

Szenariobasierte Bewertung der Zukunftsrelevanz von Nachhaltigkeitstechnologien

Simon H. Berner^{1,*}, Ewa J. Dönitz², Aline Westhofen² und Björn P. Moller²

DOI: 10.1002/cite.201400163

© 2016 The Authors. Published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

Ein Ansatz zum nachhaltigen Umgang mit den begrenzten globalen Ressourcen ist, mittels technologischer Lösungen Rohstoffe im Wirtschaftskreislauf zu halten. Neben der technologischen Machbarkeit und Ausgestaltung der Technologie stellt sich auch die Frage nach ihrer Relevanz in der Zukunft. Zur Einschätzung dieser künftigen Relevanz wurden drei plausible Szenarien entwickelt, die unterschiedliche künftige Entwicklungen auf globaler Ebene und im Bereich der Ressourceneffizienz beschreiben. Durch den strukturierten Prozess der Szenarienerstellung, der sowohl auf externem Wissen als auch auf dem Austausch mit den Technologieentwicklern basierte, wurden zukünftige Potenziale, Chancen und Risiken für sechs Recyclingtechnologien aufgezeigt.

Schlagwörter: Nachhaltigkeit, Recycling, Szenarien, Technologiebewertung, Zukunftsforschung

Eingegangen: 06. November 2014; *revidiert:* 02. Juli 2015; *akzeptiert:* 14. Juli 2015

Scenario-Based Assessment of the Future Relevance of Sustainability Technologies

One approach towards sustainable use of the restricted resources is the development of technological solutions in order to keep raw materials in the material cycle. When such new technologies are developed, it is not only important to broach the issue of the technological feasibility and design, but especially the question regarding the relevance of the technologies in the future. Three plausible scenarios describing different future developments at the global level and in the field of resource efficiency have been developed in order to assess the future relevance. In the structured process of scenario building, which was based both on external knowledge and on the exchange of knowledge with technology developers, future potentials, opportunities and risks for six recycling technologies were identified.

Keywords: Foresight, Recycling, Scenario, Sustainability, Technology assessment

1 Einleitung

Eine Vielzahl der strategischen Entscheidungen, die in der Gegenwart zu treffen sind, wie beispielsweise die Entscheidung über Investitionen in neue Technologien, basieren auf Einschätzungen der Zukunft. Wie wird die zukünftige Welt jedoch aussehen? Wodurch wird sie geprägt? Um diese Fragen zu beantworten bzw. greifbar zu machen, ist es wichtig,

sich schon heute mit der Zukunft auseinanderzusetzen. Wir wissen bereits einiges über die Zukunft. Wir beobachten langfristige Trends und erstellen Modelle zur Berechnung von wirtschaftlichen und technischen Entwicklungen und doch bleibt vieles noch unsicher. Für den bewussten Umgang mit Unsicherheiten kann die Szenariomethode eingesetzt werden – ein langjährig erprobtes Instrument der Zukunftsforschung [1, 2]. Sie bietet Einblick in verschiedene Zukünfte und hilft, durch wissenschaftlich basierte Annahmen über die Zukunft heterogene quantitativ und qualitativ beschreibbare Entwicklungen ganzheitlich und systemisch zu berücksichtigen [3, 4].

Betrachtet man das globale Umfeld der Kreislaufwirtschaft, so ist dies durch viele Akteure mit unterschiedlichen Interessen sowie preis- und regulationsgetriebenen Anreizen gekennzeichnet. Dies erschwert Zukunftsannahmen bezüglich möglicher Entwicklungen. Gerade hier lohnt sich

¹Dr. Simon H. Berner (simon.berner@fh-joanneum.at), FH Joanneum Graz, University of Applied Sciences, Nachhaltiges Lebensmittelmanagement, Eggenberger Allee 9–13, 8020 Graz, Österreich; ²Dr. Ewa J. Dönitz, Aline Westhofen, Dr. Björn P. Moller, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Competence Center Foresight, Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe, Deutschland.

die Erforschung der Zukunft durch die Entwicklung alternativer Szenarien, in denen die Komplexität der Unsicherheiten und deren Zusammenhänge sowie mögliche Entwicklungen systematisch analysiert und diskutiert werden können. Da hohe Unsicherheiten und viele alternative Entwicklungsmöglichkeiten eine höhere Flexibilität und Robustheit der bisherigen Strategien verlangen, wurde vor dem Hintergrund der Szenarien untersucht, welchen Beitrag verschiedene Recyclingtechnologien zukünftig leisten können.

Im Rahmen des Technologie-Entwicklungsprojektes „Molecular Sorting – Methoden für die Kreislaufwirtschaft der nächsten Generation“ wurden verschiedene Technologien der Kreislaufwirtschaft von Rohstoffen als sogenannte „Demonstratoren“ erforscht und entwickelt. Die Technologieentwicklung in den jeweiligen Demonstratoren erfolgte durch sieben Fraunhofer-Institute (s. Appendix). Details dazu finden sich in den weiteren Artikeln dieser Ausgabe. Da die künftige Relevanz solcher Technologien beispielsweise stark vom Aufkommen der jeweils bearbeiteten Stoffströme abhängt, ist es sinnvoll, sich neben der rein technologischen Entwicklung auch differenziert mit dem künftigen Bedarf nach diesen Technologien auseinanderzusetzen. Idealerweise findet solch ein Prozess bereits vor Beginn der Technologieentwicklung statt oder spätestens sobald erste konkrete Ergebnisse vorliegen, die eine Einschätzung der einzelnen Technologien ermöglichen. So hat eine Technologie zur hochselektiven Trennung spezieller Verbundstoffe nur dann Relevanz, wenn solche Verbundstoffe künftig anfallen. Auf deren Einsatz wiederum haben verschiedenste Entwicklungen Einfluss, z. B. die Verfügbarkeit der einzelnen Komponenten, rechtliche Rahmenbedingungen oder technologischer Fortschritt. Das Ziel des Szenarioprozesses war hierbei, die zukünftige Relevanz und Potenziale der einzelnen Kreislauftechnologien einzuschätzen.

2 Methodische Vorgehensweise zur Szenarienentwicklung

Obwohl die Zukunft weder vorhersagbar noch genau planbar ist, können mithilfe der Szenariomethode plausible und

begründbare Zukunftsbilder, sog. Szenarien [5], entwickelt werden. Dabei werden die zukunftsrelevanten Einflussfaktoren berücksichtigt, die ein System nicht nur von innen, sondern auch von außen prägen. Solche Einflussfaktoren können eine eindeutige Entwicklungsrichtung aufweisen, meist werden jedoch alternative Zukunftsannahmen aufgestellt [6]. Durch die zeitliche Erweiterung des Horizonts entstehen auf der Grundlage der erstellten Szenarien bereits heute Ideen über die Erfordernisse in einer zukünftigen Welt. Vor diesem Hintergrund werden Handlungsmaßnahmen konzipiert oder Investitionsentscheidungen getätigt. Dabei wird die Robustheit bisheriger Strategien überprüft bzw. neue Strategien werden rechtzeitig entwickelt [7].

Die eigentliche Szenarienentwicklung verlief in vier Schritten unter Einbindung projektinternen und -externen Wissens (Abb. 1):

- 1) Identifizierung relevanter Einflussfaktoren,
- 2) Entwicklung von Zukunftsannahmen,
- 3) Szenarienerstellung und
- 4) Szenariointerpretation.

In Schritt 5 erfolgte die Einschätzung des zukünftigen Potenzials der Technologien im Kontext der entwickelten Szenarien. Die eingesetzten Methoden, u.a. Workshops und Konsistenzanalyse (Abb. 1, graue Bereiche) werden bei der Darstellung der einzelnen Schritte im Detail erläutert.

Schritt 1: Identifizierung relevanter Einflussfaktoren

Einflussfaktoren sind relevante Faktoren, die den Betrachtungsgegenstand, also hier die Kreislaufwirtschaft, in hohem Maße heute und in der Zukunft beeinflussen. Um den Wahrnehmungsbereich zu erweitern, wurde zunächst auf das bereits existierende externe Wissen zugegriffen, d. h. auf die unterschiedlichen Zukunftsstudien aus den relevanten Bereichen. Dazu gehörten unter anderem Szenarien, Roadmaps und Trendstudien.

Das komplexe Umfeld der zu entwickelnden Technologien wurde auf zwei Ebenen untersucht: Zum einen wurde die globale Ebene betrachtet, die den Kontext für alle Technologien bildet. Zum anderen wurde die Ebene der Demonstratoren analysiert, die als Umfeld der einzelnen konkreten Technologien verstanden werden sollte. Der Begriff

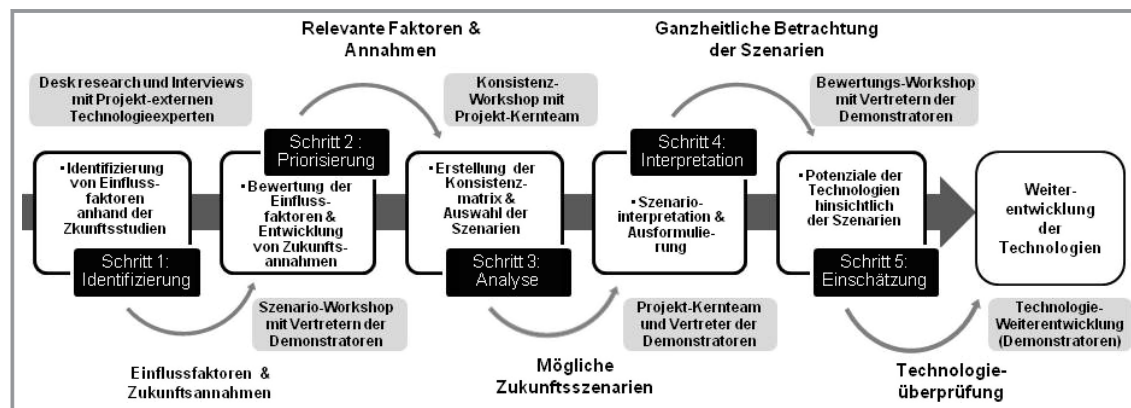


Abbildung 1. Schritte der Szenarienentwicklung.

Demonstrator bezeichnet hierbei den betrachteten Stoffstrom, für den neue Methoden entwickelt und erprobt werden sollen. Die im Projekt behandelten Stoffströme umschließen Glas, Altholz, Metallsalzlösungen, heiße Abgase, Schlacken aus der Müllverbrennung sowie Hybridbauteile.

Im Zuge der Metaanalyse von über 70 Zukunftsstudien wurden insgesamt über 60 Einflussfaktoren identifiziert. Basierend auf den Interviews mit den projektexternen Experten wurde anschließend die Relevanz der Faktoren für die Problemstellung bewertet und ihre Anzahl und somit auch die Komplexität reduziert.

Die ausgewählten Einflussfaktoren wurden genauer beschrieben, wodurch sie einen fassbaren, gut verständlichen sowie qualitativen oder quantitativen Charakter bekamen. Anschließend folgte eine genauere Analyse der Faktoren in zweierlei Hinsicht: Zum einen wurde ihr heutiger Zustand beschrieben. Zum anderen wurden ihre zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten in Form von Zukunftsannahmen formuliert und begründet. Dabei unterscheidet man zwischen unterschiedlichen argumentierbaren Entwicklungen, die als Alternativannahmen erarbeitet werden.

Schritt 2: Bewertung der Einflussfaktoren und Entwicklung von Zukunftsannahmen

Ein Kernbestandteil des Szenarioprozesses war der „Sprung in die Zukunft“ in Form eines Workshops, bei dem es zunächst darum ging, die zuvor identifizierten Einflussfaktoren hinsichtlich der Relevanz für die einzelnen Demonstratoren zu priorisieren und für die weitere Analyse auszuwählen. Die identifizierten Zukunftsannahmen wurden diskutiert und häufig neuformuliert. Der stark partizipative Workshop-Ansatz ermöglichte die Nutzung des tiefgreifenden Wissens der Projektbeteiligten.

Die Workshop-Teilnehmer diskutierten zunächst die über 60 relevanten Einflussfaktoren aus den Zukunftsstudien und priorisierten daraus 21 Faktoren, die die größte Relevanz aufwiesen. Für diese wurden eine bis drei Zukunftsannahmen pro Faktor als Basis für die Szenariointerpretation definiert (s. Annahmen A, B, C in Abb. 3).

Ein kreatives Element des Szenario-Workshops war die interaktive Visualisierung von Zukunftsannahmen, die nicht nur die Aufnahmebereitschaft und -kapazität der Gruppe erhöhte, sondern auch einer Fokussierung auf die wesentlichen Informationen diente.

Schritt 3: Szenarienerstellung – Konsistenzanalyse und Auswahl der Szenarien

Mithilfe einer Konsistenzmatrix wurden in einem Konsistenz-Workshop paarweise Konflikte und Synergien zwischen den Zukunftsannahmen verschiedener Einflussfaktoren analysiert und durch einen Konsistenzwert beschrieben (Abb. 2). Der Konsistenzwert stellt das Ausmaß dar, in welchem sich die zwei Annahmen gegenseitig ausschließen oder vertragen [8]. Die Werteskala verlief von -2 (starke Inkonsistenz) bis +2 (starke Konsistenz). Den paarweisen Kombinationen mit keiner direkten Wechselbeziehung zwischen den betrachteten Annahmen wird ein Konsistenzwert von 0 zugeordnet.

Die Konsistenzanalyse umfasste die Überprüfung aller möglichen Annahmebündel auf Widerspruchsfreiheit. So wurde die Gesamtkonsistenz für jede Kombination der Annahmen mithilfe eines Rechenalgorithmus ermittelt. Aus diesen Annahmebündeln wurden zunächst fünf Bündel als Grundlage für die Szenariointerpretation ausgewählt. Auf diese Weise entstanden die sog. Rohszenarien. Um effektiv mit den Szenarien arbeiten zu können, ist es sinnvoll, eine

			1			2			3			4		5		6			
			A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B	A	B	C	
1	Werte in der Gesellschaft und Politik	A	Hohes Bewusstsein ohne konkretes Handeln; preisgetrieben (Status Quo)																
		B	Nachhaltigkeit wichtiger als Gewinn/Output mit nötiger Verhaltensänderung																
		C	Kostendruck ist ausschlaggebend; Kein Nachhaltigkeitsbewusstsein																
2	Werte des Unternehmens	A	2	0	0														
		B	0	2	-1														
		C	0	-1	2														
3	Produktionsformen	A	1	1	0	-1	1	-1											
		B	0	2	-1	-1	2	-2											
		C	1	0	1	1	-1	2											
4	Entwicklung der primären und sekundären Rohstoffpreise	A	-1	-1	0	-1	1	-1	-1	1	-1								
		B	1	2	0	1	-1	1	1	-1	1								
5	Strategische und operative Verfügbarkeit von Rohstoffen	A	0	0	0	0	-1	1	0	-1	1	0	0						
		B	0	0	0	0	2	-1	0	2	-1	0	0						
6	Abfallaufkommen	A	0	2	-1	0	2	-1	1	2	-2	0	0	1	0				
		B	0	-2	1	0	-2	1	-1	-2	1	0	0	-1	0				
		C	0	1	-1	0	1	-1	0	-1	0	0	0	0	0				
7	Recycling	A	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1	0	0	1	0	-1	1	0	
		B	0	1	-1	0	1	-1	1	1	0	0	0	0	1	1	-1	0	
		C	-1	2	-2	-1	2	-2	0	2	-1	0	0	-1	2	2	-2	0	

2 starke Konsistenz zwischen den Annahmen
1 Annahmen passen gut zusammen
0 Annahmen sind neutral oder unabhängig voneinander
-1 zwischen den Annahmen bestehen gewisse Widersprüche
-2 Annahmen widersprechen sich total

Abbildung 2. Ausschnitt der Konsistenzmatrix zur Bestimmung der Synergien und Konflikte zwischen den Zukunftsannahmen.

kleinere Anzahl an deutlich unterschiedlichen Szenarien auszuwählen [9–11]. Häufig werden zu diesem Zweck die Extremvarianten der Zukunft betrachtet, um den Möglichkeitsraum aufzuspannen, sowie weitere charakteristische Szenarien analysiert.

In einem Experten-Workshop wurden die Ergebnisse des Rechenalgorithmus interpretiert und diskutiert. Von der Vielzahl der möglichen konsistenten Annahmenkombinationen wurden drei in sich schlüssige Rohrszenarien (Abb. 3) ausgewählt, die Zukünfte beschreiben, die sich deutlich unterscheiden.

Schritt 4: Szenariointerpretation

Bis zu diesem Schritt erfolgte die Entwicklung der Zukunftsannahmen zunächst für einzelne Faktoren, ohne mögliche Wechselwirkungen zwischen den Entwicklungen zu berücksichtigen. Nun galt es, eine gedanklich oder argumentativ vorstellbare Welt für jedes Szenario zu skizzieren. Hierfür wurden die Rohrszenarien in Texten genauer beschrieben. Diese Beschreibung beinhaltete eine mögliche Entwicklung der relevanten Bereiche im betrachteten Jahr 2030. Ziel war hier, in verständlichen Storys die Vernetzung der Einflussfaktoren untereinander anschaulicher darzustellen und den Zusammenhang zum Betrachtungsgegenstand, also in diesem Fall zu den Technologien, zu verdeutlichen.

Schritt 5: Technologieeinschätzung

Für die Einschätzung der Technologiepotenziale wurde ein weiterer Workshop mit den Projektteilnehmern durchgeführt. Hierbei erfolgte die Einschätzung der Potenziale jedes Demonstrators in drei Schritten. Zunächst wurden die Leistungspotenziale der Demonstratoren im Allgemeinen beschrieben, zum einen hinsichtlich der technologischen und gesellschaftlichen Ziele, zum anderen hinsichtlich der Stoffströme und der adressierten Branchen. Im Anschluss erfolgte die Einschätzung der zukünftigen Leistungspotenziale der Demonstratoren vor dem Hintergrund des jeweiligen Szenarios. Hierfür wurden zunächst die in den Szenarien beschriebenen Rahmenbedingungen von den jeweiligen Demonstratorenverantwortlichen für den Einsatz ihrer Technologien diskutiert und die Technologiepotenziale kritisch hinterfragt. Zusätzlich wurden die Ergebnisse in der gesamten Gruppe diskutiert. Eine semiquantitative Betrachtung der direkten Auswirkungen der einzelnen Faktoren und deren Ausprägungen auf die sechs Demonstratoren komplettierte die Einschätzung der Potenziale der Recyclingtechnologien in den drei Zukunftsbildern. Eine abschließende Einschätzung der gewonnenen Ergebnisse wurde im Nachgang des Workshops von einer Mirrorgroup vorge schlagen und zur Diskussion gestellt. Die Mirrorgroup bestand aus dem Moderationsteam des Fraunhofer ISI und ausgewählten projektinternen Technologie-Experten mit profundem Überblickswissen bezüglich der Technologien und deren Umfeld.

3 Szenarien für die Kreislaufwirtschaft

Insgesamt wurden drei Szenarien für die zukünftige Kreislaufwirtschaft entwickelt [12]. In allen Szenarien wird von einer weiteren Anspannung der Rohstoffsituation ausgegangen. Das ist plausibel, denn stoffliche Ressourcen sind auf der Erde endlich und unsere Wirtschaftsweise sorgt für deren Dissipation. Der Unterschied zwischen den Szenarien liegt in der Reaktion auf diese Entwicklung.

Im Szenario „Ideal: Grüne neue Welt“ leben wir in Europa im Jahr 2030 in einer Wertegesellschaft, in der der Nachhaltigkeitsgedanke stark verwurzelt ist und aktiv gelebt wird. Auch wirtschaftliche Entscheidungen folgen diesem Grundsatz, so dass sich zu diesem Zeitpunkt nachhaltige Produktionsformen etabliert haben und der Energie- und Rohstoffeinsatz verringert wurde. Grundsätzlich wird das Ziel verfolgt, Rohstoffquellen zu sichern und zu schonen, wodurch auch die Gewinnung von Rohstoffen aus Abfallprodukten umgesetzt wird. Im Gegensatz dazu steht das Szenario „Katastrophal: Nach uns die Sintflut“, bei dem sich bis 2030 in keiner Hinsicht ein Nachhaltigkeitsbewusstsein in der Gesellschaft etabliert hat und nach wie vor der Kostendruck wirtschaftliche Entscheidungen bestimmt. So wird auf bereits vorhandene Techniken gesetzt und nicht in innovative Recyclingmethoden investiert. Zu den Folgen gehören eine hohe Abhängigkeit von rohstoffreichen Ländern und unvorhersehbare Preisschwankungen der Rohstoffe. Die fehlende Umsetzung innovativer Recyclingansätze resultiert außerdem in einem erhöhten Abfallaufkommen. Zwischen diesen beiden extremen Szenarien ist das Szenario „Neutral: Weiter wie gehabt“ einzuordnen. Hierbei existiert bis 2030 zwar ein hohes Nachhaltigkeitsbewusstsein in Gesellschaft und Politik, aber es findet kein konkretes Handeln statt. So dominieren weiterhin kostengetriebene Entscheidungen. Somit besteht in dieser Umwelt zwar grundsätzlich Potenzial für innovative Ansätze, dieses beruht aber nicht auf Nachhaltigkeitsaspekten, sondern nach wie vor auf Kostenstrukturen.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die einzelnen Szenarien detaillierter vorgestellt. Bei diesen Darstellungen liegt der Fokus auf globalen, allgemeinen Entwicklungen, die die einzelnen Szenarien prägen. Jedes Szenario wird dabei durch ein Bild untermalt. Diese Illustrationen ermöglichen eine sehr schnelle Erfassung der Vielseitigkeit und Komplexität der Szenarien und erleichterten so den partizipativen und diskursiven Prozess. Anschließend folgt die Einschätzung der Relevanz der einzelnen Technologien vor dem Hintergrund der Szenarien. Die abgeleiteten Erkenntnisse für die einzelnen Demonstratoren werden dabei aufgezeigt.

Szenario „Ideal: Grüne neue Welt“

Im Jahr 2030 existiert in Europa eine Wertegesellschaft. Der Nachhaltigkeitsgedanke ist für das Handeln bestimmend und im Bewusstsein der Menschen tief verwurzelt. Sowohl Bürgern als auch Politikern ist ein Beitrag zu einer nach-

Nr.	Faktor	Annahme A	Annahme B	Annahme C
1	Werte in der Gesellschaft und Politik	Hohes Bewusstsein ohne konkretes Handeln; preisgetrieben (Status Quo)	Nachhaltigkeit wichtiger als Gewinn/Output mit nötiger Verhaltensänderung	Kostendruck ist ausschlaggebend; Kein Nachhaltigkeitsbewusstsein
2	Werte des Unternehmens	Hohes Bewusstsein ohne konkretes Handeln; Gewinnorientiert (Status Quo)	Nachhaltigkeitsaspekte sind ausschlaggebend	Kostendruck ist ausschlaggebend; Kein Nachhaltigkeitsbewusstsein
3	Produktionsformen	Implementierung der verfügbaren Technologien nach dem Stand der Technik	Nachhaltige Produktionsformen etabliert / Effizienter Technologietransfer in die Produktion	Produktion nicht immer auf dem Stand der Technik
4	Entwicklung der Rohstoffpreise (- primär, - sekundär)	Anstieg bei vorhersahbaren Schwankungen bezüglich Frequenz und Amplitude	Anstieg bei unvorhersehbaren Schwankungen bezüglich Frequenz und Amplitude	
5	Strategische und operative Verfügbarkeit von Rohstoffen	Verknappung und Abhängigkeit	Autarkie wird gefördert	
6	Abfallaufkommen	Geringeres Abfallaufkommen (Vermeidungsstrategien erfolgreich)	Höheres Abfallaufkommen	Stagnation des Abfallaufkommens und heterogene Entwicklung der Zusammensetzung
7	Recycling	Weiterhin überwiegend Downcycling aber höhere Recyclingquoten	Verstärktes Kaskadensystem für verlangsamtes Downcycling	Upcycling gewinnt, realisiert
8	Globaler Ressourcenverbrauch	2030 ca. 105 Mrd. t		
9	Energiemix	Szenario "Business as usual", Erneuerbare Energien 15%, fossile Energieträger 70%, Kernenergie 15%	Anteil an erneuerbaren Energien auf über 30% ansteigen	
10	CO2-Emmissionspreis	Preis deutlich gestiegen	Preis ist gesunken; Emissionshandel ist nicht mehr aktuell	
11	Rechtliche Regulation für Produkte und Technologien in den EU Ländern	Unterschiedlich in der Umsetzung mit Bestrebungen zur Harmonisierung (Status quo)	Harmonisierung erfolgreich umgesetzt	
12	Design von Hybridbauteilen	Funktionsintegration ohne Berücksichtigung von Recyclingaspekten (Status quo)	Erweiterung der Designvorgaben im Sinne Design2Recycling (z.B. Sourcing, Handling/Sicherheit)	
13	Recycling von Hybridbauteilen/ Verbundwerkstoffen	Mengenzunahme: Kein effizientes Aufarbeiten möglich (-> thermische Verwertung oder Export) (Status Quo)	Mengenzunahme: Vollständiges Wiederverwerten durch effizientes Trennverfahren	Mengenzunahme: Kein vollständiges Trennen: Vermehrte Kaskadennutzung, neue Verwertungswege (Re-Use)
14	Metalllösungen z.B. aus Recyclingprozessen	Hohes Aufkommen an Metalllösungen teilweise hohe Recyclingquoten, unvollständige Kreisläufe (Status Quo)	Hohes Aufkommen an Metalllösungen, Verstärkte Dissipation	Hohes Aufkommen an Metalllösungen, Schließung der Kreisläufe
15	Konsum von Holzprodukten	Markt für Holzprodukte im Wachstum (Status Quo)	Holzverbrauch stagniert	
16	Holzrecyclingquote (stark politisch reguliert)	Erhalt des Status Quo	Stoffliche Nutzung gestiegen	Energetische Nutzung gestiegen
17	Germaniumverbrauch	Stark erhöhter Verbrauch	stagnierende/ konstante Nachfrage	
18	klassische Zinkförderung	Rückgang der klassischen Zinkförderung	Konstante Zinkförderung	
19	Klärschlammverwendung	Höherer Anteil der Monoverbrennung	Höherer Anteil der Mitverbrennung	
20	Flachglasherstellung	Keine konkurrenzfähige Technologie (Status Quo)	Konkurrenzfähig durch Technologieoptimierung	
21	Behälterglas	Steigende Verunreinigung/ Vermischung trotz Öffentlichkeitsarbeit	massive Verunreinigung (downcycling)	

Abbildung 3. Drei Rohszenarien zur Beschreibung der zukünftigen Kreislaufwirtschaft.

haltigen Gesellschaft wichtiger als Gewinnorientierung oder Befriedigung individueller Konsumwünsche. Diese Einstellung prägt auch die in Europa angesiedelten Unternehmen. Dank effizientem Technologietransfer haben sich inzwischen nachhaltige Produktionsformen etabliert. Insgesamt unterliegt die Produktion hohen technologischen Standards, die den Energie- und Rohstoffeinsatz verringern. Das gute Umfeld für Forschung und Entwicklung ermöglicht es, durch intensive Forschungsarbeiten die neuen Technologien auch in bisher noch unrentablen Gebieten zu nutzen (Abb. 4).

Im Zuge der Entwicklung hin zur nachhaltigen Gesellschaft sind im Laufe der letzten Jahre sowohl die Preise von Primär- als auch von Sekundärrohstoffen gestiegen, da Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekte in die Preisbildung einbezogen werden. Die Preise sind zwar Schwankungen unterworfen, die jedoch infolge der Bemühungen, Rohstoffquellen zu sichern und zu schonen, vorhersehbar und beherrschbar bleiben. Aufgrund dieses absehbaren und kalkulierbaren Preisanstiegs wird die Gewinnung von Rohstoffen aus Abfallprodukten auch bei hohem Anlagenaufwand attraktiv, was beispielsweise positive Auswirkungen für die vermehrte Anwendung der Technologie der Heißgasfiltration mit sich bringt. Auch die steigenden Kosten für Erdöl und andere Basisstoffe von Polymeren führen zu einer intensiv betriebenen Entwicklung alternativer Produktionsformen. Holz birgt beispielsweise ein großes Potenzial zur Gewinnung von Biopolymeren. Die steigenden Primärrohstoffpreise begünstigen das Recycling von Glas, während sich der Anstieg der Sekundärrohstoffpreise auf den Volumenstrom von Glas eher dämpfend auswirkt. Folglich wird auch aus ökonomischen Gründen in die neuen Technologien investiert. So haben sich im europäischen Raum längst auch recht-

liche Regulationen für Produkte und Technologien sowie politische Rahmenbedingungen etabliert, die eine nachhaltige Gesellschaft in ihrer Entwicklung fördern.

Szenario „Katastrophal: Nach uns die Sintflut“

Im Jahr 2030 stehen die Chancen schlecht, den Herausforderungen, vor die die Gesellschaft aufgrund des Klimawandels und schwindender Ressourcen gestellt wird, angemessen zu begegnen. Weder in der Gesellschaft noch in der Politik ist ein Nachhaltigkeitsbewusstsein verbreitet. Nachhaltige Ansätze können folglich im Alltag nicht bestehen, stattdessen ist insbesondere in Unternehmen der Kostendruck ausschlaggebend und vorrangig (Abb. 5).

So wird in der Regel diejenige Produktionsweise verwendet, die für das Unternehmen die geringsten Kosten mit sich bringt, wobei Aspekte wie Umwelt- oder Ressourcenschonung nicht berücksichtigt werden. Effizientere Techno-



Abbildung 5. Szenario „Katastrophal“.

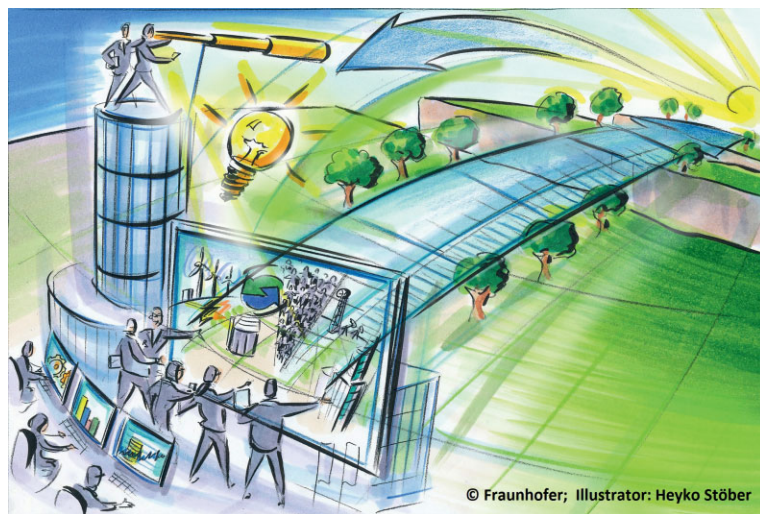


Abbildung 4. Szenario „Ideal“.

logien und neuartige Produktionsweisen, für deren Ablösung und Ersatz hohe Investitionen erforderlich wären, setzen sich gegen bekannte und etablierte Techniken oftmals nicht durch.

Diese Investitionslücken füllt auch der Staat nicht aus, da die Öffentlichkeit kein Interesse an nachhaltigerer Entwicklung bekundet. Unter diesem Zustand leiden auch Forschung und Entwicklung. Neuerungen werden selten implementiert. Allein die Wirtschaftlichkeit entscheidet über den Einsatz neuer Technologien, die Produktionsformen entsprechen also nicht dem Stand der Technik. Entsprechend ist die Produktion in Europa teilweise veraltet.

Da keine Anstrengungen zur Senkung des Rohstoff- oder Energieverbrauchs unternommen werden, steigen die Preise der Rohstoffe weiterhin an. Diese Erhöhung der Primärrohstoff-

preise schafft ein zunächst positives Umfeld für den Volumenstrom Glas, allerdings wirken sich steigende Sekundärrohstoffpreise eher dämpfend aus. Die Verknappung der Rohstoffe erhöht den Druck zur Rohstoffgewinnung mit Alternativverfahren, was beispielsweise den Einsatz der Heißgasprozesse fördert. Der Trend zum Preisanstieg wird begleitet von unvorhersehbaren Preisschwankungen, die unter anderem daraus resultieren, dass die Rohstoffreserven zunehmend knapp werden. Auf diese nicht abschätzbaren Schwankungen kann durch die Recyclingtechnologie der niedrigkonzentrierten Metallsalzlösungen flexibel reagiert werden, hier ist also ein hohes Potenzial gegeben. Festzuhalten ist außerdem, dass die unvorhersehbaren Preisschwankungen für Rohstoffe Investitionen in neue, noch nicht wirtschaftliche Technologien hemmen.

Die Abhängigkeit von den großen Lieferanten und rohstoffreichen Ländern wächst zusehends, während Bemühungen, diese Abhängigkeit beispielsweise über umfangreicheres Recycling und Entkopplung von den Primärvorkommen zu reduzieren, in der Gesellschaft keine Unterstützung erfahren und nicht umgesetzt werden. Daher sind Prozesse zur Gewinnung von knappen Wertstoffen zunehmend wichtiger.

Szenario „Neutral: Weiter wie gehabt“

In Gesellschaft und Politik existiert ein hohes Nachhaltigkeitsbewusstsein. Trotz dieses Wissens um die Bedeutung von Recycling wird nicht entsprechend gehandelt. Vielmehr werden Entscheidungen preisgetrieben getroffen. Auch in den Unternehmen wird gewinnorientiert gehandelt, obwohl die Wichtigkeit von einem schonenden Umgang mit Energie und Ressourcen gesehen wird. Verfügbare Technologien werden – sofern dadurch eine Gewinnmaximierung erreicht wird – nach dem aktuellen Stand der Technik in die Produktionswege implementiert, ohne besondere Bemühungen, nachhaltige Produktionsformen einzusetzen (Abb. 6).



Abbildung 6. Szenario „Neutral“.

Die Rohstoffpreise der Primär- und Sekundärrohstoffe steigen weiterhin an, wodurch beispielsweise das Recycling von niedrigkonzentrierten Metallsalzlösungen an Relevanz gewinnt. Die zeitlichen und preislichen Schwankungen halten sich zwar im Rahmen, trotzdem werden Investitionen in alternative Gewinnungsstrategien attraktiver, da die Absicherung gegenüber Preisschwankungen und bezüglich der strategischen Verfügbarkeit der Rohstoffe an Relevanz gewinnt. Für innovative Ansätze besteht durchaus Potenzial, da deren Implementierung vorrangig aus Kostengründen und nicht aufgrund eines Nachhaltigkeitsgedankens erfolgt.

Trotz des noch fehlenden Nachhaltigkeitsgedankens wird dieses Szenario von einigen Entwicklungen geprägt, die sich durchaus positiv auf die betrachteten Demonstratoren auswirken: Einzelne Regionen sind um Autarkie bemüht, um nicht zu stark von den schwankenden Weltmarktpreisen abhängig zu sein. Hierbei nehmen beispielsweise die Heißgasprozesse eine wichtige Rolle ein, da sie eine vermehrte Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen ermöglichen. Ebenso verhält es sich beim Demonstrator MVA-Schlacken. Ein prägender Faktor dieses Szenarios ist außerdem der deutlich gestiegene CO₂-Emissionspreis, der nach energetisch günstigeren Recyclingstrategien verlangt.

Es ist ein Fall von „Wirkung behindert Ursache“: Weil kleine, improvisierte Lösungen für akute Probleme gefunden werden, wird diesen Problemen die Dringlichkeit genommen und es werden keine großen Lösungen für übergreifende Probleme (wie die sich ankündigende Rohstoffkrise) gefordert. Bis zur Eskalation dauert es aber wesentlich länger als im Szenario „Nach uns die Sintflut“. Viele Firmen scheuen nach wie vor große Investitionen in das Thema Nachhaltigkeit. Auch bei der rechtlichen Regulation in den EU-Ländern fehlt es an einer gezielten Fokussierung auf Recycling und einer einheitlichen Durchführung. Insgesamt bestehen durchaus Bemühungen hinsichtlich geschlossener Kreisläufe, konsistente Umsetzungen fehlen aber nach wie vor.

4 Szenariobasierte Einschätzung der Technologiepotenziale

Nach der Erstellung der oben beschriebenen Szenarien wurden die Potenziale der einzelnen Demonstratoren in deren Kontext genauer untersucht. Das Ziel dieser Einschätzung war es, die längerfristigen Potenziale der zu entwickelnden Technologien vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Umfeldszenarien hinreichend zu bewerten, um anschließend bewusst eine robuste, risikoarme Technologie oder auch eine risikoreichere Technologie zu wählen, die besonders große Chancen bietet. Grundsätzlich stand die Frage im Fokus, welche Auswirkungen die den Szenarien zugrundeliegenden Entwicklungen konkret auf die betrachteten Stoffströme und

Technologien haben können. Die Auswirkungen der Szenarien auf die verschiedenen Demonstratoren wurden im Rahmen zweier Prozesse eingeschätzt.

Zum einen wurde ein weiterer Workshop mit den Projektteilnehmern durchgeführt. Hierbei erfolgte die Einschätzung der Potenziale jedes Demonstrators in drei Schritten: (i) Zunächst wurden die Leistungspotenziale der Demonstratoren im Allgemeinen beschrieben. Zum einen hinsichtlich der technologischen und gesellschaftlichen Ziele und zum anderen hinsichtlich der Stoffströme und der adressierten Branchen. (ii) Im Anschluss erfolgte die Einschätzung der zukünftigen Leistungspotenziale der Demonstratoren vor dem Hintergrund des jeweiligen Szenarios. Hierfür wurden zunächst die in Szenarien beschriebenen Rahmenbedingungen von den jeweiligen Demonstratorverantwortlichen für den Einsatz ihrer Technologien diskutiert und die Technologiepotenziale nochmals kritisch hinterfragt. Somit konnte die rein szenariobasierte Einschätzung durch das Wissen der Experten erweitert werden. Ein weiterer Vorteil des interaktiven Workshops war es, dass eine globale Betrachtung der Entwicklungen ermöglicht wurde und die Ergebnisse in der gesamten Gruppe diskutiert wurden. (iii) Abschließend erfolgte eine Potenzialeinschätzung für die Demonstratorstechnologien in den einzelnen Szenarien (Abb. 7).

Im Ergebnis zeigt diese Einschätzung, dass die Technologieentwicklungen der Demonstratoren robust gegenüber verschiedenen möglichen zukünftigen Entwicklungen sind. Keine der betrachteten Technologieentwicklungen ist ausschließlich bei einem Szenario marktgängig und einsetzbar, sondern mindestens bei zwei möglichen Zukünften erfolg-

reich. Dieses Ergebnis war ein wichtiges Indiz für die Technologieauswahl und -fortentwicklung im weiteren Projektverlauf.

Zusätzlich zu der Workshop-basierten, generellen Einschätzung der Demonstratoren im jeweiligen Szenario wurde im Nachgang eine detaillierte Analyse auf Annahmenebene durchgeführt. Diese Analyse basierte auf der Gegenüberstellung der Faktoren und den dazugehörigen Zukunftsannahmen aus dem jeweiligen Szenario mit den potenziellen Einsatzmöglichkeiten einzelner Demonstratoren (s. a. Abb. 3).

Hierfür wurde der Einfluss der einzelnen Zukunftsannahmen, wie z. B. eine bestimmte Entwicklung der Rohstoffpreise, auf die jeweilige Technologie bestimmt und anhand einer Skala auf der vertikalen Achse bewertet. Die Werteskala verlief dabei von -- (Zukunftsannahme hemmt den Demonstratoreinsatz stark) bis ++ (Zukunftsannahme begünstigt den Demonstratoreinsatz stark). Sollte eine Annahme in einem bestimmten Szenario zukünftig keinen direkten Einfluss auf einen Demonstrator haben, wurde dieser mit $\pm$ bewertet. Annahmen, für die kein relevanter Einfluss auf die zukünftige Entwicklung der Technologie identifiziert wurde, wurden aus der Darstellung ausgeschlossen.

Diese Untersuchung erfolgte für alle drei Szenarien. Abb. 8 zeigt die Einordnung der einzelnen Zukunftsannahmen der Szenarien für die betrachteten Demonstratoren. Durch die Einstufung der einzelnen Annahmen wurde die Verteilung und somit die Auswirkung der Faktoren auf die Technologien deutlich. Aus der entstandenen Übersicht konnten somit generelle Entwicklungstendenzen

abgelesen werden, d. h. ob das vorliegende Szenario die jeweilige Technologie eher fördert oder hemmt. Beispielsweise wird der Einsatz von niedrigkonzentrierten Metallsalzlösungen in jedem Szenario durch 9 bis 13 Zukunftsannahmen begünstigt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung decken sich im Wesentlichen mit den Einschätzungen aus dem Workshop. So führt auch diese Analyse zur zentralen Erkenntnis, dass keine der betrachteten Technologien nur bei einem Szenario marktgängig und einsetzbar ist, sondern mindestens bei zwei möglichen Zukünften zur Anwendung kommt. Abb. 9 stellt dieses Resultat graphisch dar, indem die Anzahl der einzelnen Auswirkungen über alle Faktoren pro Szenario und Demonstrator gemittelt wurden. Beispielsweise wirken sich für den Demonstrator Hybridbauteile sowohl das grüne Szenario als auch das gelbe Szenario positiv aus, während die Entwicklung des Demonstrators im Umfeld des roten Szenarios

Demonstrator	Szenario 1		Szenario 2	Szenario 3
	IDEAL <i>neue Welt</i>	Grüne <i>Welt</i>	NEUTRAL <i>Weiter wie gehabt</i>	KATASTROPHAL <i>Nach uns die Sintflut</i>
Altholzkaskade	++		-	+
Hochtransparentes Glas	++		+	$\pm$
Niedrig konzentrierte Metallsalzlösungen	++		+	$\pm$
Heissgasfiltration	++		+	++
MVA-Schlacken	+		$\pm$	++
Hybridbauteile	++		+	-

Legende	
++	Szenario begünstigt Demonstratoreinsatz stark
+	Szenario begünstigt Demonstratoreinsatz
$\pm$	Szenario wirkt neutral gegenüber Demonstrator
-	Szenario hemmt Demonstratoreinsatz
--	Szenario hemmt Demonstratoreinsatz stark

Abbildung 7. Einschätzung der Potenziale der Demonstratoren in den einzelnen Szenarien.

Altholzkaskade									Hochtransparentes Glas									Niedrigkonzentrierte Metallsalzlösungen											
++	3	4	2	10	12	15	4	5	++	1	2	3	9	20	21	4	21	++	1	2	3	5	13	18	4	5	6		
	7	15	10							7	9	20				5	14		18	19				12	13	14			
	13	12								21													17	18	19				
+	11	5		5	7	11	9	11	12	+	4	5	10	4	5	7	5	6	20	+	4	7	13	2	4	6	9	10	15
											12	13		10	12	13								7	14		16		
±	6			4			6	7	10	±				1	2	3	7	10	±	12	15	19	1	3	12	7			
							13	16	15														15	16					
-	9			9	13		1	2	3	-							1	2		-							1	3	
																	3	9									2		
--				1	2	3				--	6									--									
				16																									

Heißgasfiltration									MVA-Schlacken									Hybridbauteile															
++	1	2	3	5	6	18	4	5	6	++	1	2	3	19				4	5	6	++	1	2	3	5	9	10	4					
	5	17	18	19				9	10		12	7	13				9	10	12	5		7	9	12									
	19						13	17	18					13	19				10	11		12	13										
+	4			1	2	4	7				+	4	5			1	3	4	14				+	4			3	4	6	5			
										5		6					7	13	15														
±	7	9	16	3	9	17	15				±	9	10		2	9	10	7				±				1	2		7	16			
	6	10	12	7	10	12	3					6	12	19	7	12	13	1	2	3							16						
-	13			13	16					-										-													
--							1	2				--										--							2	3	12		
																										13							

Abbildung 8. Einschätzung der Potenziale der Demonstratoren in den einzelnen Szenarien auf Annahmenebene. Die Farben grün, gelb und rot stehen jeweils für das entsprechende Szenario; die angegebenen Zahlen stellen die fortlaufend nummerierten Faktoren mit der jeweiligen Ausprägung dar (s. Abb. 3).

rios eher gehemmt wird. Auch hier wird die grundlegende Aussage unterstrichen, dass mindestens zwei Szenarien die Entwicklung der Technologien unterstützen.

5 Nutzen des Szenarioprozesses

Unsicherheit bezüglich zukünftiger Entwicklungen ist grundsätzlich Bestandteil von Forschungsprojekten, da diese immer in Wechselwirkungsbeziehungen sowohl zu tech-

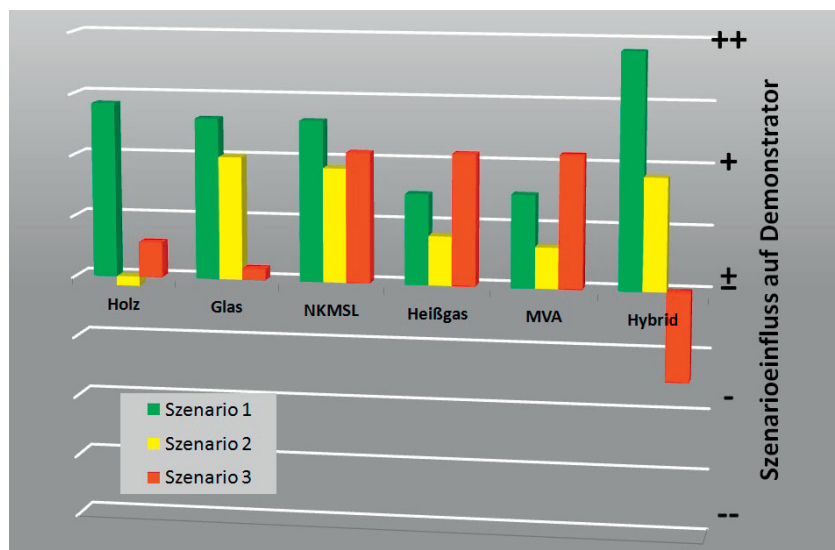


Abbildung 9. Generelle Entwicklungstendenz der einzelnen Demonstratoren im Kontext der drei Szenarien.

nologischen als auch zu gesellschaftlichen Entwicklungen in ihrem Umfeld stehen. Bei Forschungsaktivitäten kann es daher nicht darum gehen, Unsicherheiten und Risiken vollständig zu vermeiden, sondern vielmehr um einen bewussten Umgang unter Berücksichtigung der sich jeweils bietenden Chancen [13]. So wurden hier die längerfristigen Potenziale der zu entwickelnden Technologien vor dem Hintergrund unterschiedlicher Szenarien hinreichend bewertet, um anschließend bewusst robuste technologische Lösungen zu wählen, die besonders große Chancen bieten.

Besondere Nutzeffekte resultierten aus der gemeinsamen Entwicklung und Interpretation der Szenarien mit den Projektpartnern. Der gemeinsame Entwicklungsprozess bot Raum, damit die Konsortialpartner, bestehend aus sieben Fraunhofer-Instituten, ein gemeinsames Projektverständnis entwickelten und danach im Detail ihre Entwicklungstätigkeiten abstimmen konnten. Zudem konnten die unterschiedlichsten Zukunftsvorstellungen ausgetauscht und diskutiert werden. Dieser Prozess war für alle Beteiligten durchaus fruchtbar. Durch die intensive und strukturierte Auseinandersetzung mit den Ausprägungen der verschiedenen Zukunftseinflussfaktoren entstand ein Orientierungswissen bei den Teilnehmern, das für zukünftige Entwicklungsprozesse sensibilisiert.

Auf Grundlage und vor dem Hintergrund der entwickelten Szenarien konnten verschiedene Optimierungsmöglichkeiten für die Demonstratoren ausgetauscht und umgesetzt werden. Zudem wurde offen über Potenziale und eventuelle Schwächen der Demonstratoren gesprochen. Die Szenarien dienten als Bewertungshintergrund zur objektiven Potenzialeinschätzung auf technologischer Ebene. Diese wurde im weiteren Verlauf des Projektes Molecular Sorting noch um die Einschätzung der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) der Technologien ergänzt. Hierbei konnten die Szenarien als Rahmen dienen. Zudem konnten verschiedene Inputannahmen bei der Berechnung der LCA aus den Szenarien einfließen.

Neben den direkten Nutzeffekten für die im Projekt beteiligten Institute können auch weitere Akteure von den Szenarien profitieren. Für Unternehmen beispielsweise, die die betrachteten Rohstoffe verwenden, künftig nutzen wollen oder horizontal bzw. vertikal mit solchen Unternehmen verknüpft sind, sind diese Informationen relevant für Investitionsentscheidungen bzw. Entscheidungen über die Entwicklung neuer Technologien. Die Szenarien mit den diskutierten Unsicherheiten können in den eigenen Strategieprozess integriert werden. Auch für Entscheidungen auf politischer Ebene können die gewonnenen Erkenntnisse Anhaltspunkte für die Priorisierung bei der Förderung von Technologien und die Beforschung von Stoffströmen und deren Kreisläufen geben.

Appendix

Demonstrator MVA-Schlacke: Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Valley.
 Demonstrator Hybridbauteile: Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT), Pfinztal.
 Demonstrator Niedrig Konzentrierte Metallsalzlösungen: Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB), Stuttgart.
 Demonstrator Heißgasfiltration: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Dresden.
 Demonstrator Hochtransparente Gläser: Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung (ISC), Würzburg.
 Demonstrator Altholzkaskade: Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI), Braunschweig.

Literatur

- [1] P. J. H. Schomaker, *Sloan Manage. Rev.* **1995**, 36 (2), 25 – 40.
- [2] H. Geschka, in *High-Risk-Projekte. Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen* (Eds: O. Gassmann, C. Kobe, E. Voit), 8. Aufl., Springer, Berlin **2001**, 301 – 316.
- [3] H. Geschka, U. von Reibnitz, in *Praxis der strategischen Unternehmensplanung* (Eds: A. Töpfer, H. Afhelt), Metzner, Frankfurt am Main **1983**, 125 – 170.
- [4] F. Tessen, *Planung & Analyse* **1998**, 3, 40 – 45.
- [5] M. Amer, T. U. Daim, A. Jetter, *Futures* **2013**, 46, 23 – 40.
- [6] H. Geschka, U. von Reibnitz, *Die Szenario-Technik als Grundlage von Planungen*, Battelle-Institut e.V., Frankfurt am Main **1981**.
- [7] F. A. O'Brien, M. Meadows, *Technol. Forecasting Social Change* **2012**, 80 (4), 643 – 656.
- [8] T. J. B. M. Postma, F. Liebl, *Technol. Forecasting Social Change* **2005**, 72, 161 – 173.
- [9] E. A. Eriksson, K. M. Weber, *Technol. Forecasting Social Change* **2008**, 75, 462 – 482.
- [10] K. van der Heijden, *Scenarios: The Art of Strategic Conversation*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken **2005**.
- [11] E. Kemp-Benedict, *Environ. Res. Lett.* **2012**, 4, 041004.
- [12] R. Seitz et al., *Molecular Sorting – Szenarien für die Welt von übermorgen*, Fraunhofer-Gesellschaft, München **2012**.
- [13] E. Dönitz, J. Ewa, *Effizientere Szenariotechnik durch teilautomatische Generierung von Konsistenzmatrizen*, Gabler GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden **2009**.