

Übersichtsbeitrag

Ressourceneffizienz von heute bis übermorgen

Jörg Woidasky^{1,*} und Thomas Hirth²

DOI: 10.1002/cite.201100257

Natürliche Ressourcen sind vor allem Rohstoffe, Boden, Wasser, Luft, Nahrung und Energie. Weltweit werden jährlich ca. 60 Mrd. t Ressourcen verbraucht – mit steigender Tendenz. Ressourceneffizienz ist daher einer der wichtigsten Schlüssel für nachhaltige Entwicklung. Als Teil des Nachhaltigkeitskonzepts wird sie dabei von der Ebene der Vereinten Nationen über die Europäische Union bis in konkrete F&E-Inhalte von Unternehmen und Forschungseinrichtungen übersetzt. Der Beitrag zeigt dies beispielhaft an einem neuen Forschungsschwerpunkt: „Molecular Sorting“ soll die Wieder- und Weiterverwertung von Werkstoffen durch leistungsfähige Trennprozesse bis auf molekulare Ebene ermöglichen.

Schlagwörter: Forschungsansatz, Molecular Sorting, Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz

Eingegangen: 23. Dezember 2011; *revidiert:* 12. Februar 2012; *akzeptiert:* 23. Februar 2012

Resource Efficiency from Today to Beyond Tomorrow

Natural resources are primarily raw materials, soil, water, air, food, and energy. The annual consumption of these resources amounts to about 60 billion metric tons and is expected to increase further. Thus resource efficiency is one key factor for sustainable development. This efficiency concept is being adopted in transnational agreements on the United Nations level, in the European Union's strategy, and also in R&D activities of companies and research institutions. This paper presents Molecular Sorting as a concept for resource efficiency, which is aiming at materials recovery by sorting and separation down to a molecular level if needed, to improve recycling.

Keywords: Molecular sorting, Research agenda, Resource efficiency, Sustainability

1 Einleitung

Im Oktober 2011 wurde der siebenmilliardste Mensch auf dieser Erde geboren. Die Entwicklung des globalen Ausstoßes von Klimagasen entspricht dem pessimistischen Szenario aller Prognosen, die auf die Begrenzung der globalen Erderwärmung auf +2 °C ausgerichtet sind. Die Rohstoffmärkte zeigen große Volatilitäten. Die Finanzwirtschaft sieht sich ungekannten Herausforderungen gegenüber, die auch die Realwirtschaft nicht unbeeinflusst lassen. Und: 2012 ist das Jahr von *Rio plus 20*, dem Ende der zweiten Dekade nach dem Erdgipfel in Rio de Janeiro, der 1992 weltweit Nachhaltigkeitsansätze anstieß. In Deutschland wurde dies unter der Überschrift *Agenda 21* auf zahlreichen Ebenen begonnen. Das Jahr 2012 wird als *Jahr der Nachhaltigkeit* mit zahlreichen Veranstaltungen begangen.

Dabei übersetzt sich der zunächst jahrelang fast ausschließlich unter ökologischen Gesichtspunkten diskutierte Ansatz der Nachhaltigkeit, der dauerhaft durchhaltbaren Entwicklung, bereits in alle Handlungsfelder, Gesellschaftsschichten und auch Wirtschaftszweige. Große Automobilhersteller werben mit Nachhaltigkeitsprojekten, die Erstellung von Nachhaltigkeitsberichten ist für zahlreiche produzierende Unternehmen genauso üblich wie die Veröffentlichung von Geschäfts- oder Umweltberichten, und die Bewertung von Unternehmen nach *Sustainability criteria* ist bereits seit Jahren ein üblicher Standard.

Dieser Beitrag soll die globalen Ansätze und Akteure in der Nachhaltigkeitsdiskussion skizzenhaft vorstellen und den aktuellen Stand der Diskussion mit dem Fokus auf Ressourcen- und Rohstoffeffizienz darlegen.

2 Definition Rohstoff- und Ressourceneffizienz

Zu den natürlichen Ressourcen werden erneuerbare und nicht erneuerbare Rohstoffe, Boden bzw. Fläche, Wasser, Luft, Nahrung und Energie sowie in der jüngeren Diskussi-

¹Dr.-Ing. Jörg Woidasky (joerg.woidasky@ict.fraunhofer.de), Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, J.-v.-Fraunhofer-Straße 7, 76327 Pfinztal, Deutschland; ²Prof. Dr. Thomas Hirth, Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Nobelstraße 10, 70569 Stuttgart, Deutschland.

on auch Ökosystemdienstleistungen (komplexe Funktionen von Ökosystemen) gezählt [1]. Die Gewinnung von Rohstoffen, d.h. die Nutzung von Ressourcen stellt eine der momentan am intensivsten diskutierten Schnittstellen zwischen der Öko- bzw. Geosphäre auf der einen und der Technosphäre auf der anderen Seite dar. Zurzeit werden jährlich etwa 60 Mrd. t Ressourcen verbraucht. Dazu zählen die abiotischen (fossile, mineralische Rohstoffe, Baustoffe, Abraum) und biotischen Rohstoffe wie z.B. Biomasse (s. Abb. 1). Dabei ist zwischen dem direkten Ressourcenverbrauch, z. B. Verbrauch von Erzkonzentraten, und dem indirekten Verbrauch, z. B. dem durch die Erzgewinnung verbundenen Verbrauch von Energie, Wasser oder der Entstehung von Abraum, zu unterscheiden. Der indirekte Ressourcenverbrauch kann den direkten um ein Mehrfaches übersteigen.

Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit der Gewinnung von abiotischen Rohstoffen wird zwischen den derzeit wirtschaftlich ausbeutbaren Reserven und den (derzeit) nicht wirtschaftlich gewinnbaren Ressourcen unterschieden. Abb. 2 zeigt eine Einordnung von Rohstoffvorkommen nach der Wirtschaftlichkeit der Ausbeutung, der geologischen Verfügbarkeit und dem Kenntnisstand über Konzentration und Mächtigkeit der jeweiligen Vorkommen. Bereits aus dieser qualitativen Darstellung wird deutlich, dass man sicher nicht von einem generellen kurzfristigen Ende der Verfügbarkeit von Rohstoffen sprechen kann, wiewohl die Erde ein (materiell) beschränktes System darstellt. Hingegen lässt sich feststellen, dass die derzeit bekannten und unter wirtschaftlichen Bedingungen ausbeutbaren Rohstoffvorkommen (Reserven) in absehbarer Zeit zur Neige gehen. Diese Aussichten tragen sicher mit zu den heute zu beobachtenden starken Unsicherheiten an den Märkten mit ihren großen Volatilitäten bei. Gleichzeitig ist jedoch auch mit Blick auf die nationalen und internationalen Maßnahmen zum geänderten Umgang mit Rohstoffen festzustellen, dass die Endlichkeit der natürlich vorkommenden Rohstoffe in der politischen und öffentlichen Diskussion angekommen ist und in technisch-wissenschaftliche Entwicklungen umgesetzt wird. Dies geschieht derzeit in Deutschland meist unter dem Schlagwort der Ressourceneffizienz [1].

Unter Ressourceneffizienz wird das Verhältnis von ökonomischer Wertschöpfung (meistens BIP) und Rohstoffinput verstanden [3]:

$$\text{Ressourceneffizienz} = \frac{\text{Wertschöpfung [€]}}{\text{Rohstoffinput [t]}} \quad (1)$$

Dabei wird bei Strategien zur Ressourceneffizienz-Steigerung oft davon ausgegangen, dass eher die Wertschöpfung konstant gehalten und der Rohstoffinput minimiert wird [3]. Auch hier ist jedoch die Grenze des so bilanzierten Systems relevant: Was mit Blick auf die Herstellung eines einzelnen Produkts als ressourceneffizient gilt, muss bei Betrachtung gesamter Volkswirtschaften nicht zwangsläufig zu einer Steigerung der Ressourceneffizienz führen. Durch (ressourcen-)effizientere Produktionsweisen kann eine größere Nachfrage am Markt befriedigt werden, die Gesamtzahl der abgesetzten Produkte steigt und überkompensiert so die produktspezifischen Einsparungen. Dieses Phäno-

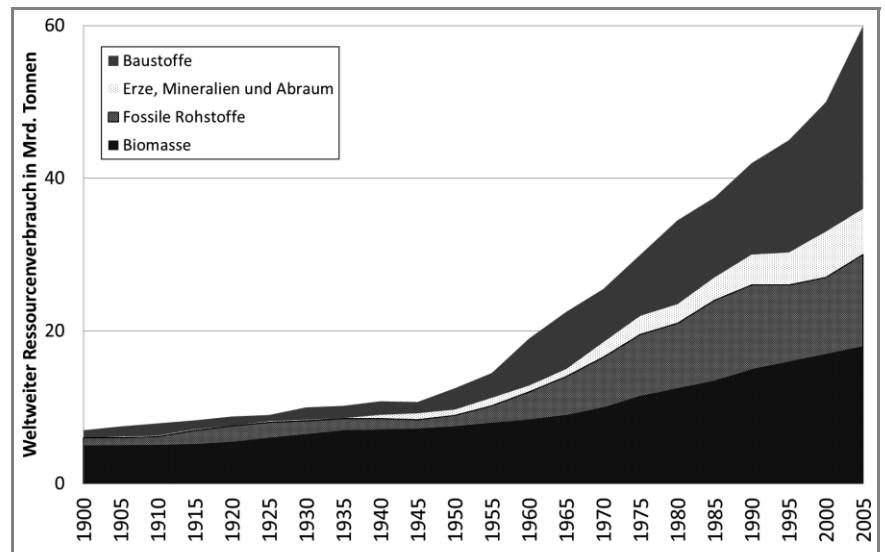


Abbildung 1. Globaler Ressourcenverbrauch seit 1900 [1].

Grad der geologischen Gewissheit		identifiziert		unentdeckt		
		nachgewiesen		geschlussfolgert	hypothetisch	spekulativ
Grad der Wirtschaftlichkeit	gemessen	indiziert				
	wirtschaftlich	Reserven				
unwirtschaftlich	marginal	Grenzreserven				
	submarginal	Ressourcen				

Abbildung 2. Klassifikation von Rohstoffvorkommen [2].

men wird als *Rebound* (Rückprall)-Effekt bezeichnet und legt nahe, zum einen den Blick von der Technologieentwicklung auf die wirtschaftlich-gesellschaftliche Perspektive aufzuweiten und zum anderen den Rohstoffinput absolut in seiner Höhe zu beschränken. Erste Schritte hat hier die deutsche Bundesregierung mit ihrer Nachhaltigkeitsstrategie und dem Ziel der Verdopplung der Ressourcenproduktivität von 1994 bis 2020 getan [4]. Eine allgemein anerkannte Methode zur Messung der Ressourceneffizienz existiert derzeit (noch) nicht, sondern ist Gegenstand der Forschung. Zu den Anforderungen an eine solche Methode zählen neben einer guten Handhabbarkeit auch die Berücksichtigung ökologischer Aspekte entlang des gesamten Lebenswegs ähnlich wie in Ökobilanzen, die Heranziehung ökonomischer (Knappheit, strategische Relevanz) und sozialer Kriterien (Arbeitsbedingungen z. B. beim Rohstoffabbau) [5]. Eine Übersicht über ausgewählte Methoden zur Ressourceneffizienz-Messung gibt [3]. Zur Begriffsklärung in der Diskussion ist das Umweltbundesamt-Glossar zum Ressourcenschutz [19] hilfreich.

3 Gesellschaftliche Trends und Entwicklungen

Die Auswirkungen der zunächst technisch-wirtschaftlichen Diskussionen und Effekte auf die politisch-gesellschaftliche Ebene sind zurzeit nicht absehbar. Grundsätzlich lassen sich hier derzeit drei verschiedene, sich gegenseitig ausschließende Entwicklungsrichtungen identifizieren [6]:

- 1) Fundamentalkritik: Die Wirtschafts- und Gesellschaftsstrukturen des westlich-kapitalistischen Gesellschafts-systems hat sich aus Nachhaltigkeitssicht überlebt, da sie nicht in der Lage sind, eine dauerhafte Entwicklung sicherzustellen. Als Ausweg wird eine veränderte Gesellschafts- und Wirtschaftsform gesehen.
- 2) Modernisierungsdefizite: Innerhalb der bestehenden Strukturen und Wirtschaftsweisen muss (nur) die Öko-Effizienz des „industriellen Stoffwechsels“ zwischen Technosphäre und Ökosphäre verbessert werden. Als Ausweg wird eine konsequente Technologie-Entwicklung gesehen.
- 3) Fehlentwicklungen im System: Sowohl die derzeitigen Gesellschaftssysteme als auch der „Glaube an den technisch-wissenschaftlichen Fortschritt“ führen zu nicht nachhaltigen Zuständen. Als Ausweg werden veränderte Regulationsmechanismen für Märkte und Gesellschaft gesehen.

Die Diskussion in Deutschland scheint derzeit der Entwicklungsrichtung 2 zu folgen. Inwieweit diese Entwicklungsrichtung oder die anderen potenziellen Entwicklungspfade zu einer nachhaltigen Situation, also zu einer dauerhaft durchhaltbaren Entwicklung führen, bleibt abzuwarten. Mit Blick auf die themenverwandten Diskussionen im Bereich des Klimawandels und der globalen Treibhausgasemissionen scheint hier jedoch ein gewisses Maß an Skepsis erlaubt.

4 Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz

Ressourceneffizienz ist ein zentraler Baustein von Strategien zur Implementierung der nachhaltigen Entwicklung. Als Teil des Nachhaltigkeitskonzepts wird die Ressourceneffizienz dabei von der Ebene transnationaler Übereinkünfte, z. B. auf der Ebene der Vereinten Nationen (UN) über die Strategien der Europäischen Union (EU) und der deutschen Bundesregierung bis in konkrete Forschungs- und Entwicklungsinhalte in einzelnen Unternehmen und Forschungseinrichtungen übersetzt. Im Folgenden werden die relevantesten Elemente und Akteure dieses Prozesses skizziert.

4.1 UN Sustainable Consumption and Production Pattern und Rio-Folgekonferenz

Das UN/UNEP Department of Economics and Social Affairs (DESA) deckt mit seinen Themenfeldern von Armutsbekämpfung über makroökonomische Fragestellungen bis hin zur nachhaltigen Entwicklung eine Vielzahl entwicklungsrelevanter Fragestellungen ab, die in zwischenstaatlichen Prozessen bearbeitet werden. Unter anderem begleitet die DESA die Umsetzung der acht Millenniumsziele (Millennium development goals, MDG), die 2000 von den UN-Mitgliedsstaaten beschlossen und bis 2015 umgesetzt werden sollen. Das siebte dieser Ziele (MDG7) ist die Umsetzung ökologischer Nachhaltigkeit einschließlich der Umsetzung dieser Anforderungen in nationale Politiken und Programme. Durch die DESA Division for Sustainable Development (DSD) wird die Umsetzung des 2002 beschlossenen Johannesburg Plan of Implementation of Sustainable Consumption and Production Pattern (SCP) begleitet.

Die Umsetzung dieses Ansatzes erfolgt durch den auf zehn Jahre angelegten Marrakesch-Prozess (<http://esa.un.org/marrakeschprocess/>). Arbeitsformen zur nationalen Umsetzung des Marrakesch-Prozesses sind regionale Round Tables und National Cleaner Production Centers (NCPC). In Europa wurde ein European Roundtable for Sustainable Consumption and Production (ERSCP) gegründet, dessen 15. Konferenz im Mai 2012 zu den Schwerpunkten Bauen, Tourismus, Energie, Ressourcen, Lifestyle und Resilienz in Bregenz stattfindet [7]. Darüber hinaus existieren insgesamt 45 NCPC, davon zehn in Europa (Bulgarien, Kroatien, Tschechische Republik, Ungarn, Republik Mazedonien, Montenegro, Rumänien, Russische Föderation, Serbien und Slowakei). Aufgabe dieser NCPC ist die technisch-wissenschaftliche und gesellschaftlich-politische Informationsvermittlung über nachhaltige Produktionsweisen. Darüber hinaus erfolgend transnationale Abstimmungen und Zusammenarbeit durch insgesamt sieben Teams aus den jeweiligen nationalen Regierungen, zu denen unter anderem Arbeitsgruppen zu nachhaltigen Produkten (International Task Force on Sustainable Products), zu nachhaltigem Bauen, Tourismus oder öffentlichem Beschaffungswesen gehören.

Im Juni 2012 findet in Rio de Janeiro die Rio+20 United Nations Conference on Sustainable Development statt, die die 1992 begonnenen Prozesse und Vereinbarungen zur Umsetzung des Nachhaltigkeitsgedankens aus der UN Conference on Environment and Development (UNCED) in Rio de Janeiro und des World Summit on Sustainable Development (WSSD) 2002 in Johannesburg fortführen soll. Konkret sollen die Entwicklung einer *grüneren* Wirtschaft, der Kampf gegen die Armut sowie der institutionelle Rahmen der nachhaltigen Entwicklung Themen dieser Veranstaltung sein [20].

4.2 EU-Wachstumsstrategie und Fahrplan zur Ressourcenschonung

Die Europäische Union nimmt in ihrer Wachstums-Strategie Europe 2020 [17] den auf UN-Ebene vereinbarten Nachhaltigkeitsansatz auf. So zielt die Entwicklung für 2010 bis 2020 auf die Handlungsfelder intelligentes Wachstum, nachhaltiges Wachstum, integratives Wachstum und wirtschaftspolitische Steuerung (smart, sustainable and inclusive growth and economic governance). Daraus werden für den Bereich Nachhaltiges Wachstum zwei Leitinitiativen abgeleitet, zum einen Ressourcenschonendes Europa, zum anderen Industriepolitik im Zeitalter der Globalisierung.

Die Leitinitiative Resource Efficient Europe/Ressourceneffizientes Europa deckt die Bereiche Energieeffizienz, Agrarpolitik, biologische Vielfalt, Rohstoffmärkte/-sicherung, Kreislaufwirtschaft, Anpassung an den Klimawandel sowie die Wasserpolitik ab. Wichtige Teilziele sind hier zum einen eine CO₂-Emissionsreduzierung um 80–95 % bis 2050 und vor allem ein Abkoppeln des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch. Konkret wurde im September 2011 ein Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa veröffentlicht [8], dem folgende Vision zugrunde liegt:

„Bis 2050 ist die Wirtschaft der Europäischen Union auf eine Weise gewachsen, die die Ressourcenknappheit und die Grenzen des Planeten respektiert, und trägt so zu einer weltweiten wirtschaftlichen Umgestaltung bei. Unsere Wirtschaft ist wettbewerbsfähig und integrativ und bietet einen hohen Lebensstandard bei deutlich geringerer Umweltbelastung. Alle Ressourcen werden nachhaltig bewirtschaftet, von Rohstoffen bis hin zu Energie, Wasser, Luft, Land und Böden. Die Etappenziele des Klimaschutzes wurden erreicht, während die Biodiversität und die Ökosystemleistungen, die sie unterstützt, geschützt und wertbestimmt werden und im Wesentlichen wiederhergestellt sind.“ [8]

Dazu sollen u. a. ressourcenschonende Wirtschaftsweisen, Produktionsverfahren und Konsummuster entwickelt werden. Daneben treten die Kreislaufwirtschaft zur Rückgewinnung von Ressourcen aus Abfällen sowie die Internalisierung externer Kosten. Die Ansätze des EU-Fahrplans werden auf der Rio+20-Konferenz durch die EU eingebracht, um dort die weltweite Entwicklung zu einer umwelt-

freundlichen Wirtschaft und einer effizienteren Verwendung der natürlichen Ressourcen voranzutreiben.

4.3 Deutschland: Nachhaltigkeitsstrategie und Programm zur Ressourceneffizienz

Die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung wurde im Jahr des Johannesburg-Gipfels 2002 beschlossen [4]. Aktuell liegt derzeit im Entwurfsstadium das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) der Bundesregierung vor [1]. Dieses Programm zum Schutz natürlicher Ressourcen in einer ökologisch-sozialen Marktwirtschaft zielt auf die Erhöhung der Ressourceneffizienz bei gleichzeitiger absoluter Absenkung des Ressourceneinsatzes und soll damit tatsächlich zu einer absoluten Verringerung des Ressourcenverbrauchs beitragen. Es soll die Konsistenz der verschiedenen Ansätze und Strategien der Nachhaltigkeitspolitik der Bundesregierung sicherstellen. Konkret zu nennen sind hier vor allem:

- die Rohstoffstrategie der Bundesregierung von 2010 zur Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen [9] sowie
- der Aktionsplan der Bundesregierung zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe [10].
- das Programm ProgRes, das auf der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie aufbaut. Es berücksichtigt zunächst abiotische, nichtenergetische Rohstoffe und die stoffliche Nutzung biotischer Rohstoffe; Rohstoffe zur Energieerzeugung bleiben zunächst unberücksichtigt (s. Abb. 3).

Die in den 1990er Jahren intensiv geführte Diskussion um die Erhöhung der Ressourceneffizienz um Faktoren (Faktor 4, Faktor 10) [11] fand 2002 Eingang in die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung. Sie formulierte das Ziel, innerhalb des Zeitraumes von 1994 bis 2020 die Ressourcenproduktivität in Deutschland zu verdoppeln. Für das Jahr 2009 wurde eine Erhöhung der Ressourcenproduktivität von 46,79 % gegenüber 1994 festgestellt [12]. Diese Entwicklung reicht nach heutiger Einschätzung nicht aus, um das Effizienzziel 2020 für Deutschland zu erreichen. Hinzu kommt, dass durch die Einfuhr von Vorprodukten und Halbzeugen, z. B. anstelle von Rohstoffen wie Erzen, dieser Indikator die tatsächliche Situation verzerrt darstellt. Der Anteil importierter Güter am Primärmaterial Einsatz stieg von 26 % (1994) auf 37 % (2008). Eine rechnerische Rückführung der Vorprodukte auf Rohstoffe (Rohstoffäquivalentwerte) für den Zeitraum von 2000 bis 2005 zeigte, dass die eingeführten Güter etwa mit einem Faktor 5 gewichtet werden müssten, um die tatsächlich, jedoch nicht in Deutschland verwendeten Massen zu beschreiben [13]. Unter Berücksichtigung dieses Ansatzes ist das Erreichen der Zielvorgabe für 2020 als illusorisch zu bewerten. Umso wichtiger erscheint eine Strategie, um die Netto-Umweltbelastung des wirtschaftlich-technischen Handelns in Deutschland zu begrenzen.

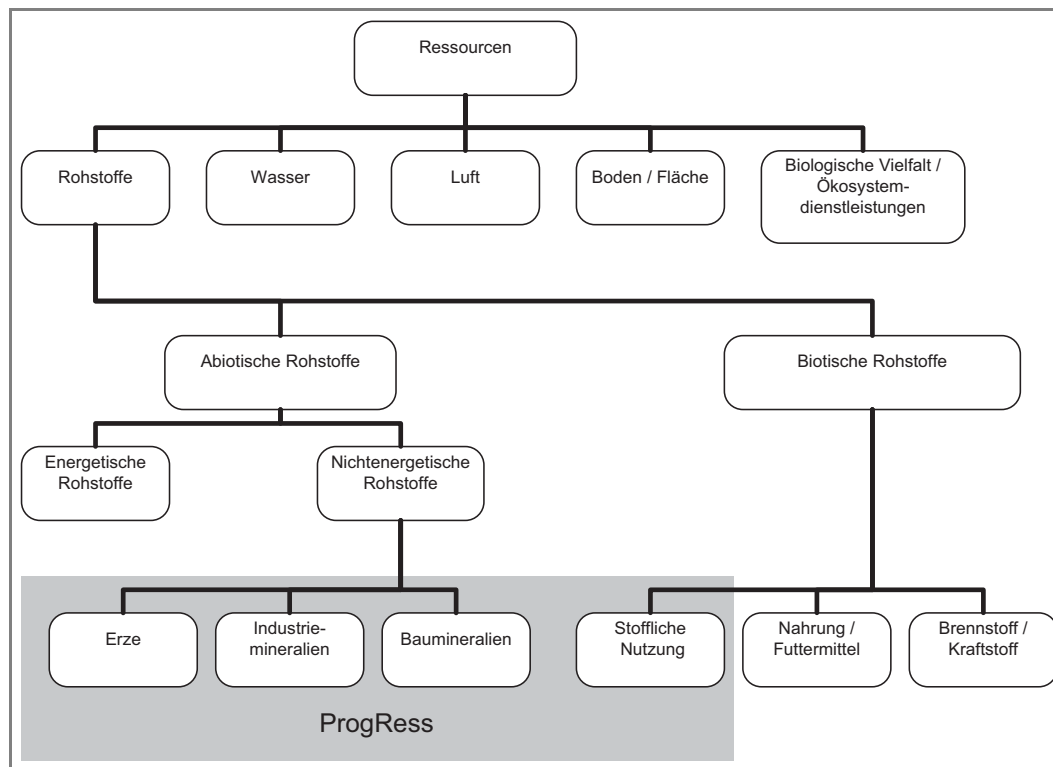


Abbildung 3. Ressourcen, die durch das Programm ProgRes adressiert werden [1].

Konkrete Aktivitäten der einzelnen Ministerien zur Steigerung der Ressourceneffizienz umfassen unter anderem die Gründung des VDI-Zentrums für Ressourceneffizienz (VDI-ZRE) durch das BMU, der Deutschen Materialeffizienzagentur (Demea) durch das BMWi, die Gründung des Helmholtz-Zentrums Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) durch das BMBF sowie die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) des BMELV. Auch wurden konkrete politische Arbeitsziele zur nachhaltigen Entwicklung für 2012/2013 auf Staatssekretärebene unter anderem für die Bereiche Ressourceneffizienz und nachhaltige Unternehmensführung vereinbart.

Der Rat für nachhaltige Entwicklung, der die Bundesregierung berät (www.nachhaltigkeitsrat.de), empfiehlt eine Neufassung der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung für das Jahr 2012 mit einem Planungshorizont bis 2030 und weitergehenden Vorstellungen zur Umsetzung der Nachhaltigkeit bis 2050.

Für den Forschungsbereich wurden 2009 die Ziele der Nachhaltigkeitsstrategie in dem Förderprogramm FONA umgesetzt [14], auf dessen Basis zurzeit die zweite, mit etwa 30 Mio. € geförderte Ausschreibungsrunde für Forschungsprojekte zur Ressourceneffizienz beginnt. Weitere Ausschreibungen in diesem Themenfeld werden für die nähere Zukunft bereits erwartet.

5 Einschätzung der Wirtschaft

Bei einer Befragung mittelständischer Unternehmen 2011 in Deutschland wurde festgestellt, dass etwa sich gut die Hälfte der befragten Mittelständler (52%) durch die Entwicklung an den Energie- und Rohstoffmärkten dazu gezwungen sehen, innovativ zu sein. Gleichzeitig wird aber auch von knapp der Hälfte der Befragten (45%) geäußert, dass diese Situation zusätzliche Märkte und Absatzmöglichkeiten schafft. Allerdings werden die Geschäfte zukünftig auch als unsicherer und schwerer kalkulierbar eingeschätzt (51%) und eine dauerhafte Belastung der Profitabilität erwartet (50%). In über 60% der befragten Unternehmen überstiegen die Rohstoffkosten 10% aller Kosten, so dass die Rohstoffkosten sich massiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Als wichtigste Gegenmaßnahmen wurden durch die Unternehmen die Weitergabe der gestiegenen Kosten an die Kunden (64%) sowie beschaffungsseitige Änderungen (71%) wie z. B. Wechsel von Lieferanten genannt. Hingegen werden Überlegungen zur Ressourceneffizienz-Steigerungen nur von 60% der Befragten genannt. Konkret steigern lediglich 35% die Effizienz beim Rohstoffgebrauch, 31% führen Recyclingmaßnahmen durch und 23% verbessern die Energieeffizienz, so dass hier offensichtlich noch ein großes Umsetzungspotenzial besteht [15].

6 Einschätzung der UNEP: Green Economy Report

Der Green Economy Report des UN Environment Programme zeigt die Chancen der weltweiten Umsetzung der ökologischen Marktwirtschaft: Eine Investition von 2 % des weltweiten BIP in Schlüsselsektoren, wie Landwirtschaft, Bauwesen, Energieversorgung, Fischerei, Forstwirtschaft, Industrie, Tourismus, Transportwesen, Abfall- und Wasserwirtschaft, bis 2050 kann den Übergang zu einer ressourcen- und klimaschonenden Marktwirtschaft ebnen. Derzeit ist dies eine Summe von $1,3 \cdot 10^{12}$ US-\$ pro Jahr. Diese Investition steht nach Aussage des Berichts nicht im Widerspruch zum Wachstum der Wirtschaft, sondern wird vielmehr Arbeitsplätze und wirtschaftlichen Fortschritt bei gleichzeitig geringerer Belastung der Ökosysteme und natürlichen Ressourcen ermöglichen. Darüber hinaus werden diesem ökologisch orientierten Modell für die kommenden fünf bis zehn Jahre höhere Wachstumsraten als der konventionellen Wirtschaftsweise vorhergesagt. Auch die Umweltauswirkungen würden so geringer: Das Verhältnis von ökologischem Fußabdruck zur Biokapazität ginge bis 2050 von einem Wert von 1,5 heute auf unter 1,2 zurück – eine nachhaltige Wirtschaft weist den Wert 1,0 auf. Für die Arbeitsplätze, die im Bereich der Fischerei und anderen, nicht nachhaltigen Sektoren der konventionellen (braunen) Wirtschaft wegfallen würden, werden neue Arbeitsplätze der grünen Wirtschaft in der Landwirtschaft, dem Bauwesen, Energieversorgung, Forstwirtschaft und Transportwesen entstehen. Eine wichtige Rolle bei der Umgestaltung spielt die Umlenkung von Subventionen und staatlichen Investitionen in nachweislich nachhaltige Wirtschaftsweisen sowie deren Unterstützung durch steuerliche Systeme, Anreize oder handelbare Zertifikate. Erste Ansätze einer gezielten Förderung der ökologischen Marktwirtschaft sind mit Blick auf die umweltfreundlichen Investitionen festzustellen. So werden z. B. für 2010 Investitionen von 180 bis 200 Mrd. US-\$ für umweltfreundliche Energien erwartet, nachdem 2009 lediglich 163 Mrd. US-\$ investiert wurden [16].

7 Forschung für die Märkte von Übermorgen: Molecular Sorting

Die Ansätze der Steigerung der Ressourceneffizienz lassen sich grob einteilen in:

- 1) Veränderung der Produktionstechnik (z. B. Prozesskettenverkürzung, Verbesserung von Zuschnitten),
- 2) Veränderung der Produktkonstruktion (z. B. Leichtbau, Miniaturisierung),
- 3) Veränderung der Materialauswahl (z. B. Materialsubstitution, Einsatz von Sekundärwerkstoffen).

Einer der wichtigsten Aspekte bei der Veränderung der Materialauswahl ist der Einsatz von Sekundärrohstoffen (Materialrecycling). Bei der stofflichen Verwertung von Produkten oder Abfällen lassen sich jedoch zwei divergierende

Trends feststellen: Auf der einen Seite werden die Produkte und Stoffströme heterogener und weisen geringere absolute Massen auf. Hier wirken sich die Prinzipien der Materialeinsparung z. B. durch Miniaturisierung von Bauteilen aus. Auf der anderen Seite steigen die Anforderungen an die Sekundärrohstoffe bzw. allgemein an die Stoffströme, die zur Herstellung einzusetzen sind. Dies ist zum Teil eine Folge der technischen Anforderungen, z. B. im Leichtbaubereich, zum anderen auch die Konsequenz aus rechtlichen Anforderungen wie dem Chemikalienrecht oder dem europäischen REACH-Prozess. Im Ergebnis werden die Abfallströme, die zur Verwertung anstehen, heterogener und schwerer stofflich zu verwerten. Gleichzeitig lassen sich typische Sekundärmaterialien zunehmend schlechter erneut im Produktionsprozess einsetzen, da sie den steigenden Anforderungen nicht mehr genügen. Ein aktuelles Beispiel hierfür ist der Einsatz von Recyclingpapier und -karton für Lebensmittelverpackungen, der durch die Restgehalte an Mineralölen aus Druckfarben und anderen Verunreinigungen aus Vorsorgegründen derzeit stark in Frage gestellt wird. Im Ergebnis geraten die heute bekannten und bewährten Aufbereitungs- und Recyclingprozesse an ihre chemisch-physikalischen Grenzen.

Diesen als Bulk Sorting zu bezeichnenden Technologien soll zukünftig mit dem Molecular Sorting ein innovativer Ansatz entgegengesetzt werden. Dieser Ansatz wird derzeit innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft mit einem mehrjährigen Multi-Partner-Forschungsvorhaben entwickelt. Ziel des Vorhabens ist es, durch eine Kombination von Identifikations- und Analysenverfahren, Aufbereitungsprozessen für Sekundär-Stoffströme und Modifikationen der Herstellungsverfahren hochwertige Stoffströme zu schließen. So kann die Wieder- und Weiterverwertung von Werkstoffen durch Trennprozesse bis auf molekulare Ebene (Molecular Sorting) nach der Herstellung bzw. Nutzung ermöglicht werden.

Der Grundansatz des Vorhabens liegt in der beispielhaften Untersuchung von volkswirtschaftlich relevanten Stoffströmen aus den Bereichen Mineralien (silikatische Rohstoffe), Metalle sowie biogener (Holz) und anderer organischer Rohstoffe (Polymere), die durch eine Kombination von analytischen und verfahrenstechnischen Ansätzen so aufbereitet werden sollen, dass ein erneuter stofflicher Einsatz in gleicher Weise wie der Einsatz von Primärrohstoffen möglich wird.

Dem Vorhaben liegt ein erweiterter Begriff des Urban Mining zugrunde, der neben der Rohstoffrückgewinnung u. a. aus Halden, Abfalldeponien oder bestehenden Infrastrukturen ebenfalls anthropogene feste, flüssige und gasförmige Stoffströme, wie z. B. Abfallströme (Zielwerkstoffe: Holz, Metalle, Polymere, Mineralien) oder Abwasserströme (Zielwerkstoffe: Metalle, Mineralien), adressiert. Das Vorhaben stellt Methoden und Technologien bereit, die für Urban-Mining-Ansätze nutzbar sind. Beispielhaft wird die Anwendbarkeit in sechs Demonstratorprojekten gezeigt. Der Schwerpunkt liegt jedoch auf der Methodenentwicklung (Methodenbaukasten), die später für beliebige Stoffströme

anwendbar sind. Die Fokussierung des Forschungs- und Entwicklungsansatzes auf die Methoden begründet sich in der großen Dynamik der Werkstoffentwicklung in den Märkten von morgen und übermorgen. Beispielhaft kann die Batterieentwicklung für die Elektromobilität genannt werden, deren stoffliche Zusammensetzung hinsichtlich der Wertmetalle Lithium und Cobalt einer so starken Abnahme unterworfen ist, dass bereits heute noch in Entwicklung befindliche Recyclingansätze schon als veraltet und nicht zukunftsfähig bewertet werden können [18]. Daher wurde kein produkt-, sondern ein methodenorientierter Forschungsansatz gewählt. Die Methoden werden an den Stoffströmen (Demonstratoren) Altholz, eisenfreiem Glas, Verbundwerkstoffen, Verbrennungsschlacken, Heißgasen sowie metallhaltigen Abwässern demonstriert.

8 Zusammenfassung

Dem Thema Ressourceneffizienz wird zurzeit auf allen nationalen und internationalen Ebenen von der UN über die EU bis hin zu den deutschen Bundesministerien eine hohe Bedeutung zugemessen. Es steht außer Frage, dass Ansätze zur Ressourceneffizienz identifiziert, entwickelt und umgesetzt werden müssen, um eine nachhaltige Entwicklung zu ermöglichen. Die Ressourceneffizienz spielt wie die mit ihr eng verzahnte Energieeffizienz eine Schlüsselrolle in der Umsetzung einer ökologischen Marktwirtschaft. Mit Blick auf die Begrenztheit der natürlichen Ressourcen, Gerechtigkeitsaspekte und die Entwicklungschancen der Wirtschaft erscheint ein Pfadwechsel von der derzeitigen Wirtschaftsweise hin zu einer ökologischen Marktwirtschaft zwingend geboten. Aktuelle Studien zeigen darüber hinaus, dass dieser Ansatz größere Entwicklungspotenziale als die konventionelle Wirtschaftsform aufweist. Die Ansätze der ökologischen Marktwirtschaft müssen bereits heute auch in konkrete technologische Entwicklungen umgesetzt werden, um innerhalb der kommenden Jahre tatsächlich ökologisch wirtschaften und produzieren zu können. Dafür steht beispielhaft das Vorhaben Molecular Sorting der Fraunhofer-Gesellschaft, in dem zur Adressierung der Märkte von übermorgen innovative Recyclingmethoden entwickelt und beispielhaft angewandt werden, um Rohstoffe aus Abfällen zurückzugewinnen, die Primärrohstoffe substituieren können.

Die Autoren danken Herrn Christian Stier und Frau Birgit Gartner aus dem Fraunhofer ICT für die Unterstützung bei der Erstellung dieses Beitrags.



Jörg Woidasky studierte Technischen Umweltschutz an der Technischen Universität Berlin und promovierte an der Universität Stuttgart im Bereich Maschinenbau zur Kreislaufführung von Kunststoffkraftstoffbehältern. Er arbeitet im Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie in Pfinztal bei Karlsruhe als stellvertretender Leiter des Bereichs Umwelt-Engineering und leitet gleichzeitig die Gruppe Kreislauf- und Abfallwirtschaft. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen im Bereich der Ressourceneffizienz und umweltgerechten Produkt- und Prozessgestaltung.



Thomas Hirth studierte Chemie an der Technischen Universität Karlsruhe und promovierte in Physikalischer Chemie. Seit 1992 ist er bei der Fraunhofer-Gesellschaft, zunächst als Bereichsleiter Umwelt-Engineering am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie. Seit 2007 leitet er das Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Stuttgart, und seit April 2008 auch das Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik an der Universität Stuttgart. Prof. Hirth ist u. a. als Mitglied im BioÖkonomieRat der Bundesregierung, als Vorstandsmitglied von ProcessNet und als Sprecher des Fraunhofer-Netzwerks Nachhaltigkeit aktiv.

Literatur

- [1] Entwurf des BMU für ein Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess), Entwurf V 3.0 (Stand 11.10.2011), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin 2011.
- [2] H. Alwast, in *Recycling und Rohstoffe* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, D. Goldmann), Vol. 3, TK-Verlag, Neuruppin 2010.
- [3] M. Berger, M. Finkbeiner, in *Recycling und Rohstoffe* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, D. Goldmann), Vol. 1, TK-Verlag, Neuruppin 2008.
- [4] *Perspektiven für Deutschland, Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung*, Bundesregierung Deutschland, Berlin 2002.
- [5] Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von Richtlinien zur Fördermaßnahme „r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin 2010. www.bmbf.de/foerderungen/15444.php (Stand 26.11.2011)
- [6] F. Adler, U. Schachtschneider, *Green New Deal, Suffizienz oder Ökosozialismus? – Konzepte für gesellschaftliche Wege aus der Ökokrise*, Oekom Verlag, München 2010.
- [7] *15th European Roundtable on Sustainable Consumption and Production*, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien. www.fabrikderzukunft.at/results.html/id6584 (Stand 26.11.2011)

- [8] *Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa*, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, 571, Brüssel 2011.
- [9] *Rohstoffstrategie der Bundesregierung*, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin, Oktober 2010.
- [10] *Aktionsplan der Bundesregierung zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe*, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Berlin, August 2009.
- [11] E. von Weizsäcker, A. Lovins, H. Lovins, *Faktor vier: Doppelter Wohlstand – halbiertes Naturverbrauch. Der neue Bericht an den Club of Rome*, Droemer Knaur München 1995.
- [12] *Indikatoren zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland*, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. www-genesis.destatis.de/genesis/online/logon?language=de&sequenz=tabelle&ergebnis&selectionname=91111-0001 (Stand 26.11.2011)
- [13] *Nachhaltige Entwicklung in Deutschland, Indikatorenbericht 2010*, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Juli 2010.
- [14] *Forschung für nachhaltige Entwicklungen, Rahmenprogramm des BMBF*, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin 2009.
- [15] *Rohstoffe und Energie – Risiken umkämpfter Ressourcen*, Commerzbank AG, Frankfurt/Main 2011.
- [16] *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication – A Synthesis for Policy Makers*, United Nations Environment Programme, Nairobi, November 2011. www.unep.org/greeneconomy/Portals/88/documents/ger/GER_synthesis_en.pdf (Stand 26.11.2011)
- [17] http://ec.europa.eu/europe2020/index_en.htm (Stand 26.11.2011)
- [18] R. Weyhe (Fa. AccuRec), persönliche Mitteilung, 2010.
- [19] *Glossar zum Ressourcenschutz*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2012. www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf1/4242.pdf
- [20] Rat für nachhaltige Entwicklung, Berlin. www.nachhaltigkeitsrat.de/index.php?id=5168 (Stand 26.11.2011)