

Ersatz von (nicht-erneuerbaren) Ressourcen

-

2. Regel der Enquete-Kommission



Betreuer: Prof. Anton Lerf
Lehrstuhl für Technische Physik
Technische Universität München

Studiengang: TUM-BWL Master

Verfasst von:

Stephanie Kramer Auf dem Hochrain 31 D-83624 Otterfing Tel.: +49 173/4191712 Matrikelnummer: 03610530	Manfred Thurm Behamstraße 6 D-80687 München Tel.: +49 151/23027681 Matrikelnummer: 03602987
--	--

Eingereicht am 27. September 2013

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis.....	II
Abkürzungsverzeichnis	II
1 Einleitung.....	1
2 Die 2. Regel der Enquete-Kommission	1
3 Definitionen	2
3.1 Erneuerbare Ressourcen	2
3.2 Nicht-erneuerbare Ressourcen.....	3
3.3 Substitution.....	3
3.4 Effektivität, Effizienz und Produktivität	3
4 Wirtschaftswissenschaftliche Annäherung	4
4.1 Betriebswirtschaftliche Modelle.....	5
4.2 Volkswirtschaftliche Modelle.....	6
5 Strategien zur Befolgung der 2. Regel.....	8
5.1 Produktivitätserhöhung.....	8
5.2 Recycling	9
5.3 Substitution von Ressourcen	9
5.4 Rebound-Effekte.....	11
6 Beispiele und Beurteilung von Substituten.....	11
6.1 Biopolymerbeschichtungen	11
6.2 Carbonfasern als Stahlersatz in Beton	13
6.3 Biologische Katalysatoren	14
7 Schlussbetrachtungen.....	16
Literaturverzeichnis.....	18

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Maximal nachhaltig erzielbare Ernte 6

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Zusammenhang von Verbrauch und Kapitalstock erneuerbarer Ressourcen..... 5

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
K	Kapital
MSY	maximal nachhaltig erzielbare Ernte
p	Zinssatz, Regenerationsrate
PLA	Polymilchsäuren (englisch: polylactic acid)
PHBV	Poly-(3-hydroxybuttersäure-co-3-hydroxyvaleriansäure)
V	Verbrauch
Z	Zins

1 Einleitung

„Man kann nicht in die Zukunft schauen, aber man kann den Grund für etwas Zukünftiges legen – denn Zukunft kann man bauen“

Antoine de Saint-Exupéry

In der heutigen Zeit werden Rohstoffe aufgrund der wachsenden Weltbevölkerung und der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten immer knapper.¹ Deshalb ist es wichtig, sich mit Alternativen für Rohstoffe auseinander zu setzen und Möglichkeiten zu finden, wie diese ersetzt werden können, für den Fall dass die Verknappung weiter voranschreitet. Hierzu veröffentlichte die Enquete-Kommission *„Schutz des Menschen und der Umwelt“* am 26. Juni 1998 ihren Abschlussbericht mit dem Thema Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung. In diesem Bericht erstellt die Kommission ein Leitbild für eine nachhaltige Entwicklung sowie eine „ökologisch, ökonomisch und sozial gleichermaßen vertretbare Zukunftsperspektive“² im Bereich Umwelt und formuliert vier grundlegende Regeln bezüglich des Managements von Stoffströmen. Vor allem die zweite Regel zum *Ersatz nicht-erneuerbarer Ressourcen* veranschaulicht ein Problem, für das es bisher nur in Teilbereichen Lösungen gibt. Ziel dieser Arbeit ist es, die zweite Regel der Enquete-Kommission zu analysieren und anhand von Anwendungsbeispielen zu zeigen, welche Schwierigkeiten das Befolgen der 2. Regel bereiten kann.

Die Arbeit ist daher wie folgt aufgebaut: Im folgenden Kapitel wird die 2. Regel der Enquete-Kommission vorgestellt. Daraufhin werden im dritten Kapitel wichtige Begriffe definiert und erläutert. Das vierte Kapitel beschreibt wirtschaftswissenschaftliche Modelle als Annäherung an die 2. Regel der Enquete-Kommission. Im fünften Kapitel werden daraufhin verschiedene Strategien zur Befolgung dieser Regel analysiert. Kapitel sechs gibt einen Überblick über Beispiele zur Ressourcensubstitution sowie eine Einschätzung der Umsetzbarkeit eines solchen Ersatzes. Die Arbeit schließt mit einem Fazit und einer kurzen Zusammenfassung.

2 Die 2. Regel der Enquete-Kommission

Innerhalb ihres Abschlussberichtes von 1998 hat die Enquete-Kommission vier Regeln zum Management von Stoffströmen, also den aktiven und bewussten Umgang mit Stoffen für eine nachhaltige Entwicklung im Bereich Umwelt, formuliert.³

¹ Vgl. Rohstoffstrategie Bayern (2013).

² Caspers-Merk (1998), S. 8.

³ Vgl. Lexikon der Nachhaltigkeit (2012).

Die 2. Regel, mit der sich diese Arbeit beschäftigt, lautet wie folgt:

„Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht-erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.“⁴

Vereinfacht bedeutet der erste Halbsatz, dass die Gesellschaft nur dann nicht-erneuerbare Ressourcen nutzen soll, wenn gleichzeitig erneuerbare Stoffe als Ersatz geschaffen werden, die die gleichen Aufgaben bzw. Funktionen erfüllen oder dem gleichen Zweck dienen, ohne dass durch eine solche Substitution ein Nachteil entsteht. Der zweite Halbsatz erlaubt eine Nutzung von nicht-erneuerbaren Ressourcen dann, wenn diese wie auch erneuerbare Stoffe mit höherer Produktivität (Verhältnis Output zu Input, mehr hierzu in Kapitel 3.4) genutzt werden können.

3 Definitionen

Für ein besseres Verständnis sollen in diesem Abschnitt zunächst wichtige, in dieser Arbeit wiederkehrende, Begriffe definiert und kurz erläutert werden. Dazu gehören vor allem die Begriffe erneuerbare und nicht-erneuerbare Ressourcen, Substitution, Effektivität, Effizienz und Produktivität.

3.1 Erneuerbare Ressourcen

Erneuerbare Ressourcen sind natürliche Ressourcen, die sich in dem für die menschliche Planung relevanten Zeitraum regenerieren. Das heißt der Gesamtbestand dieser Ressourcen wächst innerhalb relativ kurzer Zeit (Tage, Monate oder wenige Jahre).⁵

Bei den erneuerbaren Ressourcen wird zwischen Beständen mit und ohne Vorratsminderung unterschieden. Die Nutzung einer Einheit einer erneuerbaren Ressource mit Vorratsminderung verringert den Ressourcenbestand um eine Einheit. Eine Abnahme der Vorräte an Ressourcen folgt daher z.B. auf eine übermäßige Ausbeutung wie es bei Böden, Grundwasser und lebenden Ressourcen wie Fischen, Wäldern und Wildpflanzen der Fall sein kann. Keine Vorratsminderung liegt im Bereich von direkter Sonnenenergie, Gezeiten und Wind vor. Dort verringert der Verbrauch einer Einheit der Ressource den Ressourcenbestand nicht.

Das wiederum heißt allerdings auch, dass selbst erneuerbare Ressourcen im Falle einer möglichen Vorratsminderung erschöpflich werden können. Genau dann, wenn sie zu stark ausgebeutet werden.

⁴ Caspers-Merk (1998), S. 25.

⁵ Vgl. Endres (2004).

3.2 Nicht-erneuerbare Ressourcen

Nicht-erneuerbare Ressourcen sind Stoffe, deren Entstehung sich nicht in menschlichen, sondern in geologischen oder astronomischen Zeiträumen vollzieht.⁶ Sie entstehen auf eine Art und Weise, die sich über mehrere Jahrhunderte erstreckt. Gleichzeitig sind nicht-erneuerbare Ressourcen Stoffe, deren Bestand durch die Verwendung einer Einheit um eine Einheit sinkt. Durch die lange Dauer ihrer Entstehung werden die Vorräte nicht-erneuerbarer Ressourcen durch die rivalisierende Verwendung dezimiert und sie sind daher erschöpflich.

Bei dieser Art von Ressourcen wird unterschieden zwischen recyclebaren Materialien wie z.B. Mineralien und Metallen, sowie Stoffen, welche durch eine Verwertung zerstört bzw. vollständig abgebaut werden wie z.B. fossile Brennstoffe.⁷ Bei Letzteren muss deshalb auf die optimale (nachhaltige) Verbrauchsrate geachtet werden, damit diese Ressourcen nicht innerhalb kurzer Zeit vollständig erschöpft sind.

3.3 Substitution

Unter Substitution versteht man den Ersatz von einem möglicherweise kritischen bzw. endlichen Stoff X durch einen anderen Stoff Y (Substitut), dessen Umweltauswirkungen und Risiken im Normalfall geringer sind.⁸ Dabei ist es wichtig, dass das Substitut die gleichen funktionellen Eigenschaften besitzt wie Stoff X, um mindestens einen gleichwertigen Ersatz ohne Nachteile zu gewährleisten. In der Mikroökonomie werden Substitutionsgüter als solche Güter verstanden, die für den Konsumenten als gleichwertige Ersatzgüter gesehen werden, da sie dieselben oder sehr ähnliche Bedürfnisse stillen. Das ist genau dann gegeben, wenn die beiden Güter einen ähnlichen Preis, ähnliche Qualität sowie eine ähnliche Leistung erfüllen.⁹ Ein einfaches Beispiel für Substitute wären Salzbrezeln und Salzstangen.

Eine Substitution in der Umwelttechnik innerhalb der Produktentwicklung kann in folgende Bereiche unterteilt werden: Ersatz von umweltschädlichen Einsatzstoffen, von Primär- durch Sekundärrohstoffen, Ersatz von einzelnen Prozesskomponenten bzw. des gesamten Produktionsprozesses und den Ersatz von einzelnen Produktkomponenten oder des kompletten Produktes.¹⁰

3.4 Effektivität, Effizienz und Produktivität

Um die Hintergründe verschiedener Prozessanalysen genau zu verstehen, ist es wichtig die Begriffe Effektivität, Effizienz und Produktivität unterscheiden zu können.

⁶ Vgl. Endres (2004).

⁷ Vgl. Endres (2004).

⁸ Vgl. Rohstoffstrategie Bayern (2013).

⁹ Vgl. Pyndick/Rubinfels (2009).

¹⁰ Vgl. Rennings (2007).

Unter Effektivität wird die Wirksamkeit des Handelns oder einer Maßnahme verstanden, also das Ausmaß der Erreichung der angestrebten Ziele. Vereinfacht gesagt, bedeutet Effektivität, das Richtige tun.¹¹

Im Gegensatz dazu betrifft Effizienz die Art und Weise, wie man etwas tut, um diese Ziele zu erreichen. Man muss also die richtigen Dinge (Effektivität) auch richtig tun. Oft spricht man bei Effizienz auch von Wirtschaftlichkeit.¹² Möchte man also die vorgegebenen Ziele mit möglichst wenig Ressourceneinsatz erreichen, spricht man von wirtschaftlichem Handeln. „Effizienz wird dann erreicht, wenn bei geringerem bzw. gleichem Materialeinsatz die gleiche bzw. größere Menge an Produkten hergestellt werden kann.“¹³ Unter Materialeffizienz versteht man vereinfacht auch „das Verhältnis der eingesetzten Rohstoffe bei der Herstellung eines Produkts im Verhältnis zu den im Endprodukt enthaltenen Materialien. Das Ziel der Materialeffizienz ist es also, möglichst wenig Materialverlust bei der Herstellung eines Produkts zu verursachen.“¹⁴

Bei dem Begriff Produktivität spricht man von dem (Mengen-)Verhältnis zwischen (Material-)Output und Input, also dem Verhältnis von Ausbringungsmenge zu den eingesetzten Mitteln.¹⁵

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Materialoutput}}{\text{Materialinput}}$$

Eine höhere Produktivität erreicht man ceteris paribus somit entweder durch eine Verringerung des Inputs oder durch eine höhere Ausbringungsmenge (z.B. bedingt durch technischen Fortschritt, ergiebigere Inputmaterialien etc.).

4 Wirtschaftswissenschaftliche Annäherung

Erneuerbare und nicht-erneuerbare Ressourcen sind grundlegende Bestandteile des Wirtschafts- und Versorgungssystems auf der Erde. Ohne sie würde die Energieversorgung und Warenproduktion zusammenbrechen. Daher ist es nur logisch, dass betriebs- und volkswirtschaftliche Modelle entwickelt werden, um Aussagen über die Verfügbarkeit von und die Versorgungssicherheit mit Ressourcen zu treffen.¹⁶

¹¹ Vgl. Angermeier (2013), vgl. Drucker (1963), vgl. Drucker (2002), vgl. Krems (2013).

¹² Vgl. Drucker (1963), vgl. Drucker (2002), vgl. Krems (2013).

¹³ Rohstoffstrategie Bayern (2013).

¹⁴ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2013).

¹⁵ Vgl. Steven (2013).

¹⁶ Vgl. André/Cerdá (2004).

4.1 Betriebswirtschaftliche Modelle

Ausgehend von der vereinfachten Annahme, die Erde sei ein Unternehmen und die verfügbaren Ressourcen sind Teil ihres Produktionssystems, kann folgende Analogie gebildet werden: Der Grundstock einer vorhandenen Ressource wird als **Kapital** K_0 betrachtet, die Menge jährlich nachwachsender Ressource als **Zins** $Z_0 = K_0 * p$. Dabei ist p der sogenannte **Zinssatz** und entspricht der **Regenerationsrate** der erneuerbaren Ressource.

Nicht-erneuerbare Ressourcen reproduzieren sich nicht selbst. Daher erwirtschaften sie auch keine Zinserträge ($p = 0$). Demnach senkt der **Verbrauch** einer nicht-erneuerbarer Ressourcen V_0 in Periode 0 zwangsläufig den Kapitalbestand von K_0 auf K_1 .

$$K_1 = K_0 - V_0$$

Erneuerbare Ressourcen hingegen erzeugen jedes Jahr eine gewisse Menge neuen Kapitals, die abhängig ist von der Menge des Ursprungskapitals K_0 . Je größer dabei die Regenerationsrate p ist, desto stärker wächst der Kapitalstock auf das Endkapital K_1 an.

$$K_1 = Zins + Kapital - Verbrauch = K_0 * p + K_0 - V_0 = K_0 * 1 + p - V_0$$

Ein nachhaltiges Wirtschaften mit einer bestimmten erneuerbaren Ressource ist also nur dann möglich, wenn ausschließlich der Zins genutzt wird. Wird mehr als der Zins verbraucht, so schrumpfen der Kapitalstock und damit auch die weiter zu erwartenden Zinsen. Wenn der Zins nicht vollständig aufgebraucht wird, dann steigt der Kapitalstock und in der nächsten Periode kann (meist) mehr Zins erwirtschaftet werden.

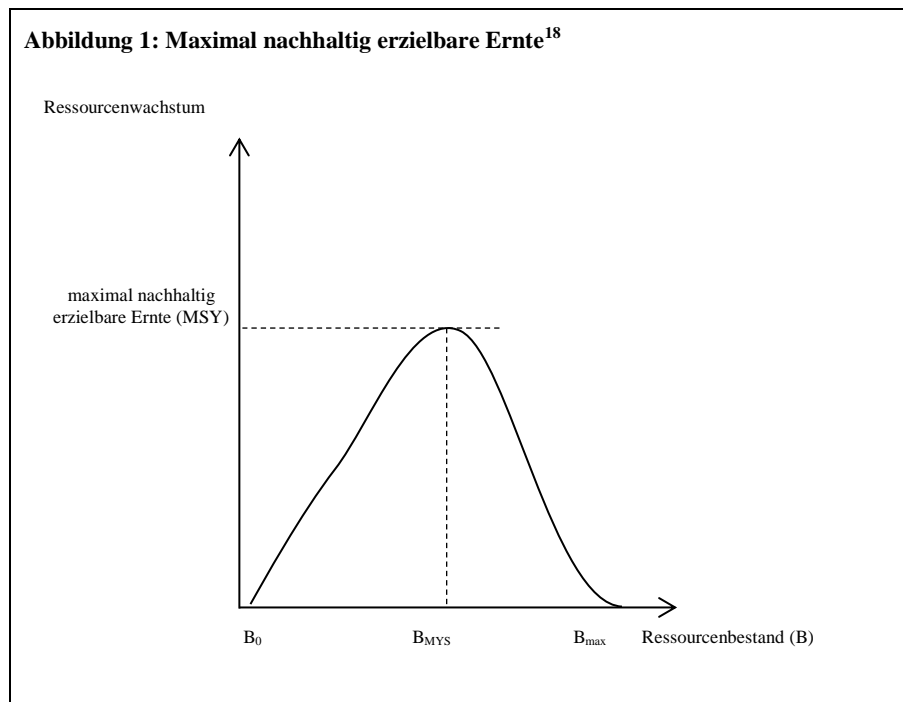
Tabelle 1 – Zusammenhang von Verbrauch und Kapitalstock erneuerbarer Ressourcen

$V_0 > K_0 * p$	Verbrauch größer als Zins, Kapitalstock schrumpft
$V_0 = K_0 * p$	Verbrauch gleich dem Zins, Kapitalstock bleibt stabil
$V_0 < K_0 * p$	Verbrauch kleiner als Zins, Kapitalstock wächst

Diese sehr allgemein gefassten Zusammenhänge werden beschränkt von der Theorie des abnehmenden Grenzwachstums:¹⁷ Jede Population hat eine maximale Größe, ab der sie nicht mehr weiter wächst. Ähnlich hat auch eine erneuerbare Ressource einen maximalen Ressourcenbestand, der gleichzusetzen ist mit einem maximalen Kapitalstock. Aus der zunächst steigenden und dann wieder fallenden Wachstumsrate bzw. Zinssatz ergibt sich, dass ein Optimum existiert, in dem der Verbrauch bei konstantem Ressourcenbestand bzw.

¹⁷ Vgl. Hergarten (2008).

Kapitalstock maximal ist. Dieser Verbrauch wird als maximal nachhaltig erzielbare Ernte (MSY) bezeichnet.



Dieses Modell vermag zwar sehr einleuchtend vermitteln, welche Ausbeutungsstrategie bei erneuerbaren Ressourcen anzuwenden sei. Nicht der maximale Ressourcenbestand ist optimal sondern der Bestand mit der größten Regenerationsrate. Allerdings werden hier die Kräfte von Märkten und die Eigennützigkeit der handelnden Akteure außen vor gelassen. Ebenso können nur schwer Aussagen darüber getroffen werden, wie sich Populationen entwickeln werden, da diese durchaus chaotischen Wachstumsraten unterliegen können.¹⁹ Wo also die MSY zu ernten sei, ist nicht einfach festzustellen.

4.2 Volkswirtschaftliche Modelle

Nimmt man einen umfassenderen Blickwinkel ein und betrachtet die Ressourcenknappheit aus einer volkswirtschaftlichen Sicht, so müssen Angebot, Nachfrage, Preise und durchaus auch Abbaukosten und Bevölkerungswachstum sowie technologischer Fortschritt berücksichtigt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Parameter haben viele Ökonomen versucht Modelle zu entwickeln, um den für Produzenten und Gesellschaft optimalen Ressourcenabbaupfad zu ermitteln. Ursprung dieser Überlegungen ist meist die Hotelling-Regel²⁰, nach der die Preise

¹⁸ In Anlehnung an Endres (2004).

¹⁹ Vgl. Gemmel (2010).

²⁰ Vgl. Hotelling, Harold (1931).

erschöpflicher, vor allem also nicht-erneuerbarer Ressourcen mit der Zeit steigen. John Hartwick entwickelte auf Basis der Arbeit Hotellings und anderer die so genannte Hartwick-Regel.²¹ Sie besagt, dass die nachhaltige Bewirtschaftung einer nicht-erneuerbaren Ressource nur dann möglich ist, wenn eine Generation nur das Nettosozialprodukt konsumiert und die Knappheitsrente (Preis abzüglich Grenzkosten) vollständig in Humankapital investiert. Diese Investitionen sollen dann den Produktionsausfall durch fehlende Rohstoffe ausgleichen. Somit kann jede Generation gleich viel konsumieren, da der Konsum nicht-erneuerbarer Ressourcen durch die aktuelle Bevölkerung gleichzeitig neue (im Idealfall erneuerbare) Ressourcen für die nächste Generation anhäuft.

Dies funktioniert allerdings nur, wenn man die generelle Gültigkeit der Cobb-Douglas-Funktion annimmt. Das heißt, dass Kapital (Ressourcen) und Arbeit (z.B. Wissen, Technologie) vollständig substituierbar sind. Somit unterstützt Hartwicks Konzept die Gedanken der schwachen Nachhaltigkeit.²²

Simone Valente konnte mit theoretischen Modellen nachweisen, dass es möglichst ist, eine Ressource nachhaltig zu bewirtschaften, solange die Rate des technologischen Fortschritts und die Regenerationsrate der Ressource in Summe ausreichend groß sind. Daher ist es ebenso möglich, eine nicht-erneuerbare Ressource nachhaltig zu bewirtschaften, solange der technologische Fortschritt nur schnell genug ist.²³

Auch wenn die beschriebenen und auch andere Modelle theoretisch vorhersagen, dass es möglich ist, nicht-erneuerbare Ressourcen nachhaltig zu bewirtschaften, da man sie nach und nach substituieren kann, werden bei diesen Gedankengängen viele Punkte nicht berücksichtigt.

Das Grundproblem all dieser Modelle ist die zumindest teilweise Annahme perfekter Märkte. In der Realität treten aber Ineffizienzen und Fehlallokationen aufgrund von Informationsasymmetrien und Transaktionskosten auf.²⁴ Vor allem die fehlende vollständige Internalisierung von externen Kosten des Ressourcenverbrauchs stört die Markteffizienz und den zugrundeliegenden Preismechanismus.²⁵ Zudem sorgen steigende Preise für ein Umdenken der Konsumenten zu weniger Nachfrage oder für eine Exploration neuen Angebotes. Ebenso muss die Substitutionselastizität größer als 1 sein, weil sonst Substitute die Produktivität enorm einschränken.²⁶

²¹ Vgl. Hartwick (1977).

²² Vgl. Döring (2004).

²³ Vgl. Valente (2005).

²⁴ Vgl. Rennings (2007).

²⁵ Vgl. Endres (2004).

²⁶ Vgl. Döring (2004).

Interessanterweise kann auf der anderen Seite nach Aussage dieser ökonomischen Modelle eine Substitution von erneuerbaren Ressourcen durch nicht-erneuerbare Ressourcen sinnvoll sein, wenn der Grundstock der erneuerbaren Ressource so klein ist, dass die maximal nachhaltig erzielbare Ernte nicht genutzt werden kann.²⁷ Solange also der Ressourcenbestand kleiner als B_{MSY} ist, können nach diesen Modellen nicht-erneuerbare Ressourcen genutzt werden, um den Ressourcenbestand zu erhöhen, um anschließend MSY zu ernten.

5 Strategien zur Befolgung der 2. Regel

Die 2. Regel der Enquete-Kommission fordert, dass anstatt nicht-erneuerbarer Ressourcen „*physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen*“ genutzt oder die Produktivität erhöht wird. Das fünfte Kapitel dieser Arbeit beschäftigt sich mit Strategien, wie diese Anforderungen erfüllt werden können. Dazu wird zunächst auf die Erhöhung der Produktivität eingegangen und mit einem Beispiel dafür, dem Recycling, fortgefahren. Anschließend wird erläutert, welche Möglichkeiten es gibt, nicht-erneuerbare Ressourcen durch erneuerbare Ressourcen zu substituieren und dies an Beispielen ausgeführt. Das Kapitel schließt mit einer kurzen Ausführung zu Rebound-Effekten.

5.1 Produktivitätserhöhung

Wie bereits in Kapitel 3.4 beschrieben wurde, arbeiten produzierende Unternehmen effizient. Eine Produktivitätserhöhung impliziert nach folgender Formel also genau die Tatsache, dass Unternehmen effizient produzieren:

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Materialoutput}}{\text{Materialinput}}$$

Die Produktivität, also das Ergebnis dieser Formel, steigt genau dann, wenn der gleiche Output mit weniger Input erreicht wird oder aber ein höherer Output bei der gleichen Menge an Input produziert werden kann.

Eine Steigerung der Produktivität kann durch verschiedenste Faktoren bedingt werden. Da diese so vielfältig sind²⁸, sollen hier nur die beiden offensichtlichsten Möglichkeiten zur Produktivitätssteigerung erwähnt werden.

Erstens ist es möglich, dass neue Stoffe als Substitute gefunden werden, die in ihrer Art als Input ergiebiger sind und deshalb nicht mehr in so großen Mengen wie zuvor gebraucht werden. Hier schließt sich der Kreis zum Thema Substitution. Zweitens kann der technische

²⁷ Vgl. André/Cerdá (2004).

²⁸ Vgl. Pankus Team (2005), vgl. Schlick (2006).

Fortschritt bessere Maschinen hervorbringen, die wiederum zu weniger Ausschuss führen. Damit erreicht man mit dem selben Input mehr Output.

Nichtsdestotrotz ist es oftmals sehr kompliziert, weitere Produktivitätserhöhungen zu erreichen. Welche Maßnahmen durchgeführt werden sollten, lässt sich meist nur durch intensive, langwierige und kostspielige Analysen herausfinden.²⁹

5.2 Recycling

Eine Möglichkeit die Produktivität von nicht-erneuerbaren Ressourcen zu verbessern, ist, diese zu recyceln. So wird der Output erhöht, während der Ressourceninput konstant bleibt – zumindest in Bezug auf jene nicht-erneuerbare Ressource. Daher wäre Recycling von nicht-erneuerbaren Rohstoffen eine Möglichkeit die 2. Regel zu befolgen. Es darf aber nicht vergessen werden, dass Recyclingprozesse selbst wieder (Primär-)Energie verbrauchen³⁰, auch wenn diese meist geringer ist, als jene des Ursprungsprozesses. Dies ist aber von Stoff zu Stoff unterschiedlich.³¹ Durch diese Wiedergewinnungskosten sinkt die Produktivität wieder ein wenig, weil die Kosten den Inputfaktor der Produktivitätsgleichung erhöhen. Zudem gibt es Stoffe, die nur schwer zu recyceln sind, weil sie nach ihrer Verwendung zu stark in der Umwelt verteilt sind – Platin- und Palladiumpartikel an Autobahnen sind nur ein Beispiel.³²

Und auch wenn Recycling die längerfristige Nutzung von nicht-erneuerbaren Ressourcen ermöglicht, so ist auch diese Ressource, langfristig betrachtet, einmal erschöpft, da eine Recyclingquote von 100% nicht erreicht werden kann.³³

Der Fokus dieser Arbeit ist jedoch nicht das Recycling, sondern die tatsächliche Substitution von Ressourcen.

5.3 Substitution von Ressourcen

Die beiden eben genannten Strategien können das Knappheitsproblem nicht-erneuerbarer Ressourcen, wie argumentiert, nicht langfristig lösen. Auf lange Zeit gesehen, sollten alle nicht-erneuerbaren Ressourcen durch erneuerbare substituiert werden.

Da Ressourcen sowohl stofflicher Natur sein können, als auch Energieformen sind und sich bereits viel Literatur mit der Substitution von Energieträgern beschäftigt, soll der Fokus im Folgenden auf der Substitution von Stoffen liegen. Nichtsdestotrotz wird kurz auf die Substitution von Energieträgern eingegangen:

²⁹ Vgl. Pankus Team (2005), vgl. Schlick (2006).

³⁰ Vgl. Meyer et al. (2009).

³¹ Vgl. Hahne/Hirn (2010), vgl. Bertram et al. (2007).

³² Vgl. Zereini (2005).

³³ Vgl. André/Cerda (2006).

Es ist relativ einfach, erdölbasierte Treibstoffe durch Biokraftstoffe zu ersetzen.³⁴ Gleiches gilt für den Ersatz von nicht regenerativ erzeugtem Strom: Dieser kann ohne weiteres durch regenerativ erzeugten Strom ersetzt werden, da elektrische Energie in ihrer Energieträgerfunktion unabhängig von der Energiequelle ist.³⁵ Allerdings zeigen diese beiden technologisch relativ einfachen Beispiele, dass die Frage, ob Substitution möglich ist, nicht die einzig entscheidende ist. Es ist ebenso zu beachten, dass beim Ersatz von Benzin durch Raps-basierte Rohstoffe Bodenknappheiten auftreten. Ähnliches gilt für die Produktion erneuerbaren Stroms: Nicht selten werden nicht-erneuerbare Ressourcen für die Produktion von Solarzellen und Windstrom-Generatoren verbraucht.³⁶

Schlussendlich läuft auch die Substitution von Energieträgern auf die Substitution von Stoffen heraus.

Die in Kapitel vier beschriebenen theoretischen Konzepte zur Ressourcensubstitution haben allerdings zwei Schwachstellen: Erstens basieren sie oft auf sehr vereinfachten Annahmen und können daher die komplexe Realität nur sehr begrenzt abbilden oder vorhersagen. Zweitens liefern sie keine konkreten Lösungen für das Problem der Substitution – selbst unter der Annahme, dass durch Forschung und Entwicklung neue Technologien hervorgebracht werden können, die es ermöglichen, nicht-erneuerbare Ressourcen zu substituieren, bleibt eines offen: Wie soll dies konkret geschehen?

Es müssen Ressourcen gefunden werden, die die gleichen Funktionalitäten aufweisen. Dies könnte sich allerdings als schwierig erweisen, da jedes Element und jede Verbindung charakteristische (chemische und/oder physikalische) Eigenschaften aufweist.

Organische Materialien mögen vielleicht noch reproduziert werden können. Aber was ist mit Metallen oder anderen anorganischen Stoffen, die oft höchst relevant in Katalysatoren oder anderen Technologien eingesetzt werden? Für diese Verbindungen Ersatz zu finden scheitert oft an physikalischen oder chemischen Hürden.

Viele der organischen Substanzen werden heute über Totalsynthese hergestellt. Die Biotechnologie forscht jedoch sehr stark daran, diese durch naturähnliche Herstellungsweisen zu ersetzen, um so größere Mengen effizienter z.B. mit Mikroorganismen herzustellen.³⁷ Teilweise sind biologische Prozesse aber so komplex, dass wir sie einfach noch nicht verstehen. Und ohne ein tiefer greifendes Verständnis dieser Prozesse ist es fast unmöglich, einen Prozessschritt oder sogar den gesamten Prozess durch andere Prozesse zu substituieren.

³⁴ Vgl. Harrington/McConnel (2003), vgl. Rask (1998), vgl. U.S. DOE (2000).

³⁵ Vgl. Darmstaedter (2001), vgl. EIA (2003).

³⁶ Vgl. Hahne/Hirn (2010).

³⁷ Vgl. Singh (2011).

Beispielsweise ist es unmöglich Phosphor als Dünger zu ersetzen. Um die wachsende Erdbevölkerung mit Nahrung ohne phosphorbasierte Dünger zu versorgen, müssen andere Stoffe oder vermutlich eher Technologien gefunden werden.

Die Frage ist auch: Können substituierende Ressourcen einen ähnlichen Wirkungsgrad erzielen und trotzdem keine höheren Explorationskosten verursachen? Wenn nicht, dann ist deren Substitution zwar effektiv aber nicht effizient.³⁸ Abgesehen von der generellen Machbarkeit, einen Stoff zu finden, der einen anderen funktional substituieren kann, muss auch berücksichtigt werden, dass jeder neue Stoff keine negativen Umwelteinflüsse auslöst, seine Produktion keine enormen Energiemengen verschlingt und somit hohe Kosten verursacht und dass er rechtzeitig und in ausreichenden Mengen hergestellt werden kann.³⁹

5.4 Rebound-Effekte

Nachhaltige Technologien sollen meist den Ressourcenverbrauch verringern. Daher werden derartigen Produkten oder Dienstleistungen nicht selten Starthilfen auf den Märkten gegeben – das EU-Verbot von normalen Glühbirnen steigert beispielsweise den Absatz von alternativen Leuchtmitteln enorm.⁴⁰ Allerdings konnte gezeigt werden, dass eine Technologie, die eigentlich Strom oder andere Ressourcen einspart, durch das veränderte Konsumentenverhalten dazu führt, dass am Ende mehr Ressourcen verbraucht werden.⁴¹ Eine Energiesparlampe spart ja Energie, wozu also das Licht ausschalten?

Erfolgreiche Substituierungen nicht-erneuerbarer Ressourcen durch erneuerbare beinhalten daher immer auch das Risiko, durch Rebound-Effekte der Umwelt abträglich zu werden. Bei der Entwicklung und Verbreitung von Substituten muss dies berücksichtigt werden.

6 Beispiele und Beurteilung von Substituten

Fokus dieser Arbeit ist die stoffliche Substitution von nicht-erneuerbaren Ressourcen. Dazu sollen in diesem Kapitel zunächst Beispiele genannt und diese anschließend bezüglich ihrer Realisierbarkeit beurteilt werden. Dazu erläutern die Autoren, wie realistisch sie das Substitutionspotential einschätzen, welche Risiken auftauchen können und welcher Zeithorizont realistisch ist.

6.1 Biopolymerbeschichtungen

Erdölbasierte Verpackungen bzw. Verpackungsbeschichtungen sind seit mehreren Jahren Standard in der Verpackungsindustrie. Um die Ressource Erdöl zu schonen, entwickelt daher

³⁸ Vgl. André/Cerdá (2004).

³⁹ Vgl. Graedel (2002).

⁴⁰ Vgl. Adrian (2013), vgl. Hahn (2013).

⁴¹ Vgl. Poppe (2013).

eine Forschungsgruppe des Fraunhofer-Instituts für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV, Freising und des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik ein Biopolymer für Karton- und Papierbeschichtung, das vergleichbare Eigenschaften wie erdölbasierte Beschichtungen besitzt und in ähnlich einfachen Prozessen herstellbar ist.⁴²

Dazu werden Polymilchsäuren (PLA) mit Poly-(3-hydroxybuttersäure-co-3-hydroxyvaleriansäure) (PHBV) kombiniert, um die gewünschten Eigenschaften zu erhalten.

Substitutionspotential

Die Autoren dieser Arbeit schätzen das Substitutionspotential als sehr realistisch und groß ein, da die Forschungsgruppe zeigen konnte, dass sie bereits Polyethylenschichten substituieren konnten. Allein in Deutschland könnten damit 210.000t dieses Materials pro Jahr eingespart werden.⁴³

Andere Biokunststoffe haben ebenso ein großes Marktpotential und ihre Funktionalität ist bereits vielfältig bewiesen.⁴⁴ Es wird geschätzt, dass biologisch hergestellte Biopolymere das Potential haben, 90% (in 2007 ca. 270 Millionen Tonnen) der weltweit konsumierten erdölbasierten Polymere zu substituieren.⁴⁵

Risiken

Leider ist der genaue Herstellungsprozess sowie die nötigen Energiemengen und weiteren Hilfsrohstoffe zur Herstellung des Biopolymers aus PLA und PHBV unbekannt. Ob durch diesen Prozess also mehr Umweltverschmutzungen verursacht werden, kann nicht klar festgestellt werden.

Das Risiko von Rebound-Effekten wird als vergleichsweise gering eingeschätzt. Durch die Substitution von einer erdölbasierten Plastikschiicht durch eine biologisch erzeugte Plastikschiicht ist eine Erhöhung des Konsums der letzteren doch eher unwahrscheinlich.

Nichtsdestotrotz würde die vermehrte Nutzung von PLA und PHVB den Bedarf an Kohlenhydraten erhöhen, die oftmals auf pflanzlicher Basis beruhen.⁴⁶ Dadurch kann es zu Bodenrivalitäten kommen. Ebenso sollte beachtet werden, dass auch nicht jedes Biopolymer, das biologisch abbaubar ist, gleichzeitig unter natürlichen Bedingungen zersetzt wird. Einige benötigen industrielle Umgebungen, um sich zu zersetzen.⁴⁷

⁴² Vgl. Wenzel (2013).

⁴³ Vgl. Wenzel (2013).

⁴⁴ Vgl. Ceresana (2011).

⁴⁵ Vgl. Meyer (2011).

⁴⁶ Vgl. Syldatk (2006).

⁴⁷ Vgl. o.V. (2013b).

Zeithorizont

Da die Technologie bereits funktionstüchtig ist, wird der Realisierungshorizont von technischer Seite sehr kurzfristig sein. Entscheidend ist jedoch immer, ob die Kosten der Substitute nicht zu hoch sind und die Hersteller bereit sind, ihre Produktionsverfahren umzustellen. Die neuerdings eingesetzte kontinuierliche Herstellung von PLA wird mittelfristig dazu beitragen, die Herstellung von Biopolymerbeschichtungen günstiger zu gestalten.⁴⁸

Entscheidend ist nach Klärung der technischen Realisierbarkeit und Finanzierbarkeit, ob der Verbraucher die neuartigen Produkte auch annimmt. Kompostierbare Chipstüten des Herstellers SunChips konnten sich 2009 zunächst aufgrund extrem lauten Knisterns nicht durchsetzen.⁴⁹ Wie schnell die erwähnte Substitutionsquote von 90% erreicht werden kann hängt aber auch von der Schnelligkeit der Unternehmen ab, ihre Produktionskapazitäten umzustellen.

6.2 Carbonfasern als Stahlersatz in Beton

Die SGL Group stellt aus Carbonfasern ein Carbongitter her, das in Beton anstelle des sonst üblicherweise benutzten Stahls eingesetzt werden kann. Dadurch werden wichtige Eigenschaften des Stahlbetons nicht nur beibehalten sondern durch das Substitut sogar verbessert: Der Carbon-Beton ist leichter, kann stärkere Zugkräfte aufnehmen und ist ebenso flexibler und korrosionsbeständig.⁵⁰

Substitutionspotential

Das Substitutionspotential wird als sehr groß eingeschätzt, da nicht nur weniger Stahl sondern auch weniger Beton benötigt wird, um die Betonplatten herzustellen. So kann Energie eingespart und die CO₂-Produktion verringert werden.⁵¹

Risiken

Erstens ist die Herstellung von Carbonfasern sehr energieaufwändig – eine Kosten-Nutzen-Analyse müsste also durchgeführt werden, für die allerdings kaum verlässliche Daten vorliegen. Es ist aber anzunehmen, dass sowohl Stahlkochen und die Pyrolyse zur Herstellung von Carbonfasern energieintensive Prozesse sind. Zweitens fehlen im Moment die notwendigen Informationen über die Kostenstruktur der Carbonfasern und des Carbon-Betons. Drittens würden selbst bei einer preislich und energetisch sinnvoll durchführbaren

⁴⁸ Vgl. Jacobsen (2000a) , vgl. Jacobsen (2000b).

⁴⁹ Vgl. SpiegelOnline (2010).

⁵⁰ Vgl. SGL Group (2013).

⁵¹ Vgl. Kolb (2013).

Substitution von Stahlbeton durch Carbon-Beton Rebound-Effekte auftreten: Es wären nicht nur mehr Carbonfasern nötig, auch der dafür notwendige Rohstoff würde in größeren Mengen nachgefragt. Zudem könnten die Ressourceneinsparungen durch vermehrten Einsatz von Carbon-Beton wieder zunichte gemacht werden.

Vor allem der Einsatz von Acrylnitril auf Propen und Ammoniakbasis⁵² ist nicht im Sinne der 2. Regel der Enquete-Kommission. Nur wenn die Kohlefasern auf Zellulosebasis hergestellt werden, kann von einer nachhaltigeren Substitution gesprochen werden. Dann sind allerdings die Werkstoffeigenschaften ganz andere als die der Hochleistungsfasern auf Basis von Polyacrylnitril und möglicherweise können die Materialeinsparungen aufgrund mangelnder Festigkeit nicht realisiert werden.⁵³

Zeithorizont

Momentan wird der von der SGL Group hergestellte Carbon-Beton in einem Neubau der Alphabeton AG in Büron getestet.⁵⁴ Sollte sich zeigen, dass die Fassadenplatten ein funktionstüchtiger Ersatz sind, der gleichzeitig Geld und Energie spart, wird sich das Produkt vermutlich mittelfristig auch am Markt durchsetzen können.

Solange allerdings fraglich ist, ob der Carbon-Beton auf Zellulosebasis die gleichen Werkstoffeigenschaften besitzt wie auf Basis von Polyacrylnitril, kann die tatsächliche Nachhaltigkeit des Werkstoffes nur schwer beurteilt werden.

6.3 Biologische Katalysatoren

Anorganische Katalysatoren basieren meist auf relativ komplexen Strukturen, die aus verschiedensten nicht-erneuerbaren Ressourcen – meist Metallen – aufgebaut sind. Um diese durch erneuerbare Ressourcen zu ersetzen, wird intensiv an der Entwicklung von Biokatalysatoren geforscht. Dazu eignen sich sowohl Enzyme, Mikroorganismen, Pflanzen und Algen.⁵⁵ Eine Sammlung verschiedener bereits erfolgreich getesteter Biokatalysatoren wird in einer Arbeit in *Organic Process Research & Development* vorgestellt.⁵⁶

Substitutionspotential

Biokatalysatoren haben das Potential anorganische Katalysatoren zu ersetzen und so den Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen zu senken. Schon 2011 wurden 25

⁵² Vgl. o.V. (2007).

⁵³ Vgl. o.V. (2013a).

⁵⁴ Vgl. SGL Group (2013).

⁵⁵ Vgl. Mahmoudian, M. (2011).

⁵⁶ Vgl. Hayler et al. (2011).

Basischemikalien und –produkte (>102.000 Jahrestonnen) mit Hilfe von Biotechnologie hergestellt.⁵⁷

In der Verwendung von Enzymen, genetisch umprogrammierten Mikroorganismen und anderen Biokatalysatoren liegen also große Potentiale.

Risiken

Auch wenn die Euphorie verschiedenste Produkte durch biologische oder biologisch katalysierte Prozesse herzustellen sehr groß ist, dürfen einige Punkte nicht außer Acht gelassen werden:⁵⁸

Die Effizienz von Enzym-katalysierten Prozessen liegt noch weit unterhalb derer anorganischer Totalsynthesen. Sollten diese Effizienzdefizite nicht verringert werden, treten nicht nur Kostenprobleme auf; auch steigt dadurch die Menge des verbrauchten Rohmaterials bzw. des Abfalles.

Ebenso erhöht sich mit zunehmender Komplexität der Produkte die Komplexität der Biokatalysatoren und der zugehörigen Produktionsprozesse, die für eine erfolgreiche Substitution ein tiefgreifendes Verständnis benötigen. Es ist nicht gesagt, dass jede Chemikalie, die heute durch anorganische Katalysatoren erzeugt wird, auch durch biologische Prozesse hergestellt werden kann.⁵⁹

Fraglich ist ebenso, wie die verschiedenen Biokatalysatoren hergestellt werden und ob dazu nicht auch nicht-erneuerbare Ressourcen nötig sind, da viele Enzyme ebenfalls Metalle enthalten.

Zeithorizont

Die Autoren schätzen, dass es trotz der abklingenden Euphorie im Feld der Biotechnologie⁶⁰ kurzfristig möglich sein wird, die meisten einfachen Chemikalien und Stoffe durch biokatalytische Prozesse herzustellen und so anorganische Katalysatoren zu substituieren. Mittel- bis langfristig sollte es allerdings auch möglich sein, komplexere Stoffe mit Biokatalysatoren herzustellen. Ob sich allerdings alle anorganischen Katalysatoren ersetzen lassen, können weder die Autoren noch Forscher sagen. Für diese Stoffe, die mit Hilfe nicht-erneuerbarer Ressourcen hergestellt wurden, können aber möglicherweise direkt Substitute gefunden werden, die ihrerseits biokatalytisch hergestellt werden.

⁵⁷ Vgl. Meyer (2011).

⁵⁸ Vgl. Singh (2011).

⁵⁹ Vgl. Kittleson/Wu/Anderson (2012).

⁶⁰ Vgl. o.V. (2012).

7 Schlussbetrachtungen

In dieser Arbeit wurde die 2. Regel zum Management von Stoffströmen der Enquete-Kommission vorgestellt, erklärt und anhand von ökonomischen Theorien und Beispielen erläutert, welche Probleme mit dieser Regel verbunden sind.

Vor allem die Substitution von nicht-erneuerbaren Ressourcen durch erneuerbare Stoffe stellt ein großes Problem dar. Es gibt zwar in manchen Teilbereichen, wie zum Beispiel dem Energiesektor (Ersatz von mit Benzin betriebenen Autos durch Elektro- oder Wasserstofffahrzeuge (beides z.B. gewonnen aus erneuerbarer Windkraft)) bereits effektive und effiziente Ansätze sowie Umsetzungen. Allerdings fällt es im stofflichen Bereich umso schwerer, qualitativ und funktionell gleichwertige Ersatzgüter zu finden. Gerade bei Katalysatoren gibt es kaum Ersatz mit der selben spezifischen Wirkungsweise. Werden also solche nicht-erneuerbaren Stoffe zu stark ausgebeutet, kommt es innerhalb relativ kurzer Zeit zu einem Mangel an diesen Ressourcen.

Folglich werden bestimmte Technologien ohne enorme Investitionen in die Erforschung alternativer Technologien und die nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen aufgrund von Rohstoffmangel ausfallen. Fehlt eine konkrete Schlüsseltechnologie, so hat dies Strahlwirkung auf andere Technologien, die auf dieser aufbauen. Obwohl es schon viele Verbesserungstechnologien gibt, z.B. Effizienzerhöhung und die Nutzung erneuerbarer Energien, basieren diese trotzdem auf der Nutzung nicht-erneuerbarer Ressourcen.

Die ausschließliche Nutzung von erneuerbaren Ressourcen bzw. leicht recycelbaren Ressourcen senkt hingegen die Effizienz. Nur die Effizienz zu erhöhen, wird die Problematik mittel- bis langfristig nicht lösen, da trotzdem die Rohstoffe ausgehen. Eine Lösung ist daher langfristig gesehen nur die Substitution von Ressourcen kombiniert mit Recycling. Hier wiederum taucht das Problem auf, dass die positiven Einsparungseffekte der Substitution teilweise durch das soziale Phänomen des Rebound relativiert und neutralisiert werden.

Zudem wird die Substitution von nicht-erneuerbaren Rohstoffen, die laut herrschender Meinung von Volkswirten durch einen Preismechanismus geregelt werden sollte, durch andere kurzfristige Effekte verlangsamt: Monopolistische Produktionsstrukturen und eine hohe Ausbringungsmenge, sowie die Exploration neuer Förderstellen senken die Preise für nicht-erneuerbare Rohstoffe.⁶¹ So übt der Markt selbst kaum Druck aus und seine Selbstregelung funktioniert nur bedingt. Greift hier nicht das Primat der Politik ein, fehlt möglicherweise die Zeit, Substitute zu erforschen. Zudem wird ohne eine Veränderung der

⁶¹ Vgl. Döring (2004).

Ersatz von erneuerbaren Ressourcen – 2. Regel der Enquete-Kommission

Konsumhaltung der Bevölkerung, ebenfalls Zeit fehlen, nicht-erneuerbare Ressourcen durch erneuerbare zu ersetzen.

Literaturverzeichnis

Adrian (2013): Energiesparleuchtmittel vs. herkömmliche Glühlampen – Marktanteile im Überblick, online unter: <http://www.marktanteile.info/qualitativer-marktanteil/energiesparleuchtmittel-vs-herkoemmlische-gluehlampen-marktanteile-im-ueberblick/> (aufgerufen am 13.09.2013).

André, F. J./Cerdá, E. (2004): On natural resource substitution, Fundación Centro de Estudios Andaluces, Documento de Trabajo E2004/48.

André, F. J./Cerdá, E. (2006): On the Dynamics of Recycling and Natural Resources, in: *Environmental & Resource Economics*, 33, 199–221.

Angermeier, G. (2013): Effektivität, online unter: <https://www.projektmagazin.de/glossarterm/effektivitaet> (aufgerufen am 20.09.2013).

Bertram, M./Hryniuk, M./Kirchner, G./Pruvost, F. (2007): Aluminium Recycling, The Road to High Quality Products.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2013): Materialeffizienz steigert Produktivität, online unter: <http://www.demea.de/materialeffizienz/artikel-zum-thema/materialeffizienz-steigert-produktivitaet> (aufgerufen am 23.09.2013).

Caspers-Merk, M. (1998): Abschlußbericht der Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung", Konzept Nachhaltigkeit, Vom Leitbild zur Umsetzung, Deutscher Bundestag, 13. Wahlperiode, Drucksache 13/11200.

Ceresana (2011): Marktstudie Biokunststoffe (2. Auflage), online unter: <http://www.ceresana.com/de/marktstudien/kunststoffe/biokunststoffe/> (aufgerufen am 14.09.2013).

Darmstaedter, J. (2001): The Role of Renewables in U.S. Electricity Generation: Experience and Prospects, in: M. Toman, ed., *Climate Change Economics and Policy: An RFF Anthology*, Washington DC: resources for the Future.

Döring, R. (2004): Wie stark ist schwache, wie schwach starke Nachhaltigkeit?, *Wirtschaftswissenschaftliche Diskussionspapiere*, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Rechts- und Staatswissenschaftliche Fakultät, No. 08/2004.

- Drucker, P. F. (1963): Managing for Business Effectiveness, in: Harvard Business Review, Mai/Juni 1963, 41 (3), 53-60.
- Drucker, P. F. (2002): The Effective Executive: The Definitive Guide to Getting the Right Things Done (Harperbusiness Essentials), ed. HarperCollins Publishers, Inc.
- EIA (2003): Annual Energy review 2002, Energy Information Administration.
- Endres, A. (2004): Natürliche Ressourcen und Nachhaltige Entwicklung, Fern-Universität Hagen und Universität Witten/Herdecke, Andrassy Working Paper Series No. XI.
- Gemmel, L. (2012): Diskrete Populationsmodelle für Einzelspezies – Teil 2, Präsentation am 30.10.2012.
- Graedel, T.E. (2002): Material substitution: a resource supply perspective, in: Resources, Conservation and Recycling, 34, 107-115.
- Hahn, S.-H. (2013): Die richtige Energiesparlampe, Günstige Energiesparlampen im Test, online unter: <http://www.zdf.de/WISO/Die-richtige-Energiesparlampe-29238068.html> (aufgerufen am 13.09.2013).
- Hahne, A./Hirn, G. (2010): Recycling von Photovoltaik-Modulen, in: BINE Informationsdienst, projektinfo 02/10.
- Harrington, W./ McConnel, V. (2003): Motor Vehicles and the Environment, Resources for the Future Report, online unter: <http://www.rff.org/rff/Documents/RFF-RPT-carsenviron.pdf> (aufgerufen am 02.09.2013).
- Hartwick, J. M. (1977): Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources, in: The American Economic Review, 67 (5), 972-974.
- Hayler, J./Andrews, I./Dunn, P./Hinkley, B./Hughes, D./Kaptein, B./Lorenz, K./Mathew, S./Rammeloo, T./Wang, L./Wells, A./White, T.D. (2011): Green Chemistry Articles of Interest to the Pharmaceutical Industry, in: Organic Process Research & Development, 15, 22-30.
- Hergarten, S. (2008): Populationsmodelle, Präsentation am Institut für Erdwissenschaften, KFU Graz, Wintersemester 2008/09.
- Hotelling, H. (1931): The economics of exhaustible resources, in: Journal of Political Economy, 39 (2), 137–175.

Jacobsen, S. (2000a): Darstellung von Polylactiden mittels reaktiver Extrusion. Dissertation, Institut für Kunststofftechnologie, Universität Stuttgart.

Jacobsen, S. (2000b): Polylactide – Biologisch abbaubare Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen für neue Anwendungen, in: Wechselwirkungen Jahrbuch 2000.

Kittleson, J.T./Wu, G.C./Anderson, J.C. (2012): Successes and failures in modular genetic engineering, in: Current Opinion in Chemical Biology, 16 (3-4), 329-336.

Kolb, B. (2013): Beton – Ökobilanz, online unter: <http://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Beton> (aufgerufen am 12.09.2013).

Krems, B. (2013): Effektivität, Effizienz, online unter: www.olev.de/e/effekt.htm (aufgerufen am 20.09.2013).

Lexikon der Nachhaltigkeit (2012): Schutz des Menschen und der Umwelt, online unter: www.nachhaltigkeit.info/artikel/12_bt_ek_mensch_und_umwelt_660.htm (aufgerufen am 07.09.2013).

Mahmoudian, M. (2011): Biocatalysis: The Road Ahead, in: Organic Process Research & Development, 15, 173-174.

Meyer, H.-P. (2011): Sustainability and Biotechnology, in: Organic Process Research & Development, 15, 180-188.

Meyer, J./Schubert, A./Trautmann, A./Kirschbaum, S./Kausch, C./Probst, T./Pretz, T./Julius, J./Killmann, D. (2009): Leitfaden Energieeffizienz für die Recyclingindustrie, Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Recycling, Ausgabe 2009, Aachen.

o.V. (2007): The Sohio Acrylonitrile Process, online unter: http://acswebcontent.acs.org/landmarks/landmarks/soh/soh_process.html (aufgerufen am 15.09.2013).

o.V. (2012): Synthetische Biologie: Wissenschaftsakademie legt Report vor, online unter: <http://www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/root,did=155972.html?> (aufgerufen am 14.09.2013).

o. V. (2013a): Carbon (fiber), online unter: [http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_\(fiber\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_(fiber)) (aufgerufen am 14.09.2013).

o.V. (2013b): Polylactide, online unter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Polylactide> (aufgerufen am 14.09.2013).

Panskus Team (2005): Von der Arbeitsvorbereitung zum Produktivitätsmanagement - Wege zur Produktivitätssteigerung, Beitrag für die awf-arbeitsgemeinschaft, Wuppertal, 13.06.2005, online unter: <http://www.awf-arbeitsgemeinschaft.de/download/Produktivitaet-PanskusTeam.pdf> (aufgerufen am 20.09.2013).

Poppe, E. (2013): Der Rebound-Effekt, Herausforderungen für die Umweltpolitik, Masterarbeit im Fach Politikwissenschaft, Freie Universität Berlin, Berlin, 10. März 2013.

Pyndick R. S./Rubinfels D. L. (2009): Mikroökonomie, Pearson Studium 2009, Addison-Wesley Verlag, 7. Aktualisierte Auflage, München.

Rask, K. (1998): Clean Air and Renewable Fuels: the Market for Fuel Ethanol in the US from 1984 to 1993, in: Energy Economics, 20, 325-345.

Rennings, K. (2007): Messung und Analyse nachhaltiger Innovation, in: Neue Wege statistischer Berichterstattung, 1, Mikro- und Makrodaten als Grundlage sozioökonomischer Modellierungen, Statistik und Wissenschaft Bd. 10, Wiesbaden, 122-138.

Rohstoffstrategie Bayern (2013): Materialeffizienz & -substitution, online unter: <http://www.rohstoffstrategie-bayern.de/materialeffizienz-substitution/> (aufgerufen am 16.09.2013).

Schlick, C. M. (2006): Innovative Methoden des Produktivitätsmanagements, Beitrag zum 2. Symposium Arbeitsorganisation der Zukunft – Wachstum durch Produktivitätsmanagement, Aachen, 28.09.2006, online unter: http://www.iaw.rwth-aachen.de/download/service/fachtagung_ao_schlick.pdf (aufgerufen am 20.09.2013).

SGL Group (2013): Carbonfaser-Gitter als innovative Betonverstärkung ersetzen Stahl im Beton, in: ddp direct, online unter: <http://www.themenportal.de/unternehmen/carbonfaser-gitter-als-innovative-betonverstaerkung-ersetzen-stahl-im-beton-12303> (aufgerufen am 08.09.2013).

Singh, R. (2011): Facts, Growth, and Opportunities in Industrial Biotechnology, in: Organic Process Research & Development, 15, 175-179.

SpiegelOnline (2010): Knabber-Terror: Öko-Chipstüte raschelt so laut wie ein Rasenmäher, online unter: <http://www.spiegel.de/panorama/knabber-terror-oeko-chipstueete-raschelt-so-laut-wie-ein-rasenmaeher-a-731114.html> (aufgerufen am 10.09.2013).

Steven, M. (2013): Definition Produktivität, Gabler Wirtschaftslexikon, online unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/produktivitaet.html> (aufgerufen am 20. September 2013).

Syldatk, C. (2006): Organische Säuren. Essigsäure (Acetat), in: Garabed Antranikian: Angewandte Mikrobiologie. Springer -Verlag Berlin und Heidelberg 2006, 344-347.

U.S. DOE (2000): Biofuels for Sustainable Transportation, U.S. Department of Energy.

Valente, S. (2005): Sustainable Development, Renewable Resources and Technological Progress, in: Environmental & Resource Economics, 30, 115-125.

Wenzel, H. (2013): Bioplastik-Beschichtung für Papier und Karton; Wissenschaftler verbessern die Material- und Barriere-Eigenschaften von Compoundkunststoffen auf Basis nachwachsender Ressourcen, in: Lebensmittel Zeitung, 5. Juli 2013.

Zereini, F. (2005): Ermittlung der aktuellen Konzentration und Verteilung von Platingruppenelementen (PGE), in: FAT-Schriftenreihe 194.