunkt solche Aspekte aufzunehmen, die sich auf die Verwendung von Nanomaterialien beziehungsweise Nanotechnologien als „enabling technology“ zurückführen lassen. Dabei sind folgende Kriterien grundsätzlich zu diskutieren:

- Bekämpfung von Armut, Hunger und Fehlernährung,
- Förderung von Gesundheit,
- Förderung von Bildung und Information,
- Förderung der wirtschaftlichen Stabilität,
- Schonung knapper Ressourcen,
- Sonstige Umweltentlastungseffekte,
- Beachtung Generationengerechtigkeit und Demographischer Wandel,
- Friedensentwicklung und Gewaltfreiheit.

Weitere Kriterien können produktspezifisch ergänzt werden.

Die vom jeweiligen Unternehmen erarbeitete Darstellung zu den oben genannten Einzelkriterien wird in einem weiteren Schritt einer semi-quantitativen Gesamtbetrachtung zugeführt. Hierzu sind sowohl eine Analyse der Auswirkungen des nanotechnologischen Produkts im Vergleich zum definierten Referenzprodukt wie eine produktspezifische Wichtung der einzelnen Kriterien erforderlich.

Auf Basis der qualitativen Beschreibung der Untersuchungskriterien wird durch das Unternehmen eine vorläufige quantitative Einordnung des einzelnen Kriteriums auf einer Skala von -3 bis 3 vorgenommen, wobei eine Null dem gesellschaftlichen Nutzen des Referenzprodukts entspricht und positive Werte Vorteile gegenüber dem Referenzprodukt ausweisen (leichter Vorteil, Vorteil, erheblicher Vorteil), negative Werte entsprechende Nachteile.

Darüber hinaus wird eine Wichtung der verschiedenen analysierten Kriterien für diesen Indikator vorgeschlagen. Hierfür soll zunächst von einer einheitlichen Wichtung aller Kriterien mit dem numerischen Wert 1 ausgegangen werden. Sofern die Unternehmen jedoch eine abweichende Bedeutung einzelner Kriterien für das analysierte Nanoprodukt identifizierten, kann diesem durch eine geänderte Wichtung des jeweiligen Kriteriums Rechnung getragen werden. Für eine geänderte Wichtung ist jeweils produkt- und kriterienspezifisch eine Begründung anzugeben. Dabei kann entweder davon ausgegangen werden, dass das Kriterium für das betrachtete Produkt nicht relevant ist (dann ist auch keine weitere Betrachtung für dieses Kriterium erforderlich), oder dass das Kriterium eine hohe Bedeutung für das spezifische Produkt aufweist (dann kann der Wichtungsfaktor verdoppelt werden).

### 7.5.3 Rechtliche Rahmenbedingungen und Forschungsförderung

Der Schlüsselindikator „Rechtliche Rahmenbedingungen und Forschungsförderung“ soll Aufschluss darüber geben, wie die Förderbedingungen für das untersuchte Nanoprodukt im nationalen und europäischen Umfeld sind. Es soll ermittelt werden, ob das untersuchte Nanoprodukt bereits auf günstige Förderbedingungen zugreifen kann oder welche Defizite bei den Förderbedingungen von Nanoprodukten existieren.

Der Schlüsselindikator beschreibt vorwiegend qualitativ die Förderbedingungen für ein bestimmtes Nanoprodukt in den folgenden drei Bereichen:

- Unternehmenseigene Förderung der Forschung, Entwicklung und Anwendung zum untersuchten Nanoprodukt;
- Staatliche Förderprogramme in Deutschland und der EU zur Forschung, Entwicklung und Anwendung für das untersuchte Nanoprodukt;
- Rechtliche Rahmenbedingungen für die Forschung, Entwicklung und Herstellung von Nanoprodukten in Deutschland.

Die Betrachtung soll zunächst in jedem der vorgenannten Bereiche getrennt durchgeführt werden. Dabei soll aus der Sicht des Unternehmens verbal-argumentativ die Entwicklung in den zurückliegenden fünf Jahren (hier: 2005 bis 2010) bezogen auf das konkrete Nanoprodukt beschrieben werden. Beispielsweise sind im Bereich „rechtliche Rahmenbedingungen“ folgende Leitfragen zu diskutieren:

- Wie schätzen Sie zurzeit die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Forschung und Entwicklung sowie Herstellung ihres Nanoprodukts in Deutschland ein?
- Wie haben sich die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Forschung und Entwicklung sowie Herstellung des Nanoprodukts in Deutschland von 2005 bis 2010 entwickelt?
- Welches sind aus Ihrer Sicht die größten Hemmnisse bei den rechtlichen Rahmenbedingungen für die Forschung und Entwicklung sowie die Herstellung des Nanoprodukts in Deutschland?
- Sehen Sie bei den folgenden Punkten:
  - Standardisierung von Prüf- und Testmethoden für die Beschreibung des Nanomaterials;
  - behördliche Genehmigungen und Auflagen für die Forschung und das Produktionsverfahren;
  - Herstellerhaftung (vertragliche Absicherung in der Herstellerkette) sowie
  - Umwelthaftung und Produzentenhaftung

schlechtere beziehungsweise bessere Bedingungen für das Nanoprodukt gegenüber einem Vergleichsprodukt ohne Nanomaterialien und worin liegen eventuelle Unterschiede?

Die (positive, gleichbleibende oder negative) Entwicklung ist jeweils zu begründen. Die qualitativen Aussagen sollen soweit wie möglich mit quantitativen Angaben unterlegt werden, zum Beispiel hinsichtlich der Förderhöhe oder Gewichtung von Nachhaltigkeitsfragen bei der Gewährung eines Förderprogramms.

Anschließend wird in einem verbal-argumentativen Gesamtergebnis eingeschätzt, ob und warum die rechtlichen Rahmenbedingungen und die Forschungsförderung für das Nanoprodukt aus Sicht des Unternehmens als Chance oder als Risiko zu sehen sind.

#### **7.5.4 Recyclingfähigkeit**

Mit dem Schlüsselindikator „Recyclingfähigkeit“ wird untersucht, ob zwischen dem Nano- und dem Referenzprodukt Unterschiede hinsichtlich bestimmter Eigenschaften und/oder Inhaltsstoffe bestehen beziehungsweise erwartet werden können, die eine hochwertige Entsorgung behindern oder unmöglich machen könnten. Dabei wird eine semi-quantitative Bestimmung durchgeführt. Konkret wird anhand der folgenden Leitfragen untersucht, ob ein Produkt/Abfall beispielsweise Eigenschaften besitzt, die

- zu Problemen und/oder hohem Aufwand bei der Trennung von anderen Stoffen/ Materialien des jeweiligen Produkts/Abfalls führen,
- Probleme und/oder hohen Aufwand bei der Trennung des jeweiligen Produkts/Abfalls von anderen Produkten/Abfällen verursachen, falls diese zusammen anfallen oder eingesammelt werden und nicht gemeinsam entsorgt (zum Beispiel recycelt) werden können,
- beim Arbeitsschutz in den Entsorgungsanlagen (zum Beispiel Anlagen zur Vorbereitung der Wiederverwendung, Recycling-, Behandlungs- und Verwertungsanlagen) Probleme aufwerfen und/oder einen hohen Aufwand erforderlich machen,

und/oder Stoffe beinhaltet,

- die zu einer ungewünschten Aufkonzentration im neuen Produkt führen,
- deren Abtrennung erforderlich (zum Beispiel weil sie aus Gründen des Gesundheitsschutzes nicht ins neue Produkt gelangen sollen oder weil sie die Qualität des neuen Produkts negativ beeinflussen) und aufwendig ist oder
- die bei hohem Abfallaufkommen das gemeinsame Recycling mit anderen Produkten/ Abfällen negativ beeinflussen.

Sollten während der Gebrauchsphase des nanotechnologischen Produkts Nanomaterial enthaltende Abfälle anfallen, zum Beispiel Austauschteile bei Wartungs- oder Reparaturarbeiten, sind diese Abfälle sowie die entsprechenden Abfälle des Referenzprodukts in die Betrachtung einzubeziehen.

Eine Gewichtung der Leitfragen untereinander wird nicht vorgenommen, da alle gleichermaßen relevant und bedeutsam erachtet werden.

### 7.5.5 Ressourcenverfügbarkeit

Unter dem Schlüsselindikator „Ressourcenverfügbarkeit“ wird ein sicherer physischer, temporärer (zeitlicher), finanzieller und technologischer Zugang zu den Ressourcen verstanden, die zur Herstellung des Nanoprodukts eingesetzt werden. Die konzeptuelle Entwicklung der Analyse der Untersuchungskriterien und damit der Ressourcenverfügbarkeit wird aus der Studie (Buchert et al. 2009) herangezogen. Untersuchungskriterien sind daher

- Angebotsrisiken,
- steigende Nachfrage und
- Recyclingrestriktionen.

Für die genannten Kriterien werden jeweils Subkriterien definiert, die schließlich die Grundlage für eine semi-quantitative Betrachtung bilden. Bei den Angebotsrisiken sind beispielsweise die folgenden Aspekte zu betrachten:

- Regionale Konzentration des Bergbaus
  - 90% Anteil der globalen Produktion hauptsächlich in 3 Ländern
  - 90% Anteil der globalen Produktion in 4-6 Ländern
  - 90% Anteil der globalen Produktion in mehreren Ländern
- Physischer Mangel (Reserven im Verhältnis zur globalen Nachfrage)
  - Globale Reserven deutlich geringer als globale Nachfrage
  - Globale Reserven entsprechen der globalen Nachfrage
  - Globale Reserven deutlich mehr als globale Nachfrage
- Temporärer Mangel (Zeitunterschied zwischen Produktion und Nachfrage)
  - Laufende Produktion liegt unter der globalen Nachfrage
  - Laufende Produktion deckt die globale Nachfrage zum größten Teil
  - Laufende Produktion deckt die globale Nachfrage vollständig
- Struktureller oder technischer Mangel (Die Ressource ist nur ein kleines Nebenprodukt und es herrschen große Ineffizienzen hinsichtlich Abbauprozess, Produktion und Verarbeitung)
  - Große Ineffizienzen hinsichtlich Abbauprozess, Produktion und Verarbeitung
  - Kleinere Ineffizienzen hinsichtlich Abbauprozess, Produktion und Verarbeitung
  - Abbauprozess, Produktion und Verarbeitung weitgehend effizient

Bei der Analyse werden die einzelnen Subkriterien für Angebotsrisiken, steigende Nachfrage und Recyclingrestriktionen in die Kategorien „hoch (3)“, „mittel (2)“ und „niedrig (1)“ eingeteilt. Ist die Verfügbarkeit einer Ressource bei einem Aspekt besonders kritisch, bekommt sie die

Wertigkeit „hoch“ und die Bewertung „3“. Beträgt beispielweise die regionale Konzentration einer Ressource mehr als 90% in weniger als drei Ländern, so erhält das Kriterium „Regionale Konzentration des Bergbaus“ die Wertigkeit „hoch“ und die Bewertung „3“.

Bei den Recyclingrestriktionen wird nur dann die Analyse durchgeführt, wenn bei den Subkriterien „Angebotsrisiken“ und „Steigende Nachfrage“ eine kritische Bewertung vorliegt. Grund hierfür ist, dass im Falle von Ressourcen mit fehlendem Problemdruck es in diesen Subkriterien (zum Beispiel Sand) in der Regel nicht zu der Etablierung einer entsprechenden Recyclinginfrastruktur kommt und das Produkt bei diesem Aspekt folglich von vorne herein schlecht abschneiden würde.

Für die Gesamtklassifizierung werden die Ergebnisse der einzelnen Subkriterien schließlich zu einer Gesamtpunktzahl addiert. In vielen Fällen müssen pro Nanoprodukt mehrere Ressourcen nach deren kritischer Verfügbarkeit geprüft werden. In solchen Fällen wird die Ressource mit der höchsten Punktzahl für die Betrachtung zu Grunde gelegt.

Die Einordnung des Schlüsselindikators in die Nano-SWOT-Matrix wird schließlich wie folgt vorgenommen:

- Erhalten sowohl Nano- als auch Referenzprodukt die gleiche Gesamtklassifizierung (zum Beispiel „Kritisch“, so ist der Schlüsselindikator indifferent).
- Erhält das Nanoprodukt eine risikoärmere Gesamtklassifizierung als das Referenzprodukt (zum Beispiel „Weniger kritisch“ versus „kritisch“), so handelt es sich bei dem Schlüsselindikator „Ressourcenverfügbarkeit“ um eine Chance.
- Erhält das Referenzprodukt eine risikoärmere Gesamtklassifizierung als das Nanoprodukt (zum Beispiel „Weniger kritisch“ versus „kritisch“), so handelt es sich bei dem Schlüsselindikator „Ressourcenverfügbarkeit“ um ein Risiko.

### 7.5.6 Risikowahrnehmung

Die Risikowahrnehmung und -akzeptanz einer Technik ist für das Vertrauen der Geschäftskunden, professionellen Nutzer sowie der privaten Verbraucher/-innen zu einem Produkt und dessen Hersteller ein wichtiger Faktor, der auch die Chancen und Risiken beim Absatz eines Nanoprodukts mitbestimmt. Dies gilt umso mehr, als sich die Entwicklung der Nanotechnologien in Deutschland in einer frühen Phase befindet, in der sich die Akzeptanz schnell verändern kann und es auch wesentlich davon abhängt, ob das Produkt von den Kunden angenommen und gekauft wird oder nicht (VZBV 2008). Dies ist im Rahmen eines Nachhaltigkeitschecks von Produkten ein relevanter Aspekt, denn nur wenn sich ein Produkt auch am Markt behauptet, können die mit einem Produkt gegebenenfalls verbundenen Chancen in den verschiedenen Nachhaltigkeitsaspekten auch tatsächlich realisiert werden.

Mit dem Schlüsselindikator „Risikowahrnehmung“ werden vier Gesichtspunkte zur unternehmenseigenen Befassung mit der Risikowahrnehmung untersucht. Dazu zählen:

- Unternehmensinterne Einschätzung der Risikopotenziale des Nanoprodukts,

- Analyse des Produktumfelds,
- Risikomanagement und
- Risikokommunikation.

Mit Hilfe eines qualitativen Ansatzes soll ermittelt werden, wie die unternehmenseigene Einschätzung des Risikopotenzials im gegebenen Produktumfeld mit dem Risikomanagement und der Risikokommunikation korreliert. Für die Zwecke des Indikators „Risikowahrnehmung“ wird folglich nicht von einer rein technisch-naturwissenschaftlichen Definition ausgegangen, sondern es wird ein vielschichtiges Verständnis des Risiko-Begriffs verwendet, das dem 3-Ebenen-Modell von Haller folgt (Haller 1995; Grobe 2004). Nach diesem Modell erfolgt die Risikokommunikation und Risikowahrnehmung grundsätzlich auf drei verschiedenen Ebenen (wissenschaftlich-technische Analyse des Risikos, Psychologie des Risikos und Soziologie des Risikos), wobei jede Ebene auf einer spezifischen Logik basiert und jeweils eine eigene Objektivität generiert.

Die Betrachtung der internen und externen Risikowahrnehmung bei diesem Indikator erfolgt in zwei getrennten Bereichen:

- Risikoeinschätzung,
- Risikomanagement und Risikokommunikation vor dem Hintergrund des Produktumfelds.

Die Analyse wird zunächst in jedem Bereich getrennt durchgeführt.

Im ersten Schritt – der Risikoeinschätzung – ist anhand von Kriterien zu bestimmen, wie das human- und ökotoxikologische Risiko auf der wissenschaftlich-technischen Ebene eingestuft wird. Weiterhin ist zu bestimmen, ob es einen Anlass für das Unternehmen gibt, aktiv Risikokommunikation zu betreiben. Gründe hierfür können insbesondere sein, dass Risiken auf der technisch-wissenschaftlichen Ebene bekannt sind oder noch hohe Unsicherheiten bzgl. bestimmter Risiken gesehen werden. Als Grundlage hierfür werden die Einstufungen in Klasse A oder B aus den Schlüsselindikatoren „Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt“ sowie „Störfallaspekte“ herangezogen.

Darauf aufbauend ist im zweiten Bereich zu bewerten, welche Risikomanagementmaßnahmen ergriffen und welche Risikokommunikation betrieben wird und ob diese der Risikoeinschätzung entsprechen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Maßnahmen zur Risikokommunikation von der Größe des Unternehmens abhängig sein können. Die Maßnahmen der Risikokommunikation sind dabei in Beziehung zum „Produktumfeld“ zu setzen. Es soll darauf eingegangen werden, wie das Unternehmen das Produktumfeld einstuft und ob es aktiv gestaltend auf die Produktwahrnehmung einwirken kann oder ob es eher reaktiv beobachten muss, wie sich das Produktumfeld entwickelt. So kann die Risikowahrnehmung und -akzeptanz eines Produkts ganz erheblich von negativen Ereignissen im Zusammenhang mit anderen Produkten derselben oder sogar einer anderen Produktklasse beeinflusst werden, auf die das Unternehmen nur bedingt Einfluss hat.

In einer Gesamtschau aus den zwei vorgenannten Bereichen ist abschließend einzustufen, ob sich die Aspekte der internen und externen Risikowahrnehmung für das Produkt aus Sicht des Unternehmens als Chance oder als Risiko darstellen. Dabei können sich vier grundlegende Kombinationen ergeben, die im Rahmen der SWOT-Matrix wie folgt eingestuft werden sollen:

- Die unternehmensinterne Einschätzung kommt zu dem Ergebnis, dass nur geringe nanospezifische Risiken bestehen, die keine oder nur wenige Maßnahmen zum Risikomanagement und der Risikokommunikation erforderlich machen. In einem solchen Fall ist der Indikator als indifferent einzustufen.
- Zwar ergibt die unternehmensinterne Einschätzung, dass nanospezifische Risiken nicht ausgeschlossen werden können, aber diese werden durch Maßnahmen des Risikomanagements und der Risikokommunikation in einem angemessenen Umfang aufgefangen. Auch in einem solchen Fall ist der Indikator indifferent.
- Die unternehmensinterne Einschätzung kommt zu dem Ergebnis, dass nur geringe oder keine nanospezifischen Risiken bestehen. Gleichzeitig ist das Unternehmen aufgrund seiner Position im Produktumfeld und den ergriffenen Maßnahmen zum Risikomanagement und zur Risikokommunikation in der Lage, angemessen auf die gesellschaftliche Risikowahrnehmung einzugehen. In diesem Fall ist der Indikator als Chance einzustufen.
- Die unternehmensinterne Einschätzung kommt zu dem Ergebnis, dass nanospezifische Risiken bestehen oder nanospezifische Risiken nicht sicher ausgeschlossen werden können, und keine oder angesichts des Produktumfelds nicht ausreichende Maßnahmen des Risikomanagements und der Risikokommunikation ergriffen wurden. In diesem Fall ist der Indikator als Risiko einzustufen.

## 7.6 Auswertung der SWOT-Matrix

Die Auswertung der einzelnen Schlüsselindikatoren mündet in eine integrierte Gesamtbeurteilung, auf deren Grundlage schließlich Empfehlungen zur strategischen Optimierung der konkreten Anwendung erarbeitet werden. Dabei beziehen sich die Empfehlungen sowohl auf die Stärken und Schwächen als auch auf die Chancen und Risiken. Ziel ist es, die positiven Nachhaltigkeitspotenziale der Stärken und Chancen zu maximieren, und gleichzeitig die möglichen Rebound-Effekte aus Schwächen und Risiken zu minimieren.

Hierzu werden gezielt folgende Kombinationen der SWOT-Matrix untersucht und daraus entsprechende Maßnahmen abgeleitet:

- **Stärke / Chancen-Kombination:** Welche Stärken passen zu welchen Chancen? Wie können Stärken genutzt werden, so dass sich die Chancenrealisierung erhöht?

- **Stärke / Risiken-Kombination:** Welchen Risiken kann mit welchen Stärken begegnet werden? Wie können vorhandene Stärken eingesetzt werden, um den Eintritt bestimmter Gefahren abzuwenden?
- **Schwäche / Chancen-Kombination:** Wo können aus Schwächen Chancen entstehen? Wie können Schwächen zu Stärken entwickelt werden?
- **Schwäche / Risiken-Kombination:** Wo befinden sich Schwächen der nanotechnologischen Anwendungen und wie kann die Gesellschaft vor Risiken beziehungsweise konkretem Schaden geschützt werden?

## **7.7 Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Erprobung des Analyserasters**

Der Entwicklung des Analyserasters und seiner Anwendung im Rahmen der Fallbeispiele war eine Analyse der Interessenlage bei Unternehmen zur Beteiligung an einer Pilotanwendung des Nano-NachhaltigkeitsChecks vorausgegangen. Die zugehörigen Arbeiten waren als Vorstudie angelegt und begannen mit einem breit gefächerten Screening, bei dem aufgeschlüsselt nach Branchen konkrete Anwendungen mit vielversprechenden Nachhaltigkeitspotenzialen betrachtet wurden. Ausgangspunkt hierfür bildeten die Ergebnisse des NanoDialogs 2006-2008 (BMU 2008) sowie die Vorstudien des Umweltbundesamtes zum Thema (vergleiche Kapitel 5.4.1).

In einem zweiten Schritt wurden in der 2. Jahreshälfte 2009 die Hersteller beziehungsweise Entwickler der identifizierten Produkte direkt angesprochen und die Rahmenbedingungen und Voraussetzungen für eine Teilnahme an dem vorliegenden Projekt erkundet. Dabei fanden zum Teil auch Präsentationen bei den Unternehmen vor Ort statt. Die folgende Tabelle enthält eine Auswahl der angefragten Unternehmen mit den jeweils betrachteten Produkten:

Tabelle 5:            Direktansprache von Unternehmen im Rahmen der Interessensanalyse (eigene Darstellung)

Unternehmen	Produkt
BASF	Betonbeschleuniger (X-SEED)
Bayer Material Sciences	CNT-Leichtbauwerkstoffe
Costec Technologies / Rewitec	Nanopartikuläres Siliziumdioxid als Motoröl-Zusatz
Dykerhoff	Zement mit Nanokomponenten
Elastogran	Nanodämmschäume
First Solar	Dünnschichtzellen
Evonik	Nanoskaliger Palladium-Platin-Katalysator für die Direkt-synthese von Wasserstoffperoxid
ItN Nanovation	Anti-Fouling-Beschichtung
KHS Plasmax	PET-Flaschen mit Nano-Barriereschicht
Merck	Photovoltaikmaterialien
Nanogate	UV-Schutzbeschichtung (pro.Glass Barrier 401)
NTC NanoTech Coatings	Korrosionsschutz durch Beschichtungen

Zum Jahreswechsel 2009 / 2010 war es schließlich gelungen, mit den in den folgenden Kapiteln vorgestellten Produkten der Firmen BASF und Nanogate zwei sehr gut geeignete Fallbeispiele zu gewinnen. Die Auswahl wurde mit dem Umweltbundesamt abgestimmt, wobei als Auswahlkriterien folgende Aspekte berücksichtigt wurden:

- Das Produkt muss ein „echtes“ Nanoprodukt sein, das heißt, bei der Produktion ist der Einsatz von Nanomaterialien<sup>29</sup> erforderlich;
- Es muss ein konventionelles Produkt beziehungsweise eine konventionelle Anwendung mit vergleichbarer Funktionalität wie das Nanoprodukt auf dem Markt existieren, um die in der Zielsetzung geforderte vergleichende Betrachtung durchführen zu können;
- Das Produkt sollte massenmarktauglich sein, um eine relevante Hebelwirkung bezüglich Ressourcenschonung und Energieeffizienz entfalten zu können;
- Das Produkt sollte nicht zu weit von der Markteinführung entfernt sein oder sich bereits auf dem Markt befinden, um eine belastbare Datenbasis für die Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase zu gewährleisten;
- Das Unternehmen muss in der Lage sein, für das Projekt ausreichende (personelle) Ressourcen für die Datenerfassung sowie die erforderlichen Besprechungen und Präsentationen zur Verfügung zu stellen.

Nach der Festlegung der Fallbeispiele wurden die zwischenzeitlich begonnenen Arbeiten zur methodischen Vorgehensweise beim Nano-NachhaltigkeitsCheck abgeschlossen und ein Entwurf des Analyserasters im Rahmen eines internen Workshops im Frühjahr 2010 vor-

<sup>29</sup> Zur Definition siehe Kapitel 7.1.1.

gestellt und gemeinsam mit BASF und Nanogate diskutiert. In den folgenden sechs Monaten haben die beiden Unternehmen das Instrument mit den zugehörigen Leitfäden und Excel-Tools zur Ermittlung der Schlüsselindikatoren für die ausgewählten Fallbeispiele angewendet. Auf Basis der dabei gesammelten Erfahrungen wurden sowohl Leitfäden als auch Excel-Tools überarbeitet. Die vorgenommenen Anpassungen betrafen in erster Linie die Benutzerfreundlichkeit des Instruments, die durch die Integration von Erläuterungen aus den Leitfäden in die jeweiligen Excel-Tools als „Online-Hilfe“ weiter verbessert werden konnte. Darüber hinaus wurde auch die Vorgehensweise bei einzelnen Analyseschritten sowie die Abgrenzung der Schlüsselindikatoren untereinander konkretisiert. Im Rahmen eines im Herbst 2010 durchgeführten zweiten gemeinsamen Workshops wurden die vorläufigen Ergebnisse der Schlüsselindikatoren sowie ihre Einordnung in die SWOT-Matrix durch das Öko-Institut validiert und noch vorhandene Datenlücken bei einzelnen Schlüsselindikatoren geschlossen. Seinen Abschluss fand die Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Erprobung des Analyserasters schließlich in der Abstimmung einer gemeinsam getragenen Broschüre mit den wichtigsten Resultaten des Nano-NachhaltigkeitsChecks auf Basis eines vom Öko-Instituts vorgelegten Entwurfs.

## **8 Ergebnisse des Fallbeispiels pro.Glass Barrier 401**

In dem vorliegenden Fallbeispiel wird das Produkt pro.Glass<sup>®</sup> Barrier 401 der Firma Nanogate Industrial Solutions GmbH untersucht. In den folgenden Kapiteln wird zunächst das Produkt beschrieben (Kapitel 8.1), anschließend werden die Ergebnisse der SWOT-Matrix (Kapitel 8.2) sowie der einzelnen Schlüsselindikatoren (Kapitel 8.3) dargestellt und diskutiert (Kapitel 8.4). Schließlich werden die Aspekte der strategischen Optimierung des Produkts thematisiert (Kapitel 8.5).

### **8.1 Produktbeschreibung**

Bei pro.Glass Barrier 401 handelt es sich um das Ausgangsmaterial für eine Oberflächenbeschichtung von Glas mit hoher UV-Schutzwirkung. Die UV-Schutzwirkung wird durch eine Schicht aus nanoskaligem Zinkoxid erreicht. Diese Schicht wird durch Tauchen, Rakeln oder Fluten von konventionellem Fensterglas durch ein lösungsmittelbasiertes, einkomponentiges Lacksystem auf das Glas aufgebracht. Die Schicht wird anschließend thermisch ausgehärtet. Nach dem Aushärten ist die Beschichtung abriebfest, lösemittel- und hydrolysebeständig, hoch transparent und optisch neutral.

pro.Glass Barrier 401 ist sowohl für Schaufenster als auch für Museumsgläser, Bilderahmen-Gläser und Vitrinen geeignet und schützt die jeweiligen Exponate vor schädlichen UV-Strahlen.

Die Firma Nanogate Industrial Solutions GmbH stellt dabei das lösungsmittelbasierte Lacksystem her, mit welchem beispielsweise das Tauchbad für die Beschichtung des Glases

angesetzt wird. Das gebrauchsfertige Flüssigmaterial wird in weiteren Verarbeitungsschritten zunächst von einem Glasbeschichter auf Glasscheiben aufgebracht. Die beschichteten Scheiben werden anschließend von glasverarbeitenden Betrieben weiterverarbeitet. Um im Rahmen des Verarbeitungsprozesses die gewünschte Funktionalität zu gewährleisten veredelt die Firma Nanogate Industrial Solutions GmbH nanoskalige Zinkoxid-Partikel mit einem speziellen Coating und implementiert dieses in eine Hybridmatrix auf Siloxanbasis.

Bei den Zinkoxid-Partikeln handelt es sich um sphärische Partikel mit einem mittleren Durchmesser  $D_{50}$  von circa 20 nm. Der Gewichtsanteil des Zinkoxids in der ausgehärteten Schicht beträgt etwa 30%. Die Dicke der ausgehärteten Schicht liegt im Durchschnitt bei 1,5 Mikrometer. Nach der Applikation und Aushärtung ist das Nanomaterial chemisch fest in eine umgebende Matrix eingebunden.

Für die Applikation von pro.Glass Barrier 401 wird für das Fallbeispiel angenommen, dass eine nass-chemische Tauchbeschichtung von Flachglas von 3 mm Durchmesser erfolgt. Hierzu wird eine Tauchküvette mit circa 180 Litern pro.Glass Barrier 401 verwendet (siehe folgende Abbildung), wobei ca. 15-20 Gramm pro.Glass Barrier 401 pro Quadratmeter Flachglas verarbeitet werden. Für die Haltbarkeit der Tauchküvette wird ein Zeitraum von einem Jahr angesetzt, danach wird das in der Tauchküvette verbleibende Material entsorgt.

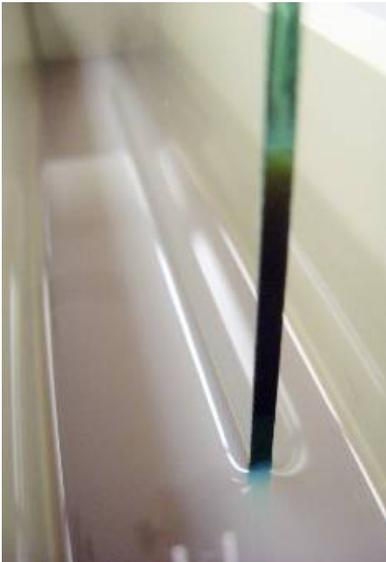


Abbildung 4: Tauchbad zum Aufbringen von pro.Glass Barrier 401 auf eine Glasscheibe (Quelle: Nanogate)

Nach einer Ablüftung bei Raumtemperatur für wenige Minuten erfordert der Aushärtungsprozess der Schicht Temperaturen um 200°C für circa 30 Minuten. Die verbleibende Schicht weist eine Dicke von etwa 1-2 Mikrometer auf.

Die wesentliche Funktionalität (hohe UV-Absorption bei gleichzeitiger optischer Neutralität) wird durch einen starken Anstieg der Transmission von 0,83% bei Wellenlängen von 350 nm

auf 85,57% bei 400 nm charakterisiert (siehe folgende Abbildung). Im Bereich der Wellenlängen von UV-Licht (ca. 200-380 nm) liegt die Absorption bei ca. 93%.

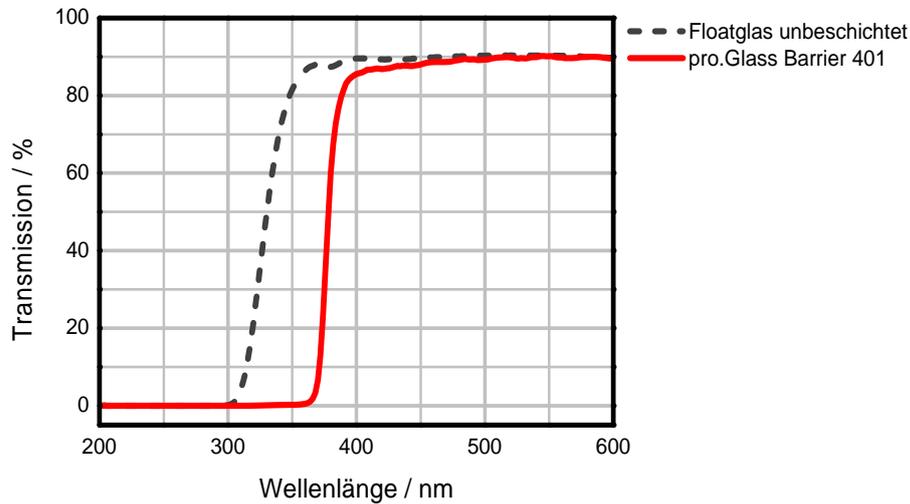


Abbildung 5: Abhängigkeit des Transmissionsverhaltens von der Wellenlänge für unbeschichtetes und mit pro.Glass Barrier 401 beschichtetes Glas (Quelle: Nanogate)

Gleichzeitig weist die beschichtete Scheibe eine geringe Trübung (< 0,3%, beidseitig beschichtetes Glas, gemessen mit BYK haze-gard) und eine geringe Eigenfärbung auf.

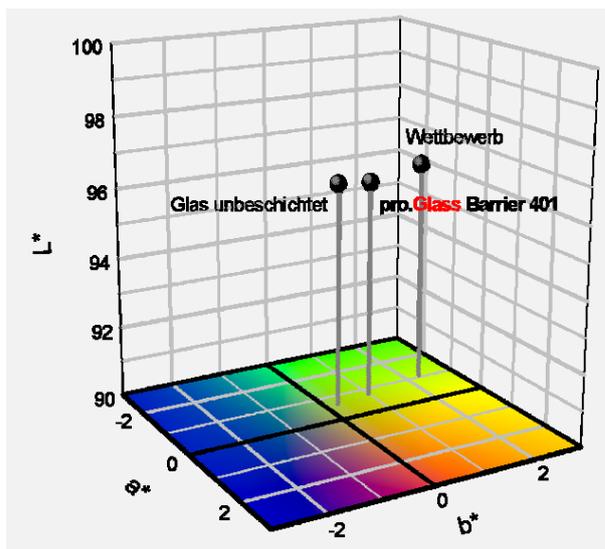


Abbildung 6: Eigenfärbung des beschichteten Glases im Vergleich zu unbeschichtetem Glas und Wettbewerbern; Messwerte aufgenommen im Lab-Farbraum, L\*: Luminanz, a\*,b\*: Farbkoordinaten (Quelle: Nanogate)

Als Referenzprodukt wurde ein Produkt ausgewählt, bei dem ebenfalls ein hoher UV-Schutz gegeben ist, um die wesentliche, durch das Nanomaterial erreichte Funktionalität auch im Referenzprodukt zu gewährleisten. Dies wird derzeit typischerweise durch die Beschichtung mit einem organischen UV-Absorber erreicht. Ein Vergleich mit anderen Nanoprodukten sollte entsprechend der Zielstellung des Nano-NachhaltigkeitsCheck explizit nicht erfolgen. Bei einem Vergleich mit einer „Null-Lösung“ (unbeschichtete Glasscheibe ohne UV-Schutz) wären die wesentlichen Nutzungseigenschaften der beschichteten Glasscheibe nicht erfasst worden. Im Rahmen des Fallbeispiels wird daher ein mit pro.Glass Barrier 401 beschichtetes Flachglas als Nanoprodukt einem Referenzprodukt gegenübergestellt, bei dem ein organischer UV-Absorber (Wettbewerbsprodukt) verwendet wird.

Der Applikationsprozess, die Schichtdicke und die initialen Eigenschaften des Referenzprodukts werden als ähnlich zu pro.Glass Barrier 401 angenommen. Für die erreichte UV-Absorption wird bei beiden Produkten eine etwa gleiche Qualität angenommen. Einen wesentlichen Unterschied stellt die längere Haltbarkeit der UV-Absorptionswirkung beim Nanoprodukt im Vergleich mit dem Referenzprodukt dar. Getestet wurde die Veränderung der UV-Beständigkeit, wobei sich auch nach 3000 Sonnenstunden keine Veränderung in der Farbe oder Trübung zeigte. Auf dieser Basis wird von Nanogate eine gegenüber dem Referenzprodukt um einen Faktor von ca. 1,5 erhöhte Haltbarkeit der Funktionalität der beschichteten Glasscheibe angenommen. Darüber hinaus wird die Eigenfärbung der mit pro.Glass Barrier 401 beschichteten Scheibe im Vergleich zum Referenzprodukt als geringer eingestuft.

Als funktionelle Einheit wird für die folgenden Betrachtungen auf dieser Basis ein Quadratmeter beschichtetes Flachglas (Optiwhite, Dicke 3 mm) festgelegt.

## 8.2 SWOT-Matrix

Bei der Auswertung ergeben sich für das Nanoprodukt Stärken bei den Schlüsselindikatoren „CO<sub>2</sub>-Fußabdruck“, „Energieeffizienz“, „Gebrauchsnutzen“, „Lebenszykluskosten“ und „Symbolischer Nutzen“. Die Schlüsselindikatoren „Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt“ und „Störfallaspekte“ wurden hingegen in den Bereich der Schwächen eingeordnet.

Chancen ergeben sich im Bereich der Risikowahrnehmung. Risiken können in der SWOT-Analyse nicht identifiziert werden.

Für die verbleibenden Schlüsselindikatoren „Beschäftigungswirkung“, „Exposition am Arbeitsplatz“, „Gesellschaftlicher Nutzen“, „Rechtliche Rahmenbedingungen und Forschungsförderung“, „Recyclingfähigkeit“ sowie „Ressourcenverfügbarkeit“ ergaben sich keine signifikanten Unterschiede, so dass diese als indifferent eingestuft wurden (siehe folgende Abbildung).



Abbildung 7: SWOT-Matrix mit den Ergebnissen der Schlüsselindikatoren für das Fallbeispiel „pro.Glass Barrier 401“ (eigene Darstellung)

### 8.3 Einzelergebnisse der Schlüsselindikatoren

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Selbstevaluierung von pro.Glass Barrier 401 der Firma Nanogate Industrial Solutions GmbH für die einzelnen Schlüsselindikatoren der SWOT-Matrix erläutert. Dazu wird zunächst auf die Ebene der Stärken-Schwächen und anschließend auf die Ebene der Chancen-Risiken eingegangen.

#### 8.3.1 Stärken-Schwächen-Analyse

Die Ergebnisse der Stärken-Schwächen-Analyse stellen sich wie folgt dar.

##### CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (Product Carbon Footprint)

Für den Vergleich des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks wird abweichend von der oben definierten funktio-nellen Einheit die Produktion und der Vertrieb von 1.000 kg beschichtetem Flachglas der Dicke 3 mm untersucht. Bei einer Dichte von circa 2,49 g/cm<sup>3</sup> entspricht dies etwa 134 m<sup>2</sup> Fläche. Dabei wird berücksichtigt, dass sich für das Referenzprodukt eine kürzere Haltbar-keit der UV-Schutzwirkung ergibt. Vom Referenzprodukt müssen daher im zeitlichen Mittel anstelle von 1.000 kg des Nanoprodukts 1.500 kg des Referenzprodukts bereitgestellt

werden. Es wird weiterhin angenommen, dass die Herstellung für Deutschland an einem einzigen Standort erfolgt, weshalb Transportstrecken von im Mittel jeweils 500 km (für das Beschichtungsmaterial, die unbeschichtete und die beschichtete Glasscheibe) zugrunde gelegt werden.

Den wesentlichen Beitrag zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck liefert unter diesen Annahmen die Herstellung und die Entsorgung des Flachglases selbst, der Beitrag der Beschichtung zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck liegt sowohl beim Nanoprodukt wie beim Referenzprodukt nur im Bereich weniger Promille.

Das Nanoprodukt weist insgesamt einen deutlich geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck auf als das Referenzprodukt. Ursache für das bessere Abschneiden des Nanoprodukts ist dabei die um circa 50% längere Haltbarkeit der UV-Schutzwirkung, wodurch eine entsprechende Menge an beschichtetem Glas eingespart wird, während beim Referenzprodukt ein Glasersatz nötig ist. Auch die geringere Härtetemperatur – 200° statt 450° Celsius – hat positive Auswirkungen auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, allerdings trägt auch die Aushärtung mit ungefähr nur einem Prozent zum gesamten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bei.

Es ergibt sich eine signifikante Einsparung von circa 33% beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Pro Tonne beschichtetes Flachglas können beim Nanoprodukt 665 kg CO<sub>2</sub> eingespart werden. Im globalen Kontext ergeben sich hieraus jedoch keine signifikanten CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale, da angenommen wird, dass insgesamt weltweit nur etwa 1.000 t UV-absorbierendes Glas produziert werden.

### **Energieeffizienz**

Für die Bestimmung der Energieeffizienz wurden dieselben Randbedingungen zugrunde gelegt wie für die Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks. Auch für die Energieeffizienz spielt die Herstellung des Nanomaterials (auch im Vergleich zum organischen Beschichtungsmaterial beim Referenzprodukt) nur eine untergeordnete Rolle, der Beitrag zum Energieaufwand liegt im Bereich von einigen Promille. Daher spielen auch gegebenenfalls zu unterstellende hohe Unsicherheiten im Bereich des Energieaufwands für die Herstellung des Nano-Zinkoxids keine das Ergebnis beeinflussende Rolle. Ebenso wie beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck wird das Ergebnis durch die längere Haltbarkeit der UV-Schutzwirkung beim Nanoprodukt und den daraus resultierenden geringeren Energieaufwand bei der Herstellung des Flachglases beziehungsweise beim Recycling des entsorgten Flachglases dominiert.

Auch für die Energieeffizienz ergibt sich eine signifikante Einsparung von circa 33%.

### **Exposition am Arbeitsplatz**

Für die Betrachtungen zur Exposition am Arbeitsplatz waren wiederum Überlegungen zum zugrunde liegenden Szenario erforderlich, da sich alleine aus der oben definierten funktionalen Einheit noch kein eindeutiges Produktionsszenario ableiten lässt. Annahmen hierzu sind jedoch für eine Einschätzung zu Aufwand/Kosten bei der Herstellung des Nanoprodukts

im Vergleich zum Referenzprodukt erforderlich. Es wurde daher für die semi-quantitative Abschätzung bei diesem Schlüsselindikator eine Herstellungsanlage für 200 kg pro.Glass Barrier 401 inklusive der notwendigen Rohstoffe und dem anschließenden Beschichtungsprozess zugrunde gelegt.

Aufgrund des Umgangs mit einem pulverförmigen Nanomaterial (bevor dieses als pro.Glass Barrier 401 als flüssiges Nanoprodukt vorliegt) sieht Nanogate einen leichten Nachteil bei der Herstellung des Nanoprodukts gegenüber dem Referenzprodukt in den Aspekten „Aufstellen und Betreiben von Quellenabsaugungen mit anschließender Reinigung der Abluft“, „Abgrenzung von Arbeitsbereichen, in denen mit gefährlichen Stoffen und Materialien umgegangen wird“, „Bereitstellung persönlicher Schutzausrüstungen (Atemschutzmasken, Schutzanzüge, Schutzhandschuhe et cetera)“ sowie einen „Mehraufwand der Arbeitsschutzmaßnahmen an den Anlagen-Gesamtkosten“, da insgesamt ein etwas erhöhter Aufwand für Atemschutzmaßnahmen oder Einhausungen erforderlich sein könnte. Insgesamt ergeben sich für diesen Indikator damit jedoch nur in wenigen Punkten geringe Unterschiede zum Referenzprodukt, so dass sich dieser Indikator bei der Auswertung als indifferent darstellt.

### **Gebrauchsnutzen**

Beim Gebrauchsnutzen werden von Nanogate Unterschiede hinsichtlich der Haltbarkeit des Nanoprodukts und besonders in der geringeren Eigenfärbung der beschichteten Glasscheibe im Vergleich zum Referenzprodukt als zentraler Faktor ausgewiesen. Dies kann unter Umständen kaufentscheidend sein, da sich neben einem Vorteil bei den Anschaffungskosten (siehe Schlüsselindikator Lebenszykluskosten) auch ein geringerer Aufwand durch den regelmäßig notwendig werdenden Ersatz der Glasscheiben ergibt. Darüber hinaus wird von Nanogate ein Kundenvorteil im Bereich Komfort gesehen, da aufgrund der hohen Beständigkeit der anorganischen Beschichtung im Vergleich zu einem organischen Beschichtungsmaterial eine einfachere Reinigung der Glasscheiben ermöglicht wird.

### **Lebenszykluskosten**

Die Analyse für den Schlüsselindikator Lebenszykluskosten muss sich aufgrund der im Unternehmen vorhandenen Daten auf die reinen Anschaffungskosten beschränken. Allerdings werden gravierende Unterschiede in den laufenden Kosten nicht erwartet, tendenziell könnten sich hier eher noch Einsparpotenziale aufgrund von Vorteilen im Bereich der Reinigung (siehe Schlüsselindikator Gebrauchsnutzen) ergeben. Der Beitrag der Unterhaltungskosten im Verhältnis zu den Anschaffungskosten wurde jedoch nicht abgeschätzt, so dass keine Aussagen zu den relativen Einsparungen über den gesamten Lebenszyklus möglich sind.

Die Unterschiede in den Anschaffungskosten ergeben sich wiederum nicht aus Kostenunterschieden aufgrund des Beschichtungsmaterials (organische Verbindung versus Nano-

material), diese werden im Rahmen der hier untersuchten Genauigkeit als gleich teuer angenommen. Vielmehr folgen Unterschiede aus der realisierbaren längeren Haltbarkeit der Glasscheibe beziehungsweise ihrer Beschichtung. Hierdurch ist im Referenzfall eine entsprechend größere Menge an beschichtetem Glas für eine betrachtete Zeiteinheit zu erwerben, sofern die UV-Absorption als notwendige Eigenschaft der Glasscheiben angesehen wird und dementsprechend ein frühzeitiger Glasaustausch beim Referenzprodukt erfolgt. Es ergibt sich bezogen auf das Referenzprodukt beim Nanoprodukt eine signifikante Einsparung von circa 30%.

### **Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt**

Für den Bereich der Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt stellt Nanogate zunächst fest, dass die benötigten Informationen zum Lebenszyklus der Nanomaterialien bis auf teilweise bestehende Unsicherheiten im Bereich der Vorketten (bei der Herstellung der Nanopartikel) vorhanden sind.

Im Bereich des Wirkungspotenzials ist es vorteilhaft, dass die verwendeten Nanopartikel nur für sehr kurze Zeiten eine Stabilität unter Umweltbedingungen beziehungsweise im menschlichen Körper aufweisen. Dem steht allerdings auch eine Einstufung bezüglich des Redoxpotenzials beziehungsweise der katalytische Aktivität der Nanopartikel als „Mittel“ gegenüber.

In Hinblick auf eine potenzielle Exposition von Arbeitnehmern und der Umwelt erweist es sich als ungünstig, dass einerseits bei der Verarbeitung der Nanopartikel und dem Ansetzen des Tauchbades mit relativ großen Mengen (> 120 mg bezogenen auf den einzelnen Arbeitsvorgang) von Nanomaterialien umgegangen wird und dass andererseits eine größere Menge (5 - 500 kg) insbesondere unverarbeiteten Nanomaterials (Entsorgung eines Tauchbades nach einem Jahr) beziehungsweise fertigen Produkts am Ende des Lebenszyklusses über die standardmäßigen Entsorgungswege beseitigt werden.

Damit ist der Schlüsselindikator Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt in den Bereich der Schwächen einzuordnen. Es ergeben sich zwar relativ geringe absolute Werte für die verschiedenen definierten Vorsorgeaspekte. Dennoch übersteigen in den Bereichen „Vorsorgebedarf für Arbeitnehmer“ und „Vorsorgebedarf für die Umwelt“ die Ergebnisse geringfügig den definierten Schwellenwert von 20. Hierbei ist aber auch festzuhalten, dass sich insbesondere der Vorsorgebedarf für Arbeitnehmer auf Personen im Verarbeitungsprozess des Nanomaterials bezieht. Der Vorsorgebedarf für den Verbraucher beziehungsweise hier für den Endabnehmer (Käufer oder Verwender der beschichteten Glasscheibe) liegt unter anderem aufgrund der Einbindung der Nanopartikel in eine feste Matrix deutlich unter dem definierten Schwellenwert.

## **Störfallaspekte**

Bei der Betrachtung der Störfallaspekte gehen grundsätzlich vergleichbare Randbedingungen ein wie bei der Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt (Mittleres Wirkungspotenzial bei geringer Stabilität der Nanopartikel). Für diesen Schlüsselindikator ist wesentlich, dass aufgrund des Lösungsmittelanteils in pro.Glass Barrier 401 ein potenziell störfallauslösender Stoff im Betriebsbereich vorhanden ist. Darüber hinaus wird aufgrund des Batch-Betriebs (Ansetzen eines größeren Tauchbads) auch mit relativ großen Mengen an Nanopartikeln umgegangen.

Vom Endergebnis her ist der Schlüsselindikator Störfallaspekte in den Bereich der Schwächen einzuordnen. Für die Kenngröße „Vorsorgebedarf für Arbeitnehmer“ liegt das Ergebnis über dem definierten Grenzwert von 20, es ergibt sich daher ein erhöhter Vorsorgebedarf. Der Vorsorgebedarf für die Bevölkerung ist demgegenüber nicht als erhöht ausgewiesen.

## **Symbolischer Nutzen**

Für den Schlüsselindikator Symbolischer Nutzen weist Nanogate für das Nanoprodukt im Aspekt Design auf die geringere Eigenfärbung der beschichteten Glasscheibe im Vergleich zum Referenzprodukt hin. Da die Einsatzgebiete UV-absorbierender Glasscheiben wesentlich in den Bereichen Schaufensterglas und Kunstglas/Vitrinenglas zu sehen sind, spielt eine möglichst geringe Eigenfärbung eine wichtige Rolle für das Endprodukt und kann sich gegebenenfalls sogar kaufentscheidend auswirken. Daher wird dieser Aspekt von Nanogate als erheblicher Vorteil im Vergleich zum Referenzprodukt eingestuft, die Bedeutung dieses Aspekts wird darüber hinaus auch als von hoher Bedeutung für das Gesamtergebnis angesehen. Weiterhin wird die „Modernität“ des Produkts aufgrund der Verwendung anorganischer Nanomaterialien vom Unternehmen als Vorteil gegenüber dem Referenzprodukt eingeschätzt. Damit ergibt sich in der Gesamtbetrachtung, dass der Indikator Symbolischer Nutzen als eine Stärke einzustufen ist.

### **8.3.2 Chancen-Risiken-Analyse**

Es folgen die Ausführungen zu den Ergebnissen der Chancen-Risiken-Analyse:

#### **Beschäftigungswirkung**

Im Bereich der Beschäftigungswirkung konnte von Nanogate für das eigene Unternehmen ein leichter Anstieg der Beschäftigungszahlen über den Zeitraum 2008 bis 2010 festgestellt werden. Dem stehen stagnierende oder leicht abnehmende Beschäftigungszahlen in den Vor- und Nachketten gegenüber. Absolut gesehen ist der abgeschätzte Beschäftigungseffekt aber auch sehr gering. In der Gesamtbetrachtung wurde dieser Schlüsselindikator daher als indifferent eingestuft.

## **Gesellschaftlicher Nutzen**

Für den Schlüsselindikator „Gesellschaftlicher Nutzen“ wurden von Nanogate lediglich bei dem Aspekt „Förderung von Bildung und Information“ leichte Vorteile gegenüber dem Referenzprodukt ausgemacht, da durch das Produkt ein besserer Schutz beziehungsweise eine längere Haltbarkeit von kulturell bedeutenden Erzeugnissen (Dokumente oder Kunstwerke) gefördert wird. Andere Einflussfaktoren im Vergleich zum Referenzprodukt konnten nicht identifiziert werden. Insgesamt wurde der Einfluss des Nanoprodukts auf diesen Indikator damit als indifferent eingestuft.

## **Rechtliche Rahmenbedingungen und Forschungsförderung**

Fragen der Forschungsförderung haben für die Entwicklung von pro.Glass Barrier 401 unmittelbar keine Rolle gespielt. Die Möglichkeiten, öffentliche Fördermittel für dieses Produkt beziehungsweise diese Produktklasse gewinnen zu können, werden von Nanogate demgegenüber als eher günstig eingestuft.

In Bezug auf die rechtlichen Rahmenbedingungen sieht Nanogate ein sehr differenziertes Umfeld. Ein grundlegender rechtlicher Rahmen für die Verwendung der Nanomaterialien ist durch das Chemikaliengesetz zwar vorhanden. Es verbleiben jedoch Unsicherheiten hinsichtlich human- und ökotoxikologischer Bewertungsmethoden von nanopartikulären Systemen. Damit bestehen auch Unsicherheiten, ob sich für die Zukunft höhere Anforderungen in verschiedenen Bereichen, so zum Beispiel bei Arbeitsschutzanforderungen ergeben könnten.

Insgesamt ergibt sich angesichts dieses inhomogenen Bildes ein indifferenter Indikator.

## **Recyclingfähigkeit**

Mit Blick auf die Recyclingfähigkeit der Glasscheiben sieht Nanogate nur sehr geringe Einflüsse durch die jeweils verwendeten Beschichtungsmaterialien (organische Beschichtung versus anorganisches Nanomaterial). Grundsätzlich sind bei beiden Beschichtungen Auswirkungen auf die Recyclinginfrastruktur denkbar. So ist beispielsweise nicht auszuschließen, dass sich bei einer thermischen Zersetzung einer organischen Beschichtung unter ungünstigen Bedingungen toxische Stoffe bilden. Andererseits ist bei der Verwendung des anorganischen Nanomaterials grundsätzlich eine Aufkonzentration in der Glasschmelze vorstellbar. Angesichts der jeweiligen sehr geringen Mengen wird dies jedoch für beide Fälle als für den Recyclingprozess insgesamt nicht ausschlaggebend angesehen. Damit ergibt sich insgesamt ein indifferenter Indikator.

## **Ressourcenverfügbarkeit**

Bei der Ressourcenverfügbarkeit werden Glas, das nanopartikuläre Zinkoxid sowie der organische Absorber betrachtet. Es zeigt sich für alle benötigten Rohstoffe eine hohe Ver-

fügbare bei gleichzeitig geringen Angebotsrisiken. Da vor diesem Hintergrund Recyclingfragen für die Ressourcenverfügbarkeit keine Relevanz haben, wurden diese nicht weiter betrachtet. Insgesamt ergeben sich keine relevanten Unterschiede zwischen Nanoprodukt und Referenzprodukt, so dass der Indikator als indifferent eingestuft wurde.

### **Risikowahrnehmung**

Bei der Einschätzung des Risikopotenzials im Rahmen der Bewertung der Risikowahrnehmung kommt Nanogate bei der Auswertung zu einer günstigen Einschätzung, obwohl sich beim Schlüsselindikator „Risikowahrnehmung für Mensch und Umwelt“ ebenso wie beim Schlüsselindikator „Störfallaspekte“ ein erhöhter Vorsorgebedarf gezeigt hat. Dies begründet Nanogate damit, dass sich der Vorsorgebedarf auf die Teile der Wertschöpfungskette bezieht, in denen ausschließlich professionelle Nutzer beziehungsweise Weiterverarbeiter betroffen sind. Da die zugrunde liegenden Verarbeitungsprozesse als Stand von Wissenschaft und Technik anzusehen sind und das humantoxikologische Risiko aufgrund der vorhandenen Kenntnisse über das Nanomaterial von Nanogate als gering eingestuft werden, hält das Unternehmen die hier vorliegenden Risiken für überschaubar. Auch geht Nanogate von einer hohen Wahrscheinlichkeit einer Agglomeration von Nanopartikeln bei einer Entsorgung der Flüssigabfälle aus, so dass die nanospezifischen Risiken für die Umwelt ebenfalls als gering angesehen werden.

Gleichzeitig ist Nanogate im Bereich des Risikomanagements stark in verschiedenen Forschungsfeldern engagiert, um offene Fragen im Bereich der human- und ökotoxikologischen Bewertung von Nanomaterialien zu klären. Daneben werden neuere Erkenntnisse zur Sicherheit von Nanomaterialien regelmäßig auf ihre Bedeutung für das Unternehmen ausgewertet. Schließlich ist Nanogate im Bereich der Risikokommunikation stark vernetzt mit verschiedenen wissenschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Gruppen und betreibt eine aktive Kommunikationsstrategie sowohl in Hinblick auf das untersuchte Produkt als auch auf die allgemeine Risikodiskussion zu Nanomaterialien.

Zusammenfassend wird der Indikator „Risikowahrnehmung“ daher als Chance eingestuft.

## **8.4 Diskussion der Ergebnisse**

Bei pro.Glass Barrier 401 handelt es sich um ein Nanoprodukt, welches eine bereits existierende Funktionalität (UV-absorbierende Eigenschaft einer Glasbeschichtung) eines Nicht-Nanoprodukts durch die Verwendung eines speziell entwickelten Nanomaterials optimiert. Daher stellt das Endprodukt eine evolutionäre Weiterentwicklung eines bereits existierenden Referenzprodukts dar und bietet diesem gegenüber verschiedene funktionelle Unterschiede, die sich in einigen der Schlüsselindikatoren widerspiegeln. Insgesamt wird keine grundsätzlich neue Funktionalität bereitgestellt oder gar eine eher revolutionäre Weiterentwicklung eines Produkts angestrebt. Entsprechend ergibt sich für dieses Nanoprodukt auch eine

größere Anzahl an indifferenten Indikatoren, während die gezielt hergestellten Unterschiede in der Funktionalität zu einer Anzahl von Stärken des Produkts führen.

Bei der Betrachtung mehrerer Schlüsselindikatoren geht dabei als ein wesentlicher Faktor die längere Haltbarkeit der UV-absorbierenden Eigenschaft des Nanoprodukts ein. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde vorausgesetzt, dass die betrachtete funktionelle Einheit in zeitlichen Zyklen, die durch die Haltbarkeit der UV-absorbierenden Schicht bestimmt werden, auch tatsächlich ausgetauscht wird. Nur dann führt der Unterschied in der Haltbarkeit der UV-absorbierenden Schicht auch zu entsprechenden Vorteilen bei den jeweiligen Indikatoren. Sofern die UV-absorbierende Schicht zwar einen zusätzlichen Nutzen für den Kunden und damit gegebenenfalls ein Kaufargument darstellt, die UV-Absorption jedoch keine strikte Notwendigkeit für den Einsatz des Endprodukts, also der beschichteten Glasscheibe darstellt, würden sich für die zeitlichen Zyklen des Produktersatzes voraussichtlich deutlich andere Randbedingungen ergeben. In einem solchen Fall würde sich für einen Großteil der betrachteten Indikatoren ebenfalls ein indifferentes Bild ergeben. Die hier erzielten Ergebnisse sind daher nur auf solche Fälle anwendbar, in denen die UV-absorbierende Wirkung einen tatsächlich integralen Bestandteil des Produkts ausmacht.

Darüber hinaus ist von Nanogate darauf hingewiesen worden, dass hinsichtlich einer Gesamtinterpretation der verschiedenen Indikatoren zu beachten ist, dass die Schlüsselfaktoren für jeweils unterschiedliche Akteure in der Wertschöpfungskette verschieden relevant sind. Während die „Störfallaspekte“ beispielsweise vor allem für die Hersteller eine Rolle spielen, nicht aber für den Endkunden, also die Käufer der beschichteten Glasscheibe, betreffen die Vorteile beim Gebrauchsnutzen unmittelbar den Endkunden selbst. Auch vor diesem Hintergrund kann eine Gesamtbewertung der einzelnen Faktoren nicht ohne eine detaillierte Berücksichtigung der jeweils zugrunde liegenden Einflussfaktoren erfolgen.

## 8.5 Strategische Optimierung

Für pro.Glass Barrier 401 wurde kein Schlüsselindikator in den Bereich der Risiken eingeordnet und nur zwei Schlüsselindikatoren (Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt, Störfallaspekte) in den Bereich der Schwächen. Diesen Schwächen steht insbesondere die Einstufung des Indikators Risikowahrnehmung in dem Bereich der Chancen gegenüber.

Die Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt wird als Schwäche eingeordnet, da in Hinblick auf Arbeitnehmer beim Ansetzen des Tauchbades mit relativ großen Mengen (> 120 mg) an Nanomaterialien in flüssiger Form umgegangen wird, in Hinblick auf die Umwelt keine nano-spezifische Entsorgung des Tauchbades erfolgt, so dass damit eine relativ umfangreiche Freisetzung (5-500 kg) von Nanopartikeln in flüssiger Form in die standardmäßigen Entsorgungswege und damit im ungünstigsten Fall auch in die Umwelt einhergeht. Hier ist bislang offen, ob und wie eine Rückhaltung beziehungsweise Agglomeration der Nanopartikel über den Entsorgungsprozess stattfindet und ob daher mit einer Freisetzung in die Umwelt zu rechnen wäre. Auch ist derzeit keine spezifische Entsorgung

des Nanoprodukts (beschichtete Glasscheibe) am Ende des Lebenszyklus vorgesehen, wobei zu diesem Zeitpunkt die Nanopartikel in eine feste Matrix eingebunden sind.

Bei den Störfallaspekten ergibt sich bei der Herstellung des flüssigen Beschichtungsmaterials ein erhöhter Vorsorgebedarf zum Schutz der Arbeiter. Grund hierfür ist, dass in der Anlage und im Betriebsbereich mögliche störfallauslösende Gefahrstoffe und Nanomaterialien in größerer Menge (> 1 kg) vorhanden sein können.

Um diese Schwächen in Stärken beziehungsweise zumindest in indifferente Indikatoren zu verwandeln, sollte insbesondere bei den Unsicherheiten bezüglich der human- und ökotoxikologischen Bewertung sowie der Entsorgung der Nanomaterialien und des Nanoprodukts angesetzt werden. Hierfür ist Nanogate aufgrund seines langjährigen Engagements im Bereich der Erforschung offener human- und ökotoxikologischer Fragen, wie es sich in der Einstufung des Indikators Risikowahrnehmung in den Bereich der Chancen widerspiegelt, gut aufgestellt.

Insbesondere besteht Klärungsbedarf, ob bei der Entsorgung sowohl des Tauchbades mit Nanomaterialien in flüssiger Form als auch des UV-beschichteten Glases ein Risiko für die Umwelt besteht. Hinsichtlich der Tauchbadentsorgung kann zwar von einer schnellen Agglomeration der Nanopartikel nach der Entsorgung unter üblichen Umweltbedingungen ausgegangen werden, es bleibt gegenwärtig jedoch offen, ob damit ein ökotoxikologisches Gefährdungspotenzial sicher ausgeschlossen ist, oder ob gegebenenfalls eine separate Entsorgung notwendig werden könnte.

Weiterer Prüfbedarf ergibt sich hinsichtlich der Einbindung der Nanopartikel in die Beschichtung beim fertigen Nanoprodukt. Zwar ist aufgrund der festen Einbindung in die Produktmatrix zunächst von einer geringen Freisetzung in die Umwelt auszugehen. Auch hier bestehen jedoch Unsicherheiten, ob es beim Glas-Recycling zu einer erneuten Mobilisierung von Nanopartikeln kommen könnte. Um bei diesem Aspekt zu weitergehenden Aussagen gelangen zu können, sind Forschungsarbeiten notwendig, die von Nanogate im Rahmen einer Teilnahme an verschiedenen Projekten zu human- und ökotoxikologischen Effekten von Nanopartikeln auch aktiv verfolgt werden.

Auch in Hinblick auf mögliche Störfallgefährdungen wird von Nanogate anhand von regelmäßig durchgeführten Gefährdungsbeurteilungen in Verbindung mit den nötigen Sicherheitsvorkehrungen ein sicheres Arbeiten mit hoher Zuverlässigkeit gewährleistet.

Weitergehendes Optimierungspotenzial könnte bezüglich des verwendeten Batch-Verfahrens vorliegen (geringere Ansatzmengen, Reduzierung der Expositionsmöglichkeiten beim Ansetzen der Charge). Dies würde auch zur Reduzierung des Störfallpotenzials beim Ansetzen des Tauchbades beitragen. Relevant ist hier auch die Einschätzung beim Schlüsselindikator „Exposition am Arbeitsplatz“, durch den gegebenenfalls notwendige höhere Aufwendungen für Arbeitsschutzmaßnahmen im Vergleich zur Herstellung des Referenzprodukts abgeschätzt wurden. Da für diesen Schlüsselindikator ein indifferentes Ergebnis erzielt wurde, ist nicht zu erwarten, dass eine gegebenenfalls notwendige

Erhöhung von Arbeitsschutzmaßnahmen zu einer signifikanten Beeinträchtigung des Gesamtergebnisses für das Nanoprodukt führen würde.

## 9 Ergebnisse des Fallbeispiels X-SEED

Parallel zum vorgenannten Fallbeispiel wurde das Produkt X-SEED® der Firma BASF SE betrachtet. In den folgenden Kapiteln wird zunächst das Produkt beschrieben (Kapitel 9.1), anschließend werden die Ergebnisse der SWOT-Matrix (Kapitel 9.2) sowie der einzelnen Schlüsselindikatoren (Kapitel 9.3) dargestellt und diskutiert (Kapitel 9.4). Schließlich werden die Aspekte der strategischen Optimierung des Produkts thematisiert (Kapitel 9.5).

### 9.1 Produktbeschreibung

In dem vorliegenden Fallbeispiel wurde als Nanoprodukt ein Betonfertigteile untersucht, bei dessen Herstellung der Erhärtungsbeschleuniger X-SEED der Firma BASF SE zugesetzt wird. Das Betonfertigteile wurde mit einem herkömmlichen Produkt ohne Beschleuniger verglichen.

Um die Vergleichbarkeit von Nanoprodukt und Referenzprodukt sicherzustellen, müssen beide Alternativen die gleiche technische Funktionalität aufweisen. Dazu ist es notwendig, die Nutzenaspekte beider Produkte zu analysieren und eine grundlegende gemeinsame Funktionalität festzulegen (siehe dazu auch Kapitel 7.2.2).

Dies bedarf zunächst einer Erläuterung, wie Beton hergestellt und genutzt wird. Nach DIN EN 206-1:2000 wird Beton definiert als ein Baustoff, der durch Mischen von Zement sowie grober und feiner Gesteinskörnung und Wasser (so genanntem Zugabewasser), mit oder ohne Zugabe von Zusatzmitteln (zum Beispiel „Verflüssiger“) und Zusatzstoffen (zum Beispiel „Kalksteinmehl“) erzeugt wird.

Beton ist ein wichtiger mineralischer Baustoff im Bauwesen, der als Frischbetongemisch leicht verarbeitet und transportiert werden kann und trotzdem durch die Erhärtung monolithische Bauteile entstehen lässt.<sup>30</sup> Neben der Verwendung von Beton direkt an der Baustelle (Einfüllen in die Schalungen) spielt auch vorgefertigter Beton (Betonfertigteile) bei der späteren Bauwerkherstellung eine wichtige Rolle. So beträgt der Anteil von Betonfertigteilen am Gesamtmarkt in Europa über 20%, in Deutschland liegt dieser bereits bei 30%. Bei der Herstellung der Betonfertigteile wird (hoch-) fließfähiger Beton in wieder benutzbare Formen beziehungsweise Schalungen eingebracht und unter kontrollierten Bedingungen verarbeitet und gehärtet. Die Teile werden dann bis zur Auslieferung an die Baustelle gelagert und können je nach Baufortschritt an die Baustelle geliefert und dort sofort in ihre endgültige Position in der Struktur des Bauwerkes gehoben werden.

<sup>30</sup> Vgl. Quack, D.; Liu, R.; Ökobilanz Betondecken - Eine vergleichende Analyse von Spannbeton-Fertigdecken mit Halfertigteildecken und Massivdecken aus Ortbeton, S. 23.

Die Bestandteile von Beton und ihre Funktionen lassen sich wie folgt beschreiben:

- Unverzichtbarer Bestandteil von Beton ist Zement, dessen Herstellung für 5% des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verantwortlich ist.<sup>31</sup> Nach der DIN EN 197-1 können fünf Hauptarten an Zement unterschieden werden:
  - CEM I: Portlandzement; Hauptbestandteil des Portlandzements ist feingemahlener Portlandzementklinker;<sup>32</sup>
  - CEM II: Portlandkompositzement; dieser besteht aus verschiedenen Hauptbestandteilen, die jeweils durch bestimmte Kennbuchstaben in der Zementbezeichnung zu erkennen sind;
  - CEM III: Hochofenzement; Hauptbestandteile sind Portlandzementklinker und Hüttensand;
  - CEM IV Puzzolanzement<sup>33</sup> und
  - CEM V Kompositzement.
- Gesteinskörnungen bilden mit 70% des Betonvolumens mengenmäßig den Hauptbestandteil. Sie sind ein Gemenge oder Haufwerk von unebrochenen oder gebrochenen Körnern, aus natürlichen oder künstlichen mineralischen Stoffen, die durch das Bindemittel Zement zum Beton verkittet werden.
- Betonzusatzmittel sind Stoffe, die dem Beton in fein verteilter Form (flüssig, pulverförmig, et cetera) in geringen Mengen zugesetzt werden, um durch chemische oder physikalische Wirkung bestimmte Eigenschaften des Frischbetons oder des erhärteten Betons zu beeinflussen.
- Betonzusatzstoffe sind fein verteilte Stoffe, die im Beton verwendet werden, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern oder zu erreichen. Nach der DIN EN 206-1/DIN 1045-2 können zwei Typen von anorganischen Zusatzstoffen unterschieden werden:
  - Typ I: nahezu inaktive Zusatzstoffe wie Gesteinsmehle nach DIN EN 12620 oder Pigmente nach DIN EN 12878;
  - Typ II: puzzolanische oder latenthdraulische Zusatzstoffe wie Trass nach DIN 51043, Flugasche nach DIN EN 450 oder Silicastaub.

Bei dem hier betrachteten Produkt X-SEED handelt es sich um einen Betonzusatzmittel, durch dessen Einsatz bei der Betonherstellung eine beschleunigte Entwicklung der Früh-

---

<sup>31</sup> Vgl. [http://www.wbcscement.org/pdf/agenda\\_gr.pdf](http://www.wbcscement.org/pdf/agenda_gr.pdf) (so am 15.8.2011).

<sup>32</sup> Portlandzementklinker besteht im Wesentlichen aus Calciumsilicaten. Portlandzement besteht aus überwiegend natürlichen Rohmaterialien wie Kalkstein, Ton, Sand und Eisenerz, die zunächst bei 1430 °C zu Klinker gebrannt und dann mit Gips zum fertigen Zement vermahlen werden. Neben dem hohen Energiebedarf wird auch durch das notwendige Kalzinieren von Kalk eine große Menge CO<sub>2</sub> freigesetzt.

<sup>33</sup> Natürliche Puzzolane sind Gesteinsmehle vulkanischen Ursprungs, Trass oder Sedimentgestein mit geeigneter chemisch-mineralogischer Zusammensetzung, die mit gelöstem Calciumhydroxid reagieren und erhärtungsfähige Verbindungen eingehen können.

festigkeit des Betons erreicht wird. Dadurch kann der Beton rund zwei Mal früher als ohne den Einsatz von X-SEED entschalt werden. Gleichzeitig sind keine Einbußen bei der Endfestigkeit und den Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons zu verzeichnen; diese sind gleichbleibend oder sogar höher.<sup>34</sup>

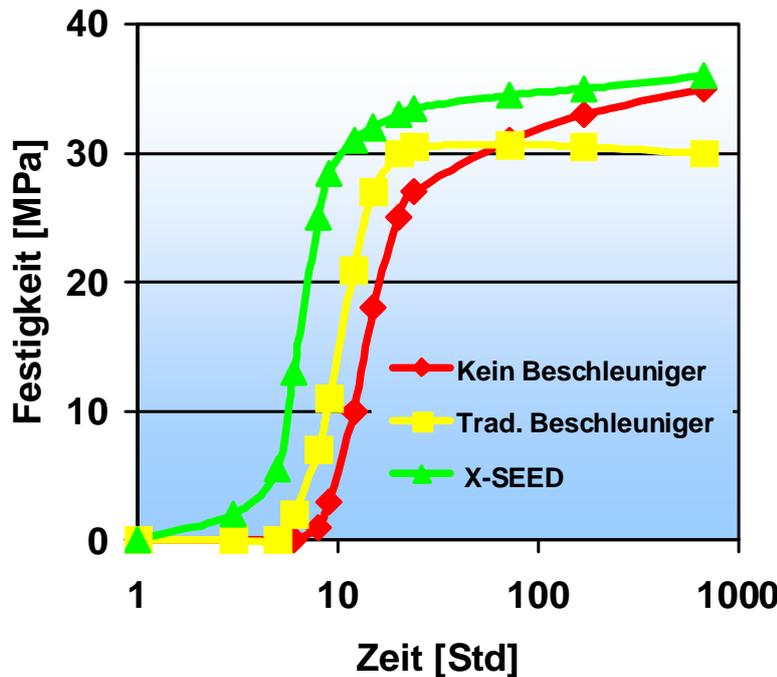


Abbildung 8: Crystal Speed Hardening (CSH) (Quelle: Kompatscher, BASF SE 2011)

Der Nutzenaspekt von X-SEED in Hinblick auf die Festigkeit des Betons ist daher als eine wichtige technische Funktionalität des Produkts zu betrachten. Um für diese Funktionalität im Rahmen eines Vergleichs zwischen Nano- und Referenzprodukt korrekt zu modellieren, muss die Systemgrenze der Untersuchung jeweils auf den fertigen Beton ausgeweitet werden.

Die funktionelle Einheit des Nanoprodukts wird deshalb als ein Kubikmeter Betonfertigteile definiert. Dieses Betonfertigteile verfügt über einen Zementgehalt von 400 Kilogramm. Die verbleibende Masse besteht aus Gesteinskörnungen und gegebenenfalls anderen Betonzusatzmitteln und -zusatzstoffen (siehe oben).

<sup>34</sup> Angaben von BASF SE 2011.

X-SEED besteht aus anorganischen Nanomaterialien (Calciumsilikathydrat) mit einer breiten Partikelgrößenverteilung, wobei circa zehn bis 30% der Partikel kleiner als 100 nm sind.

Durch die Verwendung dieses breiten Spektrums an Calciumsilikathydrat-Partikeln (einschließlich der nanopartikulären Calciumsilikathydrate), werden dem Beton Kristallisationskeime zugegeben, die dieser für seine Aushärtung benötigt. Beim Referenzprodukt sind anfangs noch keine Kristallisationskeime vorhanden; diese müssen sich erst noch bilden (siehe folgende Abbildungen):

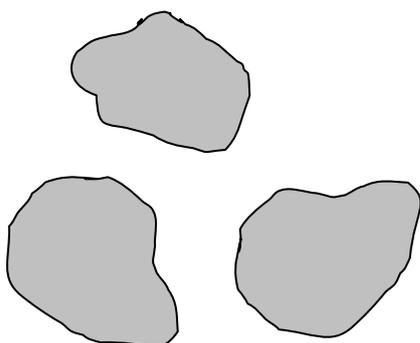


Abbildung 9: Betonaushärtung ohne Zugabe von X-SEED (Quelle: Kompatscher, BASF SE 2011)

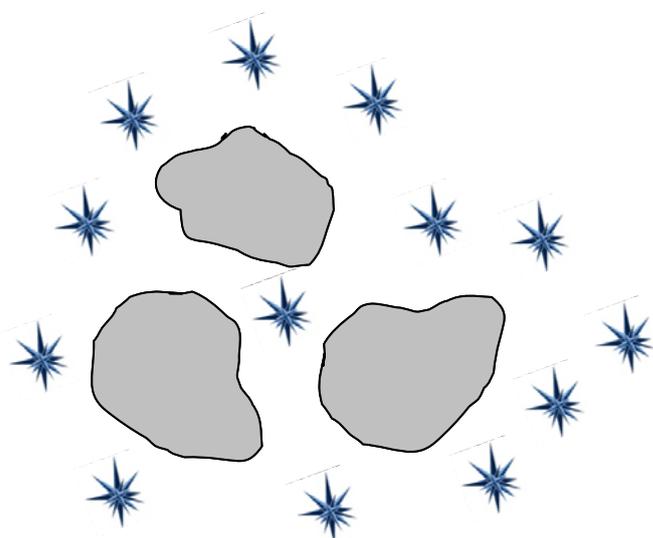


Abbildung 10: Kristallisationskeime bei der Betonaushärtung mit Zugabe von X-SEED (Quelle: Kompatscher, BASF SE 2011)

X-SEED wird in wässriger Suspension hergestellt und verbleibt in dieser Darreichungsform auch während des Verkaufs und der Zugabe bei der Betonherstellung. Nach dem

Erhärtungsprozess des Betons ist X-SEED chemisch fest im Beton eingebunden.<sup>35</sup> Wird die X-SEED-Suspension neutralisiert beziehungsweise eingedampft oder eingetrocknet, entsteht kristalline Kieselsäure, die alle nanoskaligen Calziumsilikathydrat-Teilchen einschließt.

Im Rahmen des vorliegenden Fallbeispiels werden ein Material- sowie ein Energie-Szenario betrachtet, um zwei grundlegende Einsatzmöglichkeiten von X-SEED zu beleuchten. Im Folgenden werden diese beiden Szenarien in Hinblick auf Nano- und Referenzprodukt definiert:

- Im **Material-Szenario** wird davon ausgegangen, dass beim Nanoprodukt ein Zementtyp mit einem geringeren Klinkeranteil verwendet werden kann. Klinkerarme Zemente, die einen höheren Anteil von Füllstoffen wie Hüttensand und Flugasche enthalten, hatten bislang den Nachteil, dass sie wesentlich langsamer aushärten. Das hat ihren Einsatz in dem Betonfertigteilmarkt bisher eingeschränkt. Der durch X-SEED optimierte Erhärtungsprozesses soll diesen Nachteil beheben. Konkret wird im Material-Szenario angenommen, dass für die Herstellung des Nanoprodukts (ein Kubikmeter Betonfertigteil) 400 kg Zement des Typs CEM II mit einem Klinkeranteil von 70% sowie 10 kg X-SEED verwendet werden. Bei der Herstellung des Referenzprodukts wird von einem Kubikmeter Betonfertigteil ausgegangen, bei dem 400 kg des Zementtyps CEM I mit einem Klinkeranteil von 95% verwendet werden, um die gleiche Frühfestigkeit des Betons zu erreichen.
- Das **Energie-Szenario** adressiert hingegen die aufgrund von X-SEED ermöglichte schnellere Betonerhärtung. Nach dem heutigen Stand der Technik wird bei der Betonfertigteilherstellung der Beton auf 50-60 Grad erwärmt, um die Herstellung der Betonfertigteile zu beschleunigen. Die dafür benötigte Wärmeenergie wird mit Dampf bereitgestellt, wobei für die Erzeugung des Dampfes typischerweise Heizöl verbrannt werden muss. Nach Literaturangaben<sup>36</sup> werden dafür 10,7 l Heizöl pro Tonne Betonfertigteil benötigt, was circa 22 Liter Heizöl pro Kubikmeter Beton entspricht. Bei der Herstellung des Nanoprodukts wird von einem Kubikmeter Betonfertigteil ausgegangen, bei dessen Herstellung 400 kg CEM I und 10 kg X-SEED verwendet werden. Als Aushärungszeit werden 5 Stunden bei Raumtemperatur angenommen. Für die Herstellung des Referenzproduktes wird ebenfalls von einem Kubikmeter Betonfertigteil ausgegangen, bei dessen Herstellung 400 kg CEM I erforderlich sind. Es wird ebenfalls von einer Aushärungszeit von 5 Stunden ausgegangen, allerdings ist aufgrund des Verzichts auf X-SEED eine Wärmebehandlung mittels Dampfzufuhr erforderlich.

<sup>35</sup> Angaben von Herrn Kompatscher, BASF SE 2011.

<sup>36</sup> Vgl. Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, *Teil II Baustoffe* München, im Report 065.1/ KEA Forschungsstelle für Energiewirtschaft (1999).

## 9.2 SWOT-Matrix

Die Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, dass in beiden Szenarien die meisten Schlüsselindikatoren als Stärke beziehungsweise als Chance für X-SEED zu werten sind. Als einzige Schwäche sind im Material-Szenario die Lebenszykluskosten von X-SEED zu verzeichnen, während diese im Energie-Szenario eine weitere Stärke bilden.

Zu den indifferenten Schlüsselindikatoren zählen in beiden Szenarien „Exposition am Arbeitsplatz“, „Rechtliche Rahmenbedingungen und Forschungsförderung“, „Recyclingfähigkeit“ sowie „Ressourcenverfügbarkeit“.

Die Ergebnisse der einzelnen Schlüsselindikatoren für X-SEED (Material-Szenario) werden in der folgenden SWOT-Matrix zusammengefasst.



Abbildung 11: SWOT-Matrix mit den Ergebnissen der Schlüsselindikatoren für das Fallbeispiel „X-SEED“ (Material-Szenario) – (Quelle: Öko-Institut 2011)

Das Ergebnis der SWOT-Analyse für das Energie-Szenario von X-SEED können der folgenden Abbildung entnommen werden:



Abbildung 12: SWOT-Matrix mit den Ergebnissen der Schlüsselindikatoren für das Fallbeispiel „X-SEED“ (Energie-Szenario) – (Quelle: Öko-Institut 2011)

### 9.3 Einzelergebnisse der Schlüsselindikatoren

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Selbstevaluierung von BASF SE für X-SEED für die einzelnen Schlüsselindikatoren der SWOT-Matrix erläutert. Dazu wird zunächst auf die Ebene der Stärken-Schwächen-Analyse und anschließend auf die Ebene der Chancen-Risiken-Analyse eingegangen.

#### 9.3.1 Stärken-Schwächen-Analyse

Die Ergebnisse der Stärken-Schwächen-Analyse lassen sich wie folgt beschreiben:

##### CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (Product Carbon Footprint)

Im Vergleich zum Referenzprodukt können beim Einsatz von X-SEED sowohl im Material-Szenario als auch im Energie-Szenario in erheblichem Umfang Treibhausgase eingespart werden.

Im Material-Szenario ist die Ursache hierfür, dass bei der Herstellung des Betonfertigteils aufgrund des Einsatzes von X-SEED der Zementtyp CEM II verwendet werden kann, der einen geringeren Klinkeranteil als der Zementtyp CEM I aufweist und damit in den Vorketten weniger CO<sub>2</sub> entsteht. Die Herstellung von X-SEED verursacht hierzu vergleichsweise nur eine geringe Menge Treibhausgasemissionen, weshalb insgesamt Umweltbelastungen gegenüber dem Referenzprodukt eingespart werden können. Im Energie-Szenario beruht das bessere Abschneiden des Nanoprodukts darauf, dass auf die Beheizung und damit auf die Verbrennung von Heizöl bei der Herstellung der Betonfertigteile verzichtet werden kann. Im Fallbeispiel führt die Verwendung von X-SEED so im Netto-Ergebnis zu einer spezifischen Einsparung von 53 kg CO<sub>2</sub> (im Energie-Szenario) beziehungsweise 74 kg CO<sub>2</sub> (im Material-Szenario) pro Kubikmeter Beton. Dies entspricht einer Einsparung von 14% (im Energie-Szenario) beziehungsweise 22% (im Material-Szenario). Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von X-SEED ist deshalb im Vergleich zum Referenzprodukt in beiden Szenarien als eine Stärke zu bewerten.

Rechnet man im Material-Szenario die spezifischen CO<sub>2</sub>-Einsparungen pro Kubikmeter Beton auf den europäischen Markt für Betonfertigteile hoch, so können mit X-SEED perspektivisch pro Jahr bis zu rund 2,7 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden.

Dies beruht auf der vorsichtigen Annahme, dass bei etwa 90 Millionen Kubikmetern Fertigteilbeton rund die Hälfte davon bei Verwendung von X-SEED auf klinkerreduzierte Zemente umgestellt werden kann. Beim Energie-Szenario beträgt das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial pro Jahr etwa 1,2 Millionen Tonnen. Hier wird davon ausgegangen, dass rund 25% der Betonfertigteile in Europa zur Beschleunigung der Erhärtung zusätzlich mit Wärme behandelt werden. Um dieses Einsparpotenzial auch realisieren zu können, muss auf die Wärmezufuhr allerdings tatsächlich verzichtet werden. Eine dennoch durchgeführte Erwärmung zugunsten eines noch schnelleren Herstellungsprozesses würde die Treibhausgas-Einspareffekte wieder zunichte machen.

### **Energieeffizienz**

Bei der Bestimmung des Schlüsselindikators „Energieeffizienz“ wurden dieselben Randbedingungen zugrunde gelegt wie für die Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks. Auch für die Energieeffizienz spielt die Herstellung von X-SEED nur eine untergeordnete Rolle. So beträgt der Energieaufwand für die Herstellung von X-SEED nur 62 Megajoule pro Kubikmeter Beton, dessen Produktion insgesamt im Material-Szenario circa 1630 Megajoule verursacht. Dies entspricht einem Anteil von nur 3,8%. Maßgeblich für die bessere Energieeffizienz des Nanoprodukts gegenüber dem Referenzprodukt ist sowohl beim Material- als auch beim Energie-Szenario die Produktionsphase, während sich in den Lebenswegabschnitten Transport, Gebrauch und Entsorgung keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Alternativen ergeben. Im Material-Szenario können für die Produktion des Nanoprodukts im Vergleich zum Referenzprodukt rund 340 Megajoule pro funktionelle Einheit eingespart

werden. Wie auch beim Schlüsselindikator „CO<sub>2</sub>-Fußabdruck“ liegt dies maßgeblich daran, dass beim Nanoprodukt der Zementtyp CEM II verwendet werden kann, dessen Herstellung gegenüber dem beim Referenzprodukt verwendeten Zementtyp CEM I weniger Energie benötigt. Im Energie-Szenario fällt die Energieeinsparung noch größer aus: Während für das Nanoprodukt circa 2040 Megajoule pro funktionelle Einheit benötigt werden, sind es beim Referenzprodukt rund 2970 Megajoule pro funktionelle Einheit. Dies ist maßgeblich auf die eingesparte Beheizung der Betonfertigteile zurückzuführen.

Eine Hochrechnung der Energieeffizienz im Material-Szenario ergibt für Europa ein Einsparpotenzial von 11 Gigajoule pro Jahr. Dem liegt als Annahme zu Grunde, dass circa 80% der Betonfertigteile mit CEM I hergestellt werden und bei Verwendung von X-SEED die Hälfte davon auf CEM II umgestellt werden könnte. Bei einem Marktvolumen von 90 Mio. Kubikmeter Betonfertigteile ergeben sich so 36 Mio. Kubikmeter (beziehungsweise funktionelle Einheiten).

Die Hochrechnung der Energieeffizienz im Energieszenario ergibt für Europa ein Einsparpotenzial von 20 Gigajoule pro Jahr. Dem liegen als Annahmen zu Grunde, dass circa 25% der Betonfertigteile vor allem in den kalten Monaten zusätzlich mit Wärme behandelt werden müssen. Für das angenommene Marktvolumen von 90 Millionen Kubikmeter Betonfertigteile beziffert sich das Potenzial so zu 22,5 Millionen Kubikmeter (beziehungsweise funktionelle Einheiten).

Auf Basis dieser Ergebnisse wird der Schlüsselindikator „Energieeffizienz“ in den Bereich der Stärke eingeordnet.

### **Exposition am Arbeitsplatz**

Aufgrund der durch BASF vorgenommenen Selbstevaluation ist der Schlüsselindikator „Exposition am Arbeitsplatz“ als indifferenter Indikator einzustufen, das heißt es gibt keinen wesentlichen Unterschied zwischen Nano- und Referenzprodukt. Dies beruht insbesondere darauf, dass die Nanopartikel bei der Herstellung von X-SEED erst im Reaktor (in flüssiger Phase) entstehen und X-SEED ausschließlich in der wässrigen Suspension weiterverarbeitet wird.

Als leichter Vorteil bei der Herstellung eines Betonfertigteils mit X-SEED gegenüber dem Referenzprodukt ist im Energie-Szenario die Vermeidung der Dampferzeugung mit Heizöl zu berücksichtigen. Da beim Nanoprodukt eine Beheizung des Betons nicht erforderlich ist, kann auch auf die Lagerung von Heizöl verzichtet und damit eine Brandgefahr eliminiert werden. Je nachdem, ob Heizöl auch für andere Prozesse notwendig wäre, wird der Heizöltank komplett überflüssig. Bei den übrigen Kriterien beziehungsweise Leitfragen des Schlüsselindikators ergeben sich keine Unterschiede zwischen dem Nano- und Referenzprodukt.

## **Gebrauchsnutzen**

Beim Gebrauchsnutzen birgt ein mit X-SEED versetzter Beton leichte Vorteile gegenüber dem Referenzprodukt. Zu nennen sind hier neben der Zuverlässigkeit in der Funktion die hohe Robustheit der Betonfertigteile mit einer gleichbleibenden oder höheren Endfestigkeit sowie die gegenüber dem Referenzprodukt angenommenen besseren Dauerhaftigkeitseigenschaften. Zusätzlich beeinflusst der Einsatz von X-SEED die Zement-Mikrostrukturbildung positiv. Aus Sicht des Komforts ist der Einsatz von X-SEED einfach und gewährleistet die schnelle Verarbeitung der Betonfertigteile, da gegenüber dem Referenzprodukt durch die beschleunigte Entwicklung der Frühfestigkeit ein schnelles Nacharbeiten, Entschalen und Abheben der Betonfertigteile möglich ist.

## **Lebenszykluskosten**

Bei der Untersuchung der Lebenszykluskosten werden die Zusatzkosten für X-SEED im Energie-Szenario bei den Herstellern von Betonfertigteilen durch die Einsparung von Energiekosten mehr als kompensiert. Mit einem angenommenen Heizölpreis von 0,70 Euro pro Liter ergibt sich pro Kubikmeter Beton eine Einsparung von circa 6 Euro. Daher ist in diesem Fall der Indikator als Stärke zu werten. Hingegen zeigt sich im Material-Szenario, dass die Zusatzkosten für X-SEED durch die Einsparungen beim Zement (Substitution des Zementtyps CEM I durch den preiswerteren Typ CEM II) nicht kompensiert werden können. Ein Kubikmeter Beton mit X-SEED ist hier rund drei Euro teurer als ein Kubikmeter Referenzprodukt. Der Indikator ist deshalb im Material-Szenario als Schwäche einzustufen.

## **Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt**

Der Schlüsselindikator „Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt“ ist als Stärke zu werten. Ursache hierfür ist, dass die auf Basis des Schweizer Vorsorgerasters ermittelten nanospezifischen Risiken von X-SEED auch ohne Vorliegen weiterer Risikoabklärungen als gering einzustufen sind (Einstufung in die Klasse A). Das Ergebnis des Vorsorgebedarfs in Abhängigkeit vom Gefährdungspotenzial auf der einen Seite und der potenziellen Exposition des Menschen beziehungsweise dem Eintrag in die Umwelt auf der anderen Seite zeigt, dass der Vorsorgebedarf

- für Arbeitnehmer bei 8,1 Punkten,
- für Verbraucher bei 0,5 Punkten und
- für die Umwelt bei 9,0 Punkten

liegt.

Die Werte liegen damit weit unterhalb des Schwellenwertes von 20 Punkten, ab dem gemäß Vorsorgeraster ein nanospezifischer Handlungsbedarf vorliegt.

## Störfallaspekte

Bei der Betrachtung der Störfallaspekte gehen grundsätzlich vergleichbare Randbedingungen ein wie bei der Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt (geringes Wirkungspotenzial bei schneller Einbindung der Nanopartikel in die Produktmatrix). Für die Betrachtung der Störfallaspekte ist wichtig, dass sowohl die Herstellung von X-SEED, als auch der Verkauf und die Zugabe bei der Betonherstellung in wässriger Suspension erfolgt. Wenn diese Suspension neutralisiert beziehungsweise eingedampft oder eingetrocknet wird, entsteht kristalline Kieselsäure, die alle nanoskaligen Calziumsilikathydrat Teilchen einschließt. Nach dem Erhärtungsprozess des Betons sind die Nanopartikel von X-SEED chemisch fest im Beton eingebunden. Insgesamt ist der Indikator Störfallaspekte in den Bereich der Stärken einzuordnen. Für die Kenngröße Vorsorgebedarf für Arbeitnehmer liegt das Ergebnis mit 4,5 deutlich unter dem definierten Grenzwert von 20, ab dem von einem Handlungsbedarf auszugehen ist. Gleiches gilt für den Vorsorgebedarf für die Bevölkerung mit einem Wert von 0,23.

## Symbolischer Nutzen

Beim symbolischen Nutzen hat mit X-SEED versetzter Beton leichte Vorteile gegenüber dem Referenzprodukt. So ist unter dem Gesichtspunkt des Designs anzuführen, dass mit Hilfe von X-SEED die Betonoberflächen optisch ansprechender gestaltet werden können. Durch die homogenere Beschleunigung der Erhärtung ergibt sich auch eine feinere, homogenere, poren- und lunkerfreie Betonoberfläche. Dadurch sieht das Endprodukt weniger nach Beton aus wodurch sich mehr Gestaltungsfreiheit ergibt. Außerdem wird seitens BASF darauf hingewiesen, dass der Einsatz von X-SEED die Anwendung eines fortschrittlichen Technikstands zum Ausdruck bringt, welches mit einer entsprechenden Prestigewirkung verbunden ist.

### 9.3.2 Chancen-Risiken-Analyse

Es folgen die Ausführungen zu den Ergebnissen der Chancen-Risiken-Analyse:

#### Beschäftigungswirkung

Die Beschäftigungswirkung des Nanoprodukts wird als Chance gewertet. Diese Einstufung ist vorwiegend durch einen Anstieg der Bruttobeschäftigung in den Prozessen bei der Firma BASF SE zurückzuführen. So schätzt BASF SE als Hersteller von X-SEED bei Ausschöpfung des Technologiepotenzials und erfolgreicher Vermarktung auf zehn Jahre ein kumuliertes Volumen von mindestens 50.000 Tonnen X-SEED, wodurch voraussichtlich etwa 50 Vollzeitstellen entstehen werden. Bei linearer Verteilung würden sich daraus im Mittel 5 neue Stellen pro Jahr bei einer Jahresproduktion von 5.000 Tonnen ergeben.

Für andere Hersteller in der vorgelagerten Prozesskette (Ausgangsstoffe für X-SEED oder Betonausgangsstoffe) sind hingegen keine positiven oder negativen Beschäftigungs-

wirkungen zu erwarten, da nicht mehr, aber auch nicht weniger Betonausgangsstoffe zum Einsatz kommen.

Bezogen auf die Anwender von X-SEED (Unternehmen der Beton-Fertigteilehersteller), wird ebenfalls keine wesentliche Änderung der Beschäftigungswirkung durch den Einsatz von X-SEED erwartet. Im Material-Szenario sind deshalb außerhalb von BASF keine Auswirkungen auf die Beschäftigungswirkung zu erwarten. Im Energie-Szenario fällt das Heizen der Betonelemente weg, wodurch die Arbeitsabläufe flexibler werden. Daher ist davon auszugehen, dass entweder die gleiche Anzahl von Arbeitern die frei werdenden Herstellungskapazitäten bedienen oder mehr Arbeiter eingestellt werden, um die geschaffenen Kapazität voll zu bedienen.

Die Beschäftigungswirkung des Nanoprodukts bei den Unternehmen, welche die Betonfertigteile verbauen, wird im Vergleich zum Referenzprodukt als unverändert eingestuft. So ersetzt das Nanoprodukt auf der Baustelle das entsprechende Referenzprodukt in der gleichen Anwendung.

### **Gesellschaftlicher Nutzen**

Ähnlich wie bei den beiden anderen Nutzenaspekten (siehe oben) weist das Nanoprodukt gegenüber dem Referenzprodukt beim gesellschaftlichen Nutzen einen leichten Vorteil auf. So ergibt die Selbstevaluierung beim Aspekt „Schonung knapper Ressourcen“, dass mit dem Einsatz von X-SEED in einem Betonfertigteile abiotische Ressourcen wie Kalkstein und Ton geschont werden. Ursache hierfür ist, dass im Falle des Material-Szenarios beim Nanoprodukt mit CEM II ein Zementtyp mit einem geringeren Klinkeranteil (70% anstelle von 95% beim Referenzprodukt) verwendet werden kann. Folglich kann im gleichen Umfang der Verbrauch der zur Klinkerherstellung erforderlichen Ressourcen Kalkstein und Ton reduziert werden. Beim Energie-Szenario wirkt sich der Einsatz von X-SEED ebenfalls positiv auf die Ressourcenschonung aus, da durch den Verzicht auf den Heizprozess bei der Fertigteilerstellung pro Kubikmeter Beton 22 Liter Heizöl eingespart werden können. Zudem kommt es aufgrund der durch X-SEED verbesserten Dauergebrauchseigenschaften (Verwitterungsbeständigkeit) des Betons zu einer weitgehenden Immobilisierung von Chemikalien im Beton.

Zu einem leichten Vorteil führt auch der Beitrag zur Förderung der wirtschaftlichen Stabilität. Dieser Beitrag wird darin gesehen, dass kleine und mittlere Unternehmen beim Einsatz von X-SEED ihr Produktionsvolumen flexibel anpassen können, ohne dabei zusätzliches Kapital für zusätzliche Investitionen (zum Beispiel in Produktionslagen) aufnehmen zu müssen.

### **Rechtliche Rahmenbedingungen und Forschungsförderung**

Der Schlüsselindikator „Rechtliche Rahmenbedingungen und Forschungsförderung“ ist als indifferent einzustufen. So ergibt die Analyse der drei einzelnen Untersuchungsbereiche dieses Indikators sowohl günstige als auch problematische Einschätzungen. In dem Bereich

„Forschungsförderung im Unternehmen“ wird von einer günstigen Einschätzung ausgegangen, da Nachhaltigkeit und technischer Fortschritt zentrale Schwerpunkte der BASF-Unternehmenspolitik sind und BASF gezielt in die Nanotechnologien als einem von fünf Wachstums-Clustern investiert. Auch der Bereich „Staatliche Forschungsförderung“ ist insgesamt als günstig einzustufen. Obwohl für das hier betrachtete Nanoprodukt X-SEED keine Förderung in Anspruch genommen wurde, profitiert es von den Methoden und Erkenntnissen zur Sicherheitsbewertung, die oft in öffentlich geförderten Forschungsverbänden mit anderen Unternehmen und wissenschaftlichen Instituten entstanden sind. Die rechtlichen Rahmenbedingungen werden hingegen als problematisch eingeschätzt. Dies ist vor allem auf die bestehenden Unsicherheiten der derzeitigen oder zukünftig zu erwartenden Regulierungen von Nanomaterialien auf der EU-Ebene sowie bei der Hersteller- und Umwelthaftung zurückzuführen.

### **Recyclingfähigkeit**

Der Schlüsselindikator „Recyclingfähigkeit“ wird als indifferent eingestuft. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass sich die Betonfertigteile mit X-SEED in der Entsorgung aus physikalisch-chemischer Sicht nicht von denen ohne X-SEED unterscheiden. Wie bereits in Kapitel 9.1 erläutert, sind die Nanopartikel aus X-SEED nach dem Erhärtungsprozess des Betons chemisch fest im Beton eingebunden. Nach dem Erhärten können X-SEED-Teilchen und Betonteilchen chemisch und physikalisch nicht mehr voneinander unterschieden werden. Folglich kommt es nicht dazu, dass in einem mit X-SEED hergestellten Beton nanoskalige Inhaltsstoffe vorliegen, deren Abtrennung beim Recycling erforderlich ist, beispielsweise weil sie aus Gründen des Gesundheits- oder Umweltschutzes nicht ins neue Produkt gelangen sollen oder weil sie die Qualität des neuen Produkts negativ beeinflussen. Zudem entstehen in der Gebrauchsphase des Nanoprodukts keine zusätzlichen Abfälle gegenüber dem Referenzprodukt.

### **Ressourcenverfügbarkeit**

Die Selbstevaluation ergibt für den Schlüsselindikator „Ressourcenverfügbarkeit“, dass dieser weder als eine Chance noch als ein Risiko eingestuft werden kann. Zu den Ressourcen, die für die Herstellung sowohl des Nanoprodukts als auch des Referenzprodukts untersucht wurden, zählen: Zement, Füllstoffe, Wasser sowie Recycling-Zuschlag. Die Verfügbarkeit dieser Ressourcen ist als wenig kritisch einzustufen und wird bei beiden Produkten gleich bewertet. Für das Nanoprodukt sind zudem Natriummetasilikat und Calcium-Nitrat für die Herstellung von X-SEED notwendig. Auch die Verfügbarkeit dieser Ressourcen ist als wenig kritisch einzustufen. Erhalten somit sowohl das Nano- als auch Referenzprodukt die gleiche Gesamtklassifizierung „wenig kritisch“, so ist der Schlüsselindikator als indifferent einzustufen. Im Ergebnis wird damit davon ausgegangen, dass ein

sicherer physischer, temporärer (zeitlicher), finanzieller und technologischer Zugang zu den Ressourcen für die Herstellung von einem Betonfertigteile mit X-SEED gewährleistet ist.

### **Risikowahrnehmung**

Bei den Aspekten der Risikowahrnehmung ist insgesamt von einer Chance für X-SEED auszugehen. Untersucht wurden dazu vier Bereiche: „Unternehmensinterne Einschätzung der Risikopotenziale des Nanoprodukts“, „Analyse des Produktumfelds“, „Risikomanagement“ sowie die „Risikokommunikation“. Nach Einschätzung von BASF weist das Nanoprodukt nur geringe oder keine nanospezifischen Risiken für Mensch und Umwelt auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass X-SEED in Lösung hergestellt, eingesetzt und verkauft wird. Die zugesetzten Nanomaterialien sind nach dem Erhärtungsprozess chemisch fest im Beton eingebunden. Ausgehend von dieser unternehmensinternen Einschätzung ist BASF aufgrund seiner Position im Produktumfeld sowie der bereits ergriffenen Maßnahmen zum Risikomanagement und zur Risikokommunikation in der Lage, angemessen auf die gesellschaftliche Risikowahrnehmung einzugehen. So verfolgt BASF SE eine proaktive Kommunikation allgemein zum Thema Nanotechnologien gegenüber Stakeholdern, Mitarbeitern, Kunden und nachgelagerten Stufen in der Wertschöpfungskette. Zu X-SEED selbst erfolgt die spezifische Kommunikation mit Kunden in der Wertschöpfungskette hauptsächlich über das Technische Merkblatt und das Sicherheitsdatenblatt. Als problematisch wird von BASF die generelle Diskussion über Nanoprodukte gesehen sowie die Ungewissheit darüber, welche Konsequenzen dies zumindest mittelfristig auf die Gesetzgebung und Märkte hat.

## **9.4 Diskussion der Ergebnisse**

Bei der Frage, ob das Nanoprodukt im Vergleich zum Referenzprodukt einen wesentlichen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz in der Bauindustrie leisten kann, punktet X-SEED vor allem mit den beiden Schlüsselindikatoren „CO<sub>2</sub>-Fußabdruck“ und „Energieeffizienz“ auf der Stärkenseite. Das positive Ergebnis beruht im Wesentlichen darauf, dass bei Verwendung von X-SEED gleiche Funktionalitäten (hohe Frühfestigkeit und gleichbleibende bis höhere Endfestigkeit) im Vergleich zum Referenzprodukt mit einfacheren, das heißt weniger umweltbelastenden Zementqualitäten eingesetzt werden können (Material-Szenario).

Im Energie-Szenario beruhen die relativen CO<sub>2</sub>- und Energieeinsparpotenziale auf den dank X-SEED beschleunigten Erhärtungsprozess und den dadurch ermöglichten Verzicht auf eine Beheizung während der Fertigteilherstellung. Diese Potenziale lassen sich allerdings nur dann verwirklichen, wenn die Hersteller tatsächlich auf ein Beheizen der Fertigteile verzichten und nicht noch schnellere Aushärtungszeiten anstreben, weil sie aus Termin- und Auslastungsgründen zusätzlich zur Verwendung von X-SEED beheizen. Analog ist beim Material-Szenario zu beachten, dass die Hersteller von Betonfertigteilen trotz des Einsatzes von X-SEED möglicherweise weiterhin Zement vom Typ CEM I verwenden und damit sowohl höhere Produktionskosten in Kauf nehmen als auch die Energieeinsparpotenziale zunichte

machen würden. Die tatsächliche Realisierung der CO<sub>2</sub>- und Energieeinsparpotenziale liegt damit in beiden Szenarien nicht primär in der Hand von BASF SE als dem Hersteller von X-SEED, sondern vielmehr im Verantwortungsbereich der Kunden von BASF. Folglich sollte seitens BASF im Rahmen der Kommunikation mit den Kunden neben den Vorteilen auf die erwähnten Reboundeffekte deutlich hingewiesen werden.

Die Tatsache, dass die Herstellung, der Vertrieb und die Verarbeitung von X-SEED vollständig in der flüssigen Phase und die Tatsache, dass die in X-SEED enthaltenen Nanopartikel nach dem Erhärtungsprozess des Betons chemisch fest eingebunden sind und gewissermaßen in der Produktmatrix aufgehen, haben wesentlichen Einfluss auf die Schlüsselindikatoren „Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt“, „Störfallaspekte“, „Exposition am Arbeitsplatz“ und „Recyclingfähigkeit“. Im Fall der Indikatoren „Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt“ und „Störfallaspekte“ führen die vorgenannten Eigenschaften von X-SEED dazu, dass dies beim Nanoprodukt als Stärke gewertet wird. Trotz Verwendung eines Nanomaterials werden im Verhältnis zum Referenzprodukt keine nennenswerten Vorsorgebedarfe identifiziert.

Die Indikatoren „Exposition am Arbeitsplatz“ und „Recyclingfähigkeit“ kommen im Vergleich zum Referenzprodukt zu einem indifferenten Ergebnis. Beim Indikator „Exposition am Arbeitsplatz“ ist dies darauf zurückzuführen, dass sich die Prozessabläufe bei Nano- und Referenzprodukt nicht wesentlich unterscheiden. Beim Indikator „Recyclingfähigkeit“ ist es darauf zurückzuführen, dass sich die Fertigteile in der Entsorgung, unabhängig davon, ob mit oder ohne X-SEED hergestellt, nicht unterscheiden. Ursache hierfür ist, dass die Nanopartikel von X-SEED nach der Aushärtung des Betons fest in der Produktmatrix eingebunden sind.

Ebenfalls indifferent ist der Indikator „Rechtliche Rahmenbedingungen und Forschungsförderung“ zu bewerten. Trotz der positiven Einschätzung der staatlichen und unternehmensinternen Forschungsförderung kann nicht von einer Chance ausgegangen werden, weil es Unsicherheit gibt, ob eine zukünftige Anpassung der Rechtsvorschriften auf EU-Ebene insbesondere von REACH Nachteile für die Vermarktung von X-SEED bringen können. Schließlich ist auch der Indikator „Ressourcenverfügbarkeit“ als indifferent einzustufen. Maßgeblich hierfür ist, dass sich Nanoprodukt und Referenzprodukt nur durch die Zugabe von X-SEED unterscheiden. Bei den beiden Ausgangsstoffen für X-SEED Natriummetasilikat und Calciumnitrat ergibt die Analyse, dass die globale Reserve deutlich mehr als die globale Nachfrage ist.

## **9.5 Strategische Optimierung**

Insgesamt schneidet X-SEED beim Nano-NachhaltigkeitsCheck auf Basis der von BASF ermittelten Daten im Vergleich zum Referenzprodukt bei allen betrachteten Schlüsselindikatoren gut ab. Lediglich im Material-Szenario zeigt sich für mit X-SEED hergestellte Betonfertigteile bei den Lebenszykluskosten derzeit eine Schwäche.

Ursache hierfür ist, dass die Zusatzkosten für X-SEED die mit der Substitution des teureren Zementtyps CEM I verbundenen Einspareffekte bei den Kosten der Ausgangsstoffe überkompensieren. Das Nanoprodukt ist in diesem Szenario daher etwas teurer als das Referenzprodukt.

Wenngleich die aufgezeigten, insgesamt positiven Nachhaltigkeitseffekte zusammen mit den beschriebenen technischen Vorzügen von Beton mit X-SEED diese Kosten durchaus rechtfertigen würden, kann sich der Unterschied bei der Erschließung der CO<sub>2</sub>- und Energieeinsparpotenziale auf dem Massenmarkt als nachteilig erweisen. Doch ist hierbei insbesondere zu berücksichtigen, dass die Hebelwirkungen bezüglich der vorhandenen CO<sub>2</sub>- und Energieeinsparpotenziale bei dem aus Kostengesichtspunkten ungünstigeren Material-Szenario besonders hoch ausfallen. So beträgt beispielsweise die spezifische CO<sub>2</sub>-Einsparung in diesem Szenario 74 kg CO<sub>2</sub>, während sie im Energie-Szenario mit 53 kg geringer ist. Noch deutlicher werden die Unterschiede bei den Hochrechnungen der Einsparpotenziale für den europäischen Markt für Betonfertigteile, die im Material-Szenario mit bis zu rund 2,7 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr mehr als doppelt so groß ausfallen wie im Energie-Szenario mit etwa 1,2 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr.

Dies bedeutet, dass die gegenwärtige Kostenstruktur des Nanoprodukts die Realisierung der im Material-Szenario identifizierten maximal möglichen Einsparpotenziale behindern beziehungsweise verunmöglichen könnte. Ein relevantes und zugleich prioritäres Optimierungspotenzial für BASF besteht daher in der kontinuierlichen Optimierung der Produktkosten von X-SEED, um die gegenwärtig noch höheren Gesamtkosten zugunsten des Nanoprodukts zu beeinflussen. Dafür sind auch die Preisentwicklungen für die Zementtypen CEM I und CEM II zu berücksichtigen, da deren Kosten im Material-Szenario ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf die Gesamtkosten haben. Ein weiterer Ansatzpunkt liegt aber auch in einer weiteren Sensibilisierung der Märkte für den Wert der positiven Nachhaltigkeitseffekte des Nanoprodukts. In diesem Zusammenhang kann sich eine offensivere Bewerbung von X-SEED als inhärent sicheres Nanoprodukt als hilfreich erweisen, jedoch sollte der Hauptfokus auf die Nutzenaspekte in den Bereichen Klimaschutz und Ressourcenschonung gerichtet werden. Damit diese Nutzenaspekte auch tatsächlich realisiert werden, liegt es im Interesse der Bauindustrie und der BASF im speziellen, die Betonhersteller als Anwender von X-SEED und die Bauherren als Nutzer von Beton auf ihren möglichen Beitrag zur Realisierung der Einsparpotenziale hinzuweisen.

## **10 Vorgesehene Anwendungsbereiche, Stärken und Limitierungen des Instruments**

Im Rahmen der Erprobung des Analyserasters bei den beiden Fallbeispielen konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe des Nano-NachhaltigkeitsChecks eine differenzierte Betrachtung der Nachhaltigkeitsaspekte eines Nano- im Vergleich zu einem Referenzprodukt möglich ist. Obwohl es sich in beiden Fällen um Produkte handelt, die sich noch in der Phase der

Markteinführung befinden, konnten für die Schlüsselindikatoren die erforderlichen Daten ermittelt werden. Sowohl für Großunternehmen wie BASF als auch für kleinere und mittlere Unternehmen wie Nanogate steht damit ein **Selbstevaluierungsinstrument** zur Verfügung, mit dem entwicklungsbegleitend die vorhandenen Potenziale nanotechnologischer Anwendungen beziffert und systematisch erschlossen werden können. Die wichtigsten Ergebnisse der Fallbeispiele wurden zusammen mit einer Beschreibung der Eckpunkte des methodischen Ansatzes in einer Broschüre zusammengefasst. Diese ist online unter [www.oeko.de/nano\\_nachhaltigkeitscheck](http://www.oeko.de/nano_nachhaltigkeitscheck) verfügbar.

Aufbauend auf einer Anwendung des Kriterienkatalogs der Themengruppe 2 (TG 2) der NanoKommission als „Vorstufe“ ist es mit dem Nano-NachhaltigkeitsCheck möglich, gewissermaßen als „zweite Stufe“ die potenziellen Nutzen- und Risikoaspekte von Nanoprodukten einer tiefer gehenden und so weit wie möglich quantifizierenden Analyse zu unterziehen. In diesem Zusammenhang ist aus methodischer Sicht vorteilhaft, dass sowohl der Kriterienkatalog der TG 2 als auch der Nano-NachhaltigkeitsChecks auf der Lebenszyklusperspektive basieren, eine fallspezifische sowie integrierte Betrachtung der Nutzen- und Risikoaspekte zum Ziel haben und dazu eine vergleichende Betrachtung mit einem Referenzprodukt vornehmen. Als eine weitere Harmonisierung zwischen den beiden Instrumenten wird der „Produkt-Steckbrief“ aus der TG 2 (vergleiche Kapitel 5.2) auch im Nano-NachhaltigkeitsCheck als Basisdokument zur Charakterisierung von Nano- und Referenzprodukt sowie der verwendeten Nanomaterialien empfohlen.

Ausgehend von einem ersten Screening mit dem Kriterienkatalog der TG 2 ermöglicht der Nano-NachhaltigkeitsCheck eine Konkretisierung der Betrachtung, indem mittels der vorgeschlagenen Schlüsselindikatoren die Nachhaltigkeitsaspekte quantifiziert werden beziehungsweise auf Basis einer Abfrage von definierten Kriterien und Leitfragen zumindest semi-quantitative Aussagen zusammengestellt werden. Für ausgewählte quantitative Schlüsselindikatoren wie den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck oder die Energieeffizienz ist es darüber hinaus möglich, die beim Nanoprodukt gegebenenfalls vorhandenen Potenziale hochzurechnen. Dies ist Ausdruck der leitbildorientierten Gestaltung des Instruments und ermöglicht Abschätzungen darüber, wie groß die „Hebelwirkung“ der betrachteten nanotechnologischen Entwicklung vor dem Hintergrund des Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung ausfällt.

Neben dieser prospektiven Nutzenanalyse durch vergleichende Ökoprofile und einer prospektiven Expositions- und Gefährdungsanalyse erweitert der Nano-Nachhaltigkeits-Check den Betrachtungshorizont, indem neben der sachlich-rationalen Beurteilungsebene auch Aspekte der **Risikowahrnehmung** bei den Bürgerinnen und Bürgern integraler Bestandteil der Untersuchung werden. Aus Praxissicht werden Informationen hierzu in der Phase der Markteinführung einer nanotechnologischen Neuentwicklung für sehr wichtig gehalten und dürfen daher bei einer integrierten Betrachtungsweise nicht fehlen. Ebenfalls über den klassischen Ansatz einer Lebenszyklusbetrachtung hinaus geht die **Betrachtung von Störfällen**.

Der gewählte **SWOT-Ansatz** bietet neben einer übersichtlichen Ergebnisdarstellung den Zusatznutzen, aus der Gegenüberstellung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken etwaige Optimierungspotenziale frühzeitig zu identifizieren. Eine weitergehende Aggregation der Ergebnisse, zum Beispiel zu einer Ein-Punkt-Bewertung, findet bewusst nicht statt, da die alleinige Kommunikation dieses Ergebnisses mit einem zu hohen Informationsverlust verbunden wäre. Stattdessen soll die transparente Darstellung der Resultate zu den einzelnen Schlüsselindikatoren ein differenziertes Bild ermöglichen und dazu einladen, sich ausgehend von diesem Ergebnisüberblick mit den Resultaten der Schlüsselindikatoren im Detail zu beschäftigen.

Limitierungen des Instruments können sich in erster Linie durch **Datenlücken** beziehungsweise durch Mängel hinsichtlich der Repräsentativität bei den verfügbaren Daten ergeben. In diesem Zusammenhang muss festgestellt werden, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch viel zu wenige ökobilanzielle Datensätze für die spezifischen Herstellungsverfahren von Nanomaterialien existieren. Dies kann die Belastbarkeit der auf diese Datensätze angewiesenen Schlüsselindikatoren (wie CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, Energieeffizienz) stark beeinflussen. Daher sind hier eine kritische Hinterfragung der erhaltenen Ergebnisse und außerdem eine Dokumentation der Qualität der verwendeten Daten besonders wichtig.

Darüber hinaus ist auch die **Operationalisierung einiger Schlüsselindikatoren** (wie „Symbolischer Nutzen“ oder „Aspekte der Risikowahrnehmung“) keine triviale Aufgabe. Da bei diesen Schlüsselindikatoren die Betrachtung in erster Linie nicht auf Basis von objektiv nachprüfbareren Fakten, sondern mittels subjektiver Einschätzungen vorgenommen wird, ist ein großes Maß an Erfahrung, aber auch an Wahrhaftigkeit gefragt, um eine Fehlsteuerung im Rahmen der Selbstevaluierung zu vermeiden. Weitere methodische Limitierungen ergeben sich auch durch die Schwierigkeiten bezüglich der Einschätzung, ob ein Indikator indifferent ist (vergleiche Kapitel 7.6). Hier kann die Tendenz bestehen, sich eher keine negative Selbstbewertung zu geben, wenn das Ergebnis „öffentlich“ diskutiert wird. Aus methodischer Sicht wurde entsprechend Vorsorge getroffen, indem das „Indifferenzband“ vor allem für die semi-quantitativen Schlüsselindikatoren relativ breit angelegt wurde. Dadurch wird erreicht, dass erst bei einer hinreichenden Informationsbasis der Schlüsselindikator in die Richtung einer Stärke beziehungsweise einer Schwäche „ausschlägt“.

Was der Nano-NachhaltigkeitsCheck allerdings grundsätzlich nicht leisten kann, ist eine **abschließende** Nachhaltigkeitsbewertung von Nanoprodukten. Hierfür fehlt dem Instrument insbesondere die vollständige **Bewertung** der human- und ökotoxikologischen Risiken in Hinblick auf Exposition und Gefährdungspotenzial, für die klassische wissenschaftliche Methoden existieren. Diese erfordern in der Regel ein umfangreiches Testprogramm, welches im Rahmen eines Screeninginstruments wie dem Nano-NachhaltigkeitsCheck nicht geleistet werden kann. Falls jedoch bereits eine vollumfängliche Risikobewertung für das betrachtete Nanoprodukt vorliegt, sollte anstelle der Betrachtung des Schlüsselindikators

„Risikoabschätzung für Mensch und Umwelt“ auf die Ergebnisse dieser Bewertung verwiesen werden (vergleiche hierzu auch BMU 2010).

Jenseits der toxikologischen Aspekte sind für eine abschließende Nachhaltigkeitsbewertung auch daten- und faktengestützte Aussagen zu weiteren Risikoaspekten, zum Beispiel im Bereich der Abfallentsorgung erforderlich. Dieser Bereich wird zwar grundsätzlich vom Nano-NachhaltigkeitsCheck abgedeckt, indem die wichtigsten Aspekte in Form von Leitfragen adressiert werden (siehe Schlüsselindikator „Recyclingfähigkeit, Kapitel 7.5.4). Hier besteht die Hauptintention des Nano-NachhaltigkeitsChecks allerdings eher darin, die relevanten Fragen frühzeitig in den Blick zu nehmen. Eine vollständige Quantifizierung und damit auch Beantwortung solcher Aspekte wird in vielen Fällen nicht möglich sein. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn das Instrument sehr frühzeitig im Innovationsprozess zum Einsatz kommt. Gleichwohl werden im Vergleich zum Kriterienpapier der TG 2 die relevanten Nachhaltigkeitsaspekte auf einem konkreteren Niveau behandelt und dadurch die „dritte Stufe“ einer abschließenden Nachhaltigkeitsbewertung vorbereitet und strukturiert (vergleiche folgende Abbildung):

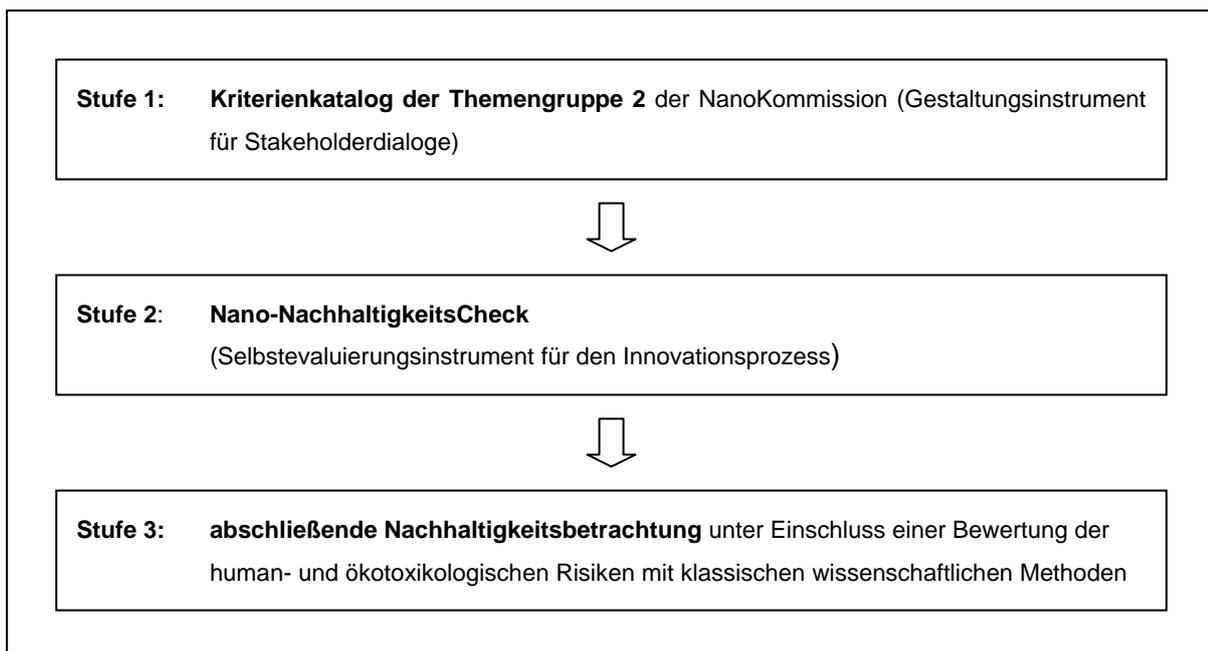


Abbildung 13: Einbettung des Nano-NachhaltigkeitsChecks in die bereits vorhandenen Instrumente der Nachhaltigkeitsanalyse (eigene Darstellung)

Dies bedeutet letztlich, dass bei der Anwendung des Nano-NachhaltigkeitsChecks bei einigen Schlüsselindikatoren weniger die quantifizierten Ergebnisse an sich im Vordergrund

stehen, sondern die Auseinandersetzung mit den relevanten Nachhaltigkeitsaspekten und dem **Prozess ihrer Konkretisierung** – und damit auch ihrer Quantifizierung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Nano-NachhaltigkeitsCheck eine gute Grundlage für Hersteller und Entwickler bietet, sich systematisch mit den Nachhaltigkeitsaspekten Ihrer Produkte beziehungsweise Neuentwicklungen zu beschäftigen. Er ersetzt zwar nicht eine umfassende Risikobewertung, trägt jedoch im Rahmen einer **prospektiven Innovations- und Technikanalyse** dazu bei, frühzeitig noch bestehende Wissenslücken und gegebenenfalls vorhandene Risiken zu erkennen sowie geeignete Lösungsstrategien zu entwickeln. Der Nano-NachhaltigkeitsCheck bietet den Anwendern daher die Funktion eines **Frühwarnsystems** und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur **Richtungssicherheit im Innovationsprozess** von Nanoprodukten.

## 11 Weiterentwicklungsmöglichkeiten und Ausblick

Um die Beachtung der Ergebnisse über den deutschen Sprachraum hinaus zu erweitern, wird zusätzlich zu dem hier vorliegenden Abschlussbericht in deutscher Sprache auch eine englische Übersetzung angefertigt. Diese soll unter anderem dazu verwendet werden, den Nano-NachhaltigkeitsCheck als Methodenvorschlag auch auf internationaler Ebene in relevante Gremien einzuspeisen. In diesem Zusammenhang ist vor allem die „Working Party on Manufactured Nanomaterials“ (WPMN) der OECD zu nennen, deren Steering Group 9 (SG 9) sich speziell mit den Nachhaltigkeitsaspekten von nanotechnologischen Produkten beschäftigt. Ziel der SG 9 ist es, durch die Entwicklung eines geeigneten methodischen Rahmens die Bewertung des Einsatzes von Nanomaterialien in den verschiedenen Stufen des Innovationszyklus zu unterstützen. Im Rahmen von Praxisbeispielen soll dieser Bewertungsrahmen angewendet werden, wobei unter Betrachtung des gesamten Lebenszyklusses der untersuchten Produkte eine Fokussierung auf Umweltaspekte erfolgen wird. SG 9 sieht ihre Rolle in erster Linie darin, die Zusammenarbeit zwischen bereits bestehenden oder geplanten Initiativen aus den einzelnen Delegationen der Mitgliedsstaaten zu fördern und zu unterstützen. Insbesondere sollen dabei Nano-Nachhaltigkeitsinitiativen aus Australien, Deutschland, Großbritannien, Italien, Kanada, Korea, Österreich, Thailand, den USA sowie der EU-Kommission, UN / SETAC<sup>37</sup> und von BIAC<sup>38</sup> aktiv mit einbezogen werden. Im Rahmen dieser Fallbeispiele sollen auch gegebenenfalls vorhandene nanospezifische Aspekte der Bewertungsmethodiken identifiziert werden. Durch den Hauptautor des vorliegenden Endberichts, der gleichzeitig als Experte in der SG 9 mitarbeitet, werden im Rahmen eines internationalen „Workshop on Environmentally

---

<sup>37</sup> SETAC ist die Abkürzung für „Society of Environmental Toxicology and Chemistry“. Diese Organisation ist ein weltweiter Zusammenschluss von Experten auf dem Gebiet der Analyse und Lösung von Umweltproblemen.

<sup>38</sup> BIAC steht für „Business and Industry Advisory Committee“ und vertritt die Interessen der Industrie bei der OECD.

Sustainable Use of Manufactured Nanomaterials“ am 14. September 2011 die Ergebnisse dieses Projekts vorgestellt. Ziel dieses Workshops ist es, anhand von konkreten Fallbeispielen die methodischen Voraussetzungen für eine lebenszyklusbasierte Bewertung von Nanoprodukten weiterzuentwickeln.

Um für den Nano-NachhaltigkeitsCheck als Selbstevaluierungsinstrument für Unternehmen eine weite Verbreitung in der Praxis zu ermöglichen, wird vorgeschlagen, eine zentrale **Anlaufstelle** für potenzielle Nutzer einzurichten werden. Aufgabe dieser Anlaufstelle könnte es sein, das Instrument mit all seinen Elementen (Einführung, Leitfäden zu den Indikatoren und Excel-Tools) zum kostenlosen Herunterladen für interessierte Nutzer zur Verfügung zu stellen. Neben der Bereitstellung der Arbeitsmaterialien sollte die Anlaufstelle auch in gewissem Umfang für Rückfragen der Nutzer zur Verfügung stehen und dazu in der Lage sein die Arbeitsmaterialien zu aktualisieren sowie weiterzuentwickeln. Durch die beiden Fallbeispiele wurde der NachhaltigkeitsCheck bereits einer ersten Praxisprobe unterzogen. Es sind aber weitere Anpassungen und Entwicklungen des Instruments zu erwarten, beispielsweise für bestimmte Produktgruppen, frühere Entwicklungsstadien eines Nanoprodukts oder andere Nutzertypen. Denkbare Institutionen, die die Rolle einer Anlaufstelle übernehmen könnten, sind neben dem Umweltbundesamt das Öko-Institut e.V. oder eine dritte unabhängige Stelle.

Unabhängig davon bietet das Öko-Institut (wie bereits im Rahmen des Projekts praktiziert) für die Erarbeitung weiterer Fallbeispiele die Kooperation bei der Datenerfassung, der Einordnung der Ergebnisse und der externen Kommunikation der Ergebnisse an, beispielsweise in Form einer gemeinsamen Broschüre (vergleiche hierzu Kapitel 10).

Eine Weiterentwicklung des Nano-NachhaltigkeitsChecks zur Nutzung als Kennzeichnungsinstrument oder als Instrument für die Vergabe eines Gütesiegels ist weder beabsichtigt noch ist es in der vorliegenden Form möglich. Denn der methodische Ansatz als Selbstevaluierungstool liegt darin, den Status-quo eines Nanoprodukts relativ zu einem Referenzprodukt zu ermitteln, um die Optimierungspotenziale des Produkts zu erkennen. Letzteres ist nicht das Ziel eines Gütesiegels. Außerdem wären für ein Gütesiegel absolute Kriterien beziehungsweise Grenzwerte erforderlich, die der Nano-NachhaltigkeitsCheck nicht bietet.

Perspektivisch könnte der Nano-NachhaltigkeitsCheck auch Orientierung dafür bieten, inwieweit nanotechnologische Produkte beziehungsweise Verfahren bei der Erreichung der (nationalen) Klimaschutzziele eine relevante Rolle spielen können. Will man die derzeitigen Klimaschutzziele für Deutschland erreichen – eine Minderung von bis zu 95 Prozent Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 – müssten 60 Prozent dieser Einsparungen durch technologische Innovationen erfolgen (vergleiche Kapitel 3). Innovative Lösungsbeiträge der Nanotechnologien werden dabei in erster Linie in den Bereichen regenerative Energiebereitstellung, Wärmedämmung, Stromspeicher, neue Werk- und Baustoffe und industrielle Produktionsprozesse erfolgen müssen. Angesichts dieser Zukunftsperspektiven ist eine

stärkere Zusammenführung und Kohärenz von technologischen Anforderungen zum Schutz des Klimas auf der einen Seite und des Angebots an nanotechnologischen Produkten und Verfahren auf der anderen Seite gefordert. Es bietet sich deshalb an, vielversprechende nanotechnologische Produkte beziehungsweise Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen aus den vorstehenden Technologiebereichen systematisch auf ihre Nachhaltigkeitspotenziale hin zu untersuchen. Forschungs- und Entwicklungsprogramme sollten daher neben einem ökonomischen Verwertungsplan auch im Rahmen eines „**ökologischen Verwertungsplans**“ Informationen und Szenarien für die zu erwartenden Klimaschutzpotenziale der einzelnen F&E-Vorhaben vorhalten.

Eine auf diesen Informationen entwickelte **Roadmap „Klimaschutz durch Nanotechnologie“** könnte gleich einer Landkarte den Prozess strukturieren, Handlungsoptionen identifizieren und Prioritäten benennen. Dadurch könnte letztendlich auch das Vertrauen in die Entwicklung von nanotechnologischen Lösungen gestärkt und die Dynamik bei der zielgerichteten Erschließung der Einsparungspotenziale in den genannten Technologiefeldern erheblich gesteigert werden.

Im Rahmen eines **Monitorings** sollten sich die einzelnen F&E-Vorhaben dann mit den tatsächlich erzielten CO<sub>2</sub>-Einsparungen an den zuvor festgelegten Zielmarken messen lassen. Lebenszyklusbasierte Untersuchungen mit einem systemischen Ansatz sind hierfür besonders gut geeignet. Der Nano-NachhaltigkeitsCheck stellt mit seinem quantitativen Schlüsselindikator „CO<sub>2</sub>-Fußabdruck“ ein geeignetes Instrument für die Ermittlung der vorhandenen Potenziale wie auch für das Monitoring zur Verfügung.

## 12 Quellenverzeichnis

- BMU 2008 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.); Abschlussbericht der AG 1 Nanomaterialien – Chancen für Umwelt und Gesundheit; 1. Dialogphase 2006-2008; online abrufbar unter [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nanodialog08\\_ergebnisse\\_ag1.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nanodialog08_ergebnisse_ag1.pdf)
- BMU 2011 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.); Abschlussbericht der Themengruppe 2 der NanoKommission; Leitfaden zur Erhebung und Gegenüberstellung von Nutzen- und Risikoaspekten von Nanoprodukten; 2. Dialogphase 2009-2010; online abrufbar unter [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano\\_abschlussbericht2\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/nano_abschlussbericht2_bf.pdf)
- Buchert et al. 2009 Buchert, M.; Bleher, D.; Schüler, D.; Critical metals for the future sustainable technologies and their recycling potential (Critical metals study for the International Panel for Sustainable Resource Management (Resource Panel); mit fachlicher Unterstützung durch Umicore AG & Co. KG; Darmstadt, 2009
- DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (internationale Norm ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006
- DIN EN ISO 14044 Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (internationale Norm ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006
- Enquête-Kommission 1998 Enquête-Kommission (Hrsg.); Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung“; Abschlussbericht der Enquête-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt" des 13. Deutschen Bundestages. Bonn 1998
- EU-Kommission 2008 Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat und den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss: Regelungsaspekte bei Nanomaterialien [Sek(2008) 2036], KOM(2008) 366, Brüssel, 17.6.2008, S. 9
- EU-Kommission 2009 Europäische Kommission (Hrsg.); Current situation of key enabling technologies in Europe, Commission staff working document {COM(2009) 512}, online verfügbar unter: [http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/files/staff\\_working\\_document\\_sec512\\_key\\_enabling\\_technologies\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/files/staff_working_document_sec512_key_enabling_technologies_en.pdf) (abgerufen am 30.08.2011)

- Friesner 2011 Friesner, T.; History of [SWOT](#) Analysis, abrufbar unter <http://marketingteacher.com/swot/history-of-swot.html>
- Grant 2000 Grant, R.; Contemporary Strategy Analysis, 3rd Edition, Blackwell Publishers, Malden, 2000
- Grießhammer 2007 Grießhammer, R.; Buchert, M.; Gensch, C.-O.; Hochfeld, C.; Manhart, A.; Rüdener, I.; Prosa – Product Sustainability Assessment. Leitfaden. Öko-Institut e.V., 2007
- Grobe 2004 Grobe, A.; Risikoperzeption der Nanotechnologie: Konsequenzen für den Dialog, Präsentation im Rahmen eines internen Workshops im Rahmen des Projekts CONANO 2004.
- Haller 1995 Haller, M.; Allenspach, M.; Kompetent – Inkompetent? Zur Objektivität des Urteils über Grösstrisiken. In: Thome, J.P. (Hrsg.): Management-Kompetenz. Die Gestaltungsansätze des NDU/Executive MBA der Hochschule St. Gallen. Versus Verlag, Zürich 1995.
- Hermann / Möller 2010 Hermann, M.; Möller, M.; Rechtliche Machbarkeitsstudie zu einem Nanoproduktregister, Berlin / Freiburg 2010; abrufbar unter: [http://www.bmu.de/gesundheits\\_und\\_umwelt/downloads/doc/46240.php](http://www.bmu.de/gesundheits_und_umwelt/downloads/doc/46240.php)
- Höck et al. 2011 Höck J., Epprecht T., Furrer E., Hofmann H., Höhener K., Krug H., Lorenz C., Limbach L., Gehr P., Nowack B., Riediker M., Schirmer K., Schmid B., Som C., Stark W., Studer C., Ulrich A., von Götz N., Weber A., Wengert S., Wick P.; Wegleitung zum Vorsorgeraster für Synthetische Nanomaterialien. Bundesamt für Gesundheit und Bundesamt für Umwelt, Bern 2011, Version 2.1. <http://www.bag.admin.ch/themen/chemikalien/00228/00510/05626/index.html?lang=de>
- Hunkeler et al. 2008 Hunkeler, D.; Lichtenwort K.; Rebitzer, G. (Hrsg.): Andreas Ciroth, David Hunkeler, Gjalt Huppes, Kerstin Lichtenwort, Gerald Rebitzer, Ina Rüdener, Bengt Stehen (Lead authors): Environmental Life Cycle Costing. SETAC Publications 2008.
- ISO 15663-2:2001 ISO 15663-2:2001: Petroleum and natural gas industries – Life-cycle costing – Part 2: Guidance on application of methodology and calculation methods; DIN EN 60300-3-3: Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:2004); Deutsche Fassung EN 60300-3-3, 2004, DSR 2005: Life Cycle Cost Guidelines Sport and Recreation Facilities. A guide for sport and recreation facilities owners and managers. Department of Sport and Recreation, Government of West Australia. Mai 2005.
- Kotler et al 2010 Kotler, P.; Berger, R. & Rickhoff, N.; The Quintessence of Strategic Management. Springer-Verlag, Berlin, 2010

- Kurttila et al 2000 Kurttila, M., Pesonen, M., Kangas, J., & Kajanus, M.; Utilizing the analytic hierarchy process (AHP) in SWOT analysis – a hybrid method and its application to a forest-certification case. Forest Policy and Economics, 41-52, 2000
- Meffert / Kirchgeorg 1998 Meffert, H.; Kirchgeorg, M.; Marktorientiertes Umweltmanagement: Konzeption, Strategie, Implementierung mit Praxisfällen. 3. überarb. Schäffer-Poeschel Verlag. Stuttgart, 1998
- Martens 2010 Martens, S.; Eggers, B.; Evertz, T.: Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Februar 2009; UBA-TEXTE 34/2010: [http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql\\_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3778](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3778)
- Mehta 2000 Mehta, S.; SWOT: The Analysis of Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats; marketing seminar; Sam Houston State University; online verfügbar unter: [http://www.shsu.edu/~mkt\\_ssm/mkt570/Chap04.ppt](http://www.shsu.edu/~mkt_ssm/mkt570/Chap04.ppt) (Download vom 22.08.11)
- Möller et al. 2009 Möller, M.; Eberle, U.; Hermann, A.; Moch, K.; Stratmann, B.; Nanotechnologie im Bereich der Lebensmittel. Zürich, vdf Verlag, 2009
- Möller et al. 2010 Möller, M.; Eberle, U.; Hermann, A.; Som, C.; An Outline Framework for the Governance of Risks of Nanotechnologies in Food. In: Chaudhry, Q.; Castle, L.; Watkins, R. (Hrsg.); Nanotechnologies in Food, Cambridge, RSC Publishing, S. 182-200, 2010
- Morrison 2011 Morrison, M.; SWOT Analysis – History, Definition, Tools, Templates & Worksheets; online verfügbar unter: <http://rapidbi.com/created/swotanalysis/> (Download vom 22.08.2011)
- PAS 2050 PAS 2050:2008 - Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services, online verfügbar unter: <http://shop.bsigroup.com/en/Browse-by-Sector/Energy--Utilities/PAS-2050/>
- Steinfeld 2010 Steinfeldt, M.; von Gleich, A.; Petschow, U.; Pade, C.; Sprenger, R.-U.: Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, November 2008: [http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql\\_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3777](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3777)
- Thakur 2010 Thakur, S.; SWOT – History and evolution; online verfügbar unter: <http://www.brighthub.com/office/project-management/articles/99629.aspx> (Download vom 22.08.2011)
- VZBV 2008 Verbraucherzentrale Bundesverbandes e.V (Hrsg.); Nanotechnologie: Was Verbraucher wissen wollen 2008; herunterzuladen unter:

[www.vzbv.de/mediapics/studie\\_nanotechnologien\\_vzbv.pdf](http://www.vzbv.de/mediapics/studie_nanotechnologien_vzbv.pdf) (so am  
15.8.2011).

Wehrich 1982

Wehrich, H; The TOWS matrix – a tool for situational analysis, Long  
Range Planning, 15(2):54-66, 1982