

## Nachhaltigkeitsstrategien für eine CO<sub>2</sub>-arme Wirtschaft

### Einleitung

Die fossilen Kohlenstoffträger Erdöl, Erdgas und Kohle sind mengenmäßig die mit Abstand am stärksten der Erdkruste entnommenen Bodenschätze. Sie werden in einem bisher nicht dagewesenen Umfang irreversibel verbraucht, um die globalen Energiebedürfnisse für Wärme, Elektrizität und Mobilität zu befriedigen. Durch die weit überwiegende energetische Nutzung der fossilen Kohlenstoffträger kommt es jedoch zu einer signifikanten Beeinflussung des organischen und anorganischen Kohlenstoffkreislaufs, insbesondere zu einer CO<sub>2</sub>-Anreicherung in der Atmosphäre. Zwischen 2002 und 2011 wurden durch die Verbrennung fossiler Kohlenstoffträger wie Erdöl, Erdgas, Kohle inklusive der Zementproduktion weltweit durchschnittlich 31 Mrd. t CO<sub>2</sub> pro Jahr in die Atmosphäre emittiert, wobei die in diesem CO<sub>2</sub> gebundene Kohlenstoffmenge durchschnittlich 8,3 Gt Kohlenstoff pro Jahr betrug.<sup>1</sup> Im Jahr 2013 erreichten die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen ihren bisherigen Höchstwert von 36 Mrd. Tonnen,<sup>2</sup> was einer gebundenen Kohlenstoffmenge von 9,8 Gt entspricht. Der globale Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie zur Herstellung von Kraftstoffen und Basischemikalien wird im Wesentlichen durch Erdöl gedeckt, dessen Weltförderung im Jahr 2012 auf ein neues Allzeithoch von fast 4,14 Gt stieg.<sup>3</sup> Das entspricht bei einem mittleren Kohlenstoffgehalt im Erdöl von 85 % etwa 3,52 Gt C/a. Der Vergleich legt nahe, dass es kaum möglich scheint, den

---

1 Philippe Ciais u. a., »Carbon and Other Biogeochemical Cycles«, in Thomas F. Stocker u. a. (Hg.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge/New York 2013, S. 465–570, hier S. 486, Tab. 6.1.

2 Corinne Le Quéré u. a., »Global Carbon Budget 2013«, in *Earth System Science Data* 6/1 (2014), S. 235–263.

3 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hg.), *Energiestudie 2013. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit*, Hannover 2013, S. 20, [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie\\_2013.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie_2013.pdf?__blob=publicationFile&v=5) (18. 9. 2014).

anthropogen verursachten Kohlenstoffkreislauf zu schließen, da die jährlich durch energetische Nutzung in die Atmosphäre emittierte Kohlenstoffmenge weitaus größer ist, als die globale Chemieindustrie auffangen und stofflich-chemisch verwerten könnte.

Für einen ressourcenschonenden Umgang mit fossilen Kohlenstoffträgern ist es daher unumgänglich, die derzeitige kohlenstoffintensive in eine CO<sub>2</sub>-arme Industrie und Wirtschaft zu transferieren (»Low Carbon Economy«). Dies bedeutet letztlich eine grundlegende Umgestaltung der Rohstoffnutzung und Energieversorgung, oder anders ausgedrückt, eine Ressourcenwende. Für die erfolgreiche Bewältigung dieses gewaltigen, aber dringend anstehenden Transformationsprozesses stehen im Kontext der Nachhaltigkeit Suffizienz-, Effizienz- und Konsistenzstrategien zur Verfügung. Diese Strategien leisten ihren spezifischen Beitrag und sind zueinander komplementär. Während Suffizienz- und Effizienzstrategien vorrangig auf quantitative Aspekte ausgerichtet sind, zielen Konsistenzstrategien auf qualitativ neue Formen der Rohstoffnutzung, welche im Einklang mit der Belastbarkeit natürlicher Quellen und Senken stehen.

Nach einem kurzen historischen Abriss der Nutzung von Kohlenstoffträgern und der Erläuterung grundlegender Ansätze der industriellen Ökologie sowie des industriellen Metabolismus konzentriert sich der vorliegende Beitrag auf die Systematisierung und das Zusammenspiel von Suffizienz-, Effizienz- und Konsistenzstrategien und die sich daraus ergebenden technologischen Lösungsansätze für die schrittweise Etablierung einer »Low Carbon Economy«.

## **Bedeutung von Kohlenstoffträgern aus historischer Sicht**

Veränderungen der anthropogen genutzten, also menschengemachten, Energie- und Rohstoffbasis sind keine Erscheinung der Neuzeit. Historisch gesehen waren Art und Menge der eingesetzten Rohstoffe in Abhängigkeit der Bedürfnisse der Menschen und dem Stand von Wissenschaft und Technik von einem steten Wandel begleitet. Die Bedeutung der Rohstoffbasis für die zivilisatorische Entwicklung findet sich in der Bezeichnung historischer Epochen, wie der Stein-, Bronze- und Eisenzeit, wieder. Mit Bezug auf die dominierenden Werkstoffe wird auch vom »hölzernen«, »eisernen« oder dem Zeitalter der Kunststoffe gesprochen.<sup>4</sup> Seit etwa Mitte des 20. Jahrhunderts wird schließlich die durch

---

4 Christian Pfister, »Vom »Hölzernen Zeitalter« zur Überflusgesellschaft. Veränderungen des gesellschaftlichen Stoffwechsels in Westeuropa im Verlaufe der letzten 300 Jahre – ein Überblick«, in *Ferrum. Nachrichten aus der Eisenbibliothek* 85 (2013), S. 27–34, hier S. 28.

Erdöl geprägte Periode der Energiebereitstellung, die die wichtigste Voraussetzung für das rasante Wachstum der globalen Industrialisierung war und ist, als das *Erdölzeitalter* bezeichnet.

Ein kurzer Blick zurück: Mit der Nutzung des Feuers war über viele Jahrhunderte Holz der mit Abstand dominierende Energieträger in Form von Feuerholz, aber auch der wichtigste Werk- und Baustoff. In der Agrargesellschaft bis zum Ende des vorindustriellen Zeitalters wurde das Spektrum der kohlenstoffbasierten Energieträger Kohle, Holzkohle, Torf und Dung durch die Nutzung tierischer Arbeitskraft sowie von Wind- und Wasserkraft in Form der Mühlentechnik erweitert. Bis zur ersten industriellen Revolution beruhte die Energieversorgung weitgehend auf erneuerbaren Energien.

Am Ende des vorindustriellen Zeitalters kam es durch die Übernutzung des Holzes für nahezu alle energetischen und viele werkstoffliche Anwendungen zu einer ersten tiefgreifenden Rohstoffkrise. Vor diesem Hintergrund erschien im Jahre 1713 das Werk *Sylvicultura oeconomica* des sächsischen Oberberghauptmanns Hans Carl von Carlowitz, in dem er Nachhaltigkeit zum Leitbild für eine auf die folgenden Generationen hin angelegte Waldbewirtschaftung erhob. Diese Holz- bzw. Rohstoffkrise und die mit der ersten industriellen Revolution verbundenen qualitativ und quantitativ neuen Anforderungen an die Bereitstellung von Energieträgern führten zwangsläufig zu einem grundlegenden Wandel der Rohstoffversorgung, oder im aktuellen Sprachgebrauch, zu einer ersten Energie- und damit Rohstoffwende (Abb. 1). Im weiteren Verlauf der schnell fortschreitenden Industrialisierung und der zweiten industriellen Revolution Ende des 19. Jahrhunderts wurde die kohlenstoffbasierte Energie- und Rohstoffversorgung fast vollständig auf die Nutzung von Kohle, später außerdem von Erdöl und Erdgas, umgestellt. Diese Prozesse verliefen, ebenso wie die industriellen Revolutionen, in langen Zyklen.<sup>5</sup> Mitte des 20. Jahrhunderts, nach dem Zweiten Weltkrieg, kam als vielversprechende Energiequelle die Kernkraft hinzu.

Der rasante Anstieg der Weltbevölkerung, die Globalisierung der Wirtschaft und die Angleichung der Lebensverhältnisse ziehen einen bisher nie dagewesenen Anstieg des Verbrauchs fossiler Kohlenstoffträger nach sich. Bereits seit den 1970er Jahren wurden Ängste vor einer heraufziehenden Energie- und Rohstoffkrise wach. Meadows stellte 1972 die Frage nach den Grenzen des Wachstums. Während im 18. Jahrhundert »nur« durch die Verknappung des Rohstoffes Holz lokale Krisen ausgelöst wurden und ökologische Aspekte

---

<sup>5</sup> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.), *Die Dritte Industrielle Revolution – Aufbruch in ein ökologisches Jahrhundert. Dimensionen und Herausforderungen des industriellen und gesellschaftlichen Wandels*, Berlin 2008.

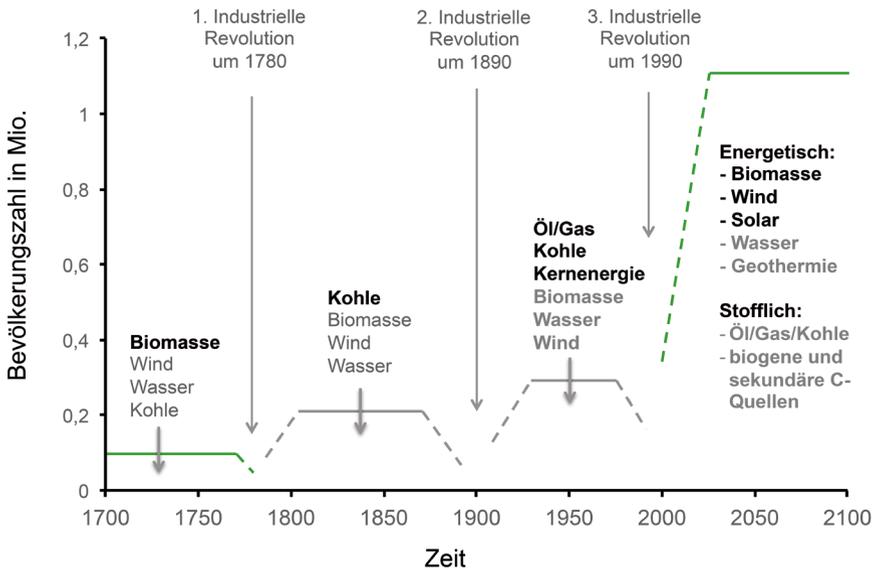


Abb. 1: Energie- und Rohstoffwenden in den letzten 300 Jahren.

weitgehend unberücksichtigt blieben, ist die sich gegenwärtig abzeichnende Rohstoffkrise von globaler Dimension. Einerseits handelt es sich bei fossilen Kohlenstoffträgern um endliche Ressourcen, deren statische Reichweite (mit Ausnahme der Kohle) weltweit auf verbleibende zwei bis drei Generationen geschätzt wird. Andererseits wird der rasant ansteigende  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Erdatmosphäre für die Veränderung des Weltklimas verantwortlich gemacht. Der im globalen Maßstab stattfindende Verbrauch fossiler Kohlenstoffträger zeigt Ähnlichkeiten mit der Übernutzung des Holzes im 18. Jahrhundert, diesmal jedoch in globalem Ausmaß.

Spätestens seit den 1990er Jahren wird über einen Wandel der Rohstoffbasis für die Energieversorgung nachgedacht. Die zunehmende Substitution fossiler durch erneuerbare Energien (Energiewende) ist begleitet von einem rohstofflichen Paradigmenwechsel, bei dem kohlenstoffhaltige Primärrohstoffe durch erneuerbare und sekundäre Kohlenstoffträger ersetzt werden. Diese qualitative Substitution von Stoff- und Energieströmen entspricht ihrem Wesen nach einer Konsistenzstrategie und ist sowohl für die energetische als auch für die stofflich-chemische Nutzung von Kohlenstoffträgern von hoher Relevanz.

Um den Grad der Nachhaltigkeit zu erhöhen, ist es mittel- bis langfristig erforderlich, die Anteile an primären und sekundären bzw. nachwachsenden Kohlenstoffträgern zu verschieben und umzukehren. Der Schlüssel liegt darin,

die primären Kohlenstoffträger um sekundäre und nachwachsende Kohlenstoffträger zu erweitern bzw. zu ergänzen. Entgegen des häufig geäußerten Wunsches, die primären möglichst schnell durch erneuerbare und nachwachsende Kohlenstoffträger abzulösen, werden die primären Kohlenstoffträger in absehbarer Zeit unverzichtbare Basis der Energie- und Kohlenstoffbereitstellung sein.

Den in der Vergangenheit zu bewältigenden Rohstoff- bzw. Energiewenden ist gemeinsam, dass das Spektrum um neue Energiequellen und Rohstoffqualitäten erweitert wurde, ohne dass eine vollständige Substitution zuvor genutzter Ressourcen stattfand (Abb. 1). Das betrifft nicht nur die Phasen der Übergänge, sondern auch den weiteren Verlauf. Dominierende Energiequellen und Rohstoffqualitäten verloren zwar ihre führende Position, waren aber in dem sich neu formierenden Energie- und Rohstoffmix weiterhin vertreten, auch für eine qualitativ andere Nutzung. Die in der aktuellen energiepolitischen Debatte zu beobachtende Einengung auf eine drastische Reduzierung bzw. Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine weitgehende Substitution fossiler Energie- und Rohstoffquellen erscheint im Sinne einer Nachhaltigkeitsbetrachtung über eine längere Zeitskala kaum zielführend.

Für die sich gegenwärtig abzeichnende dritte Energie- und Rohstoffwende bedarf es einer ganzheitlichen Betrachtung, nicht nur der technisch-ökonomischen, sondern auch der ökologischen und sozialen Aspekte. Eine solche Betrachtung ist nicht zuletzt Gegenstand der aktuellen Nachhaltigkeitsdiskussion. Durch Ansätze aus der industriellen Ökologie sollen insbesondere das Verständnis über die umfassenden Wirkungen industrieller Wirtschaftsweisen erweitert und neue, im Einklang mit der natürlichen Umwelt stehende Gestaltungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Das Ziel der industriellen Ökologie besteht im Kern darin, den derzeit nicht-nachhaltigen industriellen Metabolismus (griech. »metabolē«, Umgestaltung, Stoffwechsel) wieder an den Gesamtmetabolismus der Natur anzupassen. Dabei geht es vorrangig um die Generierung qualitativ neuer Stoff- bzw. Energieströme und weniger um die Begrenzung konventioneller Einsatzmengen auf aktuellem Niveau.<sup>6</sup> Lebendige, aber auch industrielle Systeme sind in einen dynamischen Stoff-, Energie-, und Informationsaustausch mit ihrer Umgebung eingebettet (vgl. Abb. 2). Um industrielle Produktionsweisen am Leitprinzip der Nachhaltigkeit zu orientieren, ist eine naturangepasste Stoff- und Energiewirtschaft zu etablieren, welche die anthropogenen Produktions- und Konsumtionsprozesse in Einklang mit natürlichen Organisations- und Wirkprozessen bringt. In einer

---

<sup>6</sup> Joa Bauer, *Industrielle Ökologie: Theoretische Annäherung an ein Konzept nachhaltiger Produktionsweisen*, Diss. Stuttgart 2008, <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2008/3610/> (18. 9. 2014).

metabolisch naturintegrierten Industriegesellschaft sind Quantität und Qualität der Stoffstromentnahme und -abgabe und die dafür relevanten technologischen Strukturen idealtypisch so gestaltet, dass natürliche Quellen und Senken in ihrer Regenerationsfähigkeit nicht überbeansprucht oder gar geschädigt werden. Die Wechselbeziehungen und Austauschprozesse zwischen System und Umgebung werden über Nachhaltigkeitsstrategien so organisiert und dimensioniert, dass sich der Grad der Nachhaltigkeit bei der Einbettung des Systems in seine Umgebung erhöht. Der System- und Strukturert halt erfolgt durch einen nachhaltigen Metabolismus und durch naturangepasste Verhaltensregulation. Diese Maßnahmen erhöhen die Resilienz des Systems, also dessen Widerstandsfähigkeit gegenüber Störungen aus der Umgebung, indem sie mit Strukturert halt reagieren. Resilienz ist ein Maß dafür, inwieweit ein komplexes System von einem Attraktor vom dynamischen Fließgleichgewicht abgedrängt werden kann, ohne dadurch destabilisiert zu werden, oder in einen völlig neuen Systemzustand übergeht.<sup>7</sup> Im Betrachtungsrahmen der industriellen Ökologie werden drei Nachhaltigkeitsstrategien verfolgt: die Suffizienzstrategie, die Effizienzstrategie und die Konsistenzstrategie.

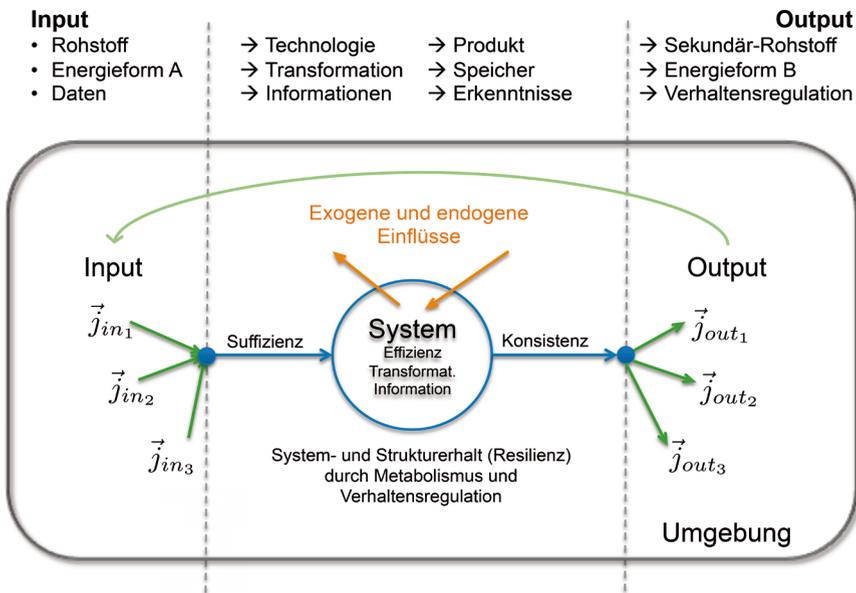


Abb. 2: Schematische Darstellung von Austauschprozessen von Energie, Stoff und Information zwischen einem »lebendigen« System und seiner Umgebung.

<sup>7</sup> John R. Ehrenfeld, »Can Industrial Ecology be the »Science of Sustainability?«, in *Journal of Industrial Ecology*, 8/1–2 (2004), S. 1–3.

## Nachhaltigkeitsstrategien

### Suffizienzstrategie – Absenkung des Primärenergie- und Rohstoffverbrauches

Der Begriff der Suffizienz (lat. ›sufficere‹, unterlegen, ausreichen, genügen) ist mehrdeutig, umstritten und wird gelegentlich mit ›Verzicht‹ oder gar ›Askese‹ verbunden. Dennoch ist Suffizienz eine zu Konsistenz und Effizienz komplementäre Strategie zur Transformation nicht-nachhaltiger in nachhaltige Systeme. Suffizienz umfasst »Maßnahmen, Instrumente und Strategien, mit denen Ressourcen eingespart werden können, und zwar dadurch, dass Menschen ihr Verhalten verändern mit der Absicht, Energie und Rohstoffe anders zu nutzen und von ihnen weniger zu verbrauchen als bisher.«<sup>8</sup> Die Suffizienzstrategie setzt demnach direkt beim Verbraucher an. Es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass der Verbraucher aufgrund eingeforderter Einsichten in Zwänge oder Notwendigkeiten freiwillige Verzichtsleistungen erbringt. Schnell gelangt man bei der Debatte um Suffizienz zu weltanschaulichen oder philosophischen Grundsatzdiskussionen über ressourcenintensive Lebensstile, die für den einen Verzicht und für den anderen Zuwachs an Lebensqualität bedeuten. Dabei besteht die Logik der Suffizienz stets darin, »von mehreren Zielen, die allesamt wichtig sind, keines zu maximieren, sondern für jedes das rechte Maß zu suchen, um sie in Balance zu bringen.«<sup>9</sup>

Unabhängig von den persönlichen Einstellungen und Präferenzen der Verbraucher lassen sich jedoch individuelle Einsparpotenziale identifizieren, die bei einer gesellschaftlichen Umsetzung dieser Suffizienzstrategie zu einer signifikanten Reduzierung des Ressourcenverbrauchs führen können. In diesem Zusammenhang identifizieren Griesßhammer u. a. eine TopTen-Liste von Einsparpotentialen am Beispiel eines Zwei-Personen-Haushalts in Deutschland.<sup>10</sup> Danach liegen Wärmedämmung von Häusern und Wohnungen, gefolgt vom Ersatz alter Heizungsanlagen durch neue Sonnenkollektoren, auf den ersten beiden Plätzen. Auf den Plätzen 3 bis 9 liegen mögliche Einsparmaßnahmen,

---

8 Manfred Linz, *Weder Mangel noch Übermaß. Über Suffizienz und Suffizienzforschung* (Wuppertal Papers, Nr. 145), Wuppertal 2004, S. 10.

9 Gerhard Scherhorn, »Die Logik der Suffizienz«, in Manfred Linz u. a., *Von nichts zu viel. Suffizienz gehört zur Zukunftsfähigkeit. Über ein Arbeitsvorhaben des Wuppertal Instituts* (Wuppertal Papers, Nr. 125), Wuppertal 2002, S. 15–26, hier S. 15.

10 Rainer Griesßhammer u. a., *CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale für Verbraucher* (Studie im Auftrag des Verbraucherzentrale Bundesverbandes e. V. im Rahmen des vom BMU geförderten Projekts ›Starke Verbraucher für ein gutes Klima‹), Freiburg 2010, S. 58.

die mit Sicherheit zu einer signifikanten Reduktion von Treibhausgasemissionen führen können, aber auch auf gravierende Akzeptanzprobleme beim Verbraucher stoßen werden. Da ist z. B. der Verzicht auf Flugreisen, der Erwerb von Niedrigverbrauch-PKW, die Umstellung auf einen gesünderen Ernährungsstil mit dem Hinweis »weniger Fleisch/Fett, mehr Gemüse und Obst«, der Erwerb von Bio-Lebensmitteln und die Verlagerung der PKW-Fahrt auf das Fahrrad usw. Spätestens hier wird deutlich, dass die durch Suffizienz nahegelegten Einsichten zu Veränderungen von Verhaltensweise und Lebensstil nicht bei allen Verbrauchern auf die erwartete Resonanz und Zustimmung stoßen werden.

Aber nicht alle vorgeschlagenen Maßnahmen dürften auf derartige Akzeptanzprobleme stoßen. Auf Platz 10 ist die Einsparung von Strom im Standby-Modus von elektronischen Geräten gelistet, die im Interesse aller Verbraucher liegt. Nach einer seit 2010 gültigen EU-Verordnung<sup>11</sup> dürfen entsprechende Haushaltsgeräte nicht mehr als ein Watt im Standby-Modus verbrauchen.

In Deutschland sind Leerlaufverluste in Privathaushalten und Büros für einen Stromverbrauch in Höhe von mindestens 22 Milliarden kWh pro Jahr verantwortlich. Das verursacht jährlich Kosten von mindestens vier Milliarden Euro. Die neuen EU-Regelungen würden für Deutschland eine Minderung des Stromverbrauchs von mehr als sechs Milliarden kWh pro Jahr bewirken – das entspricht knapp vier Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>. So ließe sich mindestens ein Großkraftwerk mit 800 Megawatt elektrischer Leistung einsparen. Die Gerätenutzerinnen und -nutzer sparen zudem jährlich Stromkosten in Höhe von gut 1,2 Milliarden Euro.<sup>12</sup>

Der Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik (VDE) veröffentlichte im Jahr 2008 eine Studie über den Stromverbrauch von Elektrogeräten im Standby-Modus mit dem Fazit: Die Geräte verbrauchen durch Standby mehr Strom als im produktiven Betrieb.<sup>13</sup>

---

11 Die Ökodesign-Richtlinie (Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte) zielt auf eine Verbesserung der Umweltverträglichkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte durch Vorgaben allgemeiner und spezifischer Ökodesign-Anforderungen. Die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG war bis zum 20.11.2010 in nationales Recht umzusetzen. In Deutschland gilt seit 25.11.2011 das »Gesetz über die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz – EVPG)«.

12 Umweltbundesamt, *Bye bye Stand-By: EU-Kommission sagt Leerlaufverlusten den Kampf an. Maßnahmen gegen stromfressende Büro- und Haushaltsgeräte* (Presseinformation 54/2008), 17.7.2008, S. 1, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/press/pd08-054.pdf> (18.9.2014).

13 Egbert Baake u. a., *Effizienz- und Einsparpotentiale elektrischer Energie in Deutsch-*

Einen Gegeneffekt zur Suffizienzstrategie stellt das bisher wenig greifbare Phänomen der ›geplanten Obsoleszenz‹ (lat. ›obsolescere‹, sich abnutzen, alt werden, aus der Mode kommen, an Ansehen oder Wert verlieren) dar, bei dem ein Produkt vorzeitig auf natürliche oder künstlich beeinflusste Art veraltet oder unbrauchbar wird. Als Erfinder der ›geplanten Obsoleszenz‹ gilt A.P. Sloan, der in seiner Funktion als GM-Präsident jährliche Konfigurationsänderungen und Veränderungen an Automobilen einführte, um Verbraucher dazu bringen, alle drei Jahre ein neues Auto zu kaufen.<sup>14</sup> Ein anderes Beispiel ist das 1924 gegründete Phoebuskartell, welches beschloss, die Brenndauer von Glühlampen international auf 1.000 Stunden zu begrenzen.<sup>15</sup> Der Begründer der Industrial Designers Society of America, Brooks Stevens, sagte bereits 1958:

Our whole economy is based on planned obsolescence and everybody who can read without moving his lips should know it by now. We make good products, we induce people to buy them, and then next year we deliberately introduce something that will make those products old fashioned, out of date, obsolete. We do that for the soundest reason: to make money.<sup>16</sup>

Der ehemalige Präsident des Umweltbundesamtes Jochen Flasbarth äußerte sich letztes Jahr dazu: »Bei der Obsoleszenz gibt es viele Spielarten: geplant, psychologisch und technisch. Fakt ist: der vorzeitige Verschleiß von Produkten, egal wie er zustande kommt, wirkt sich negativ auf unseren Ressourcenverbrauch aus.«<sup>17</sup> Der Vorwurf einer ›geplanten Obsoleszenz‹ von Produkten lässt sich schwer beweisen, da es an belastbaren Daten und systematischen wissenschaftlichen Untersuchungen fehlt. Daher gab das Umweltbundesamt 2013 eine Studie in Auftrag, die sich unter anderem mit der Frage beschäftigt, wie lange ein Produkt funktionsfähig sein sollte. Darüber hinaus soll untersucht werden, welche konkreten Maßnahmen vom Hersteller unternommen werden, um ›geplante Obsoleszenz‹ zu erzeugen. »Da die derzeitige Diskussion zu Obsoleszenz fast ausschließlich exemplarisch geführt wird, ist das Ziel der Studie

---

*land. Perspektive bis 2025 und Handlungsbedarf* (Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (EGT)), Frankfurt a. M. 2008.

14 Art. »Geplante Obsoleszenz«, in *Wikipedia. Die freie Enzyklopädie*, [http://de.wikipedia.org/wiki/Geplante\\_Obsoleszenz](http://de.wikipedia.org/wiki/Geplante_Obsoleszenz) (18.9.2014).

15 Ebd.

16 Zit. nach Giles Slade, *Made to Break. Technology and Obsolescence in America*, Cambridge/London 2007, S. 153.

17 Umweltbundesamt, *Defekte Elektrogeräte – zufällig oder geplant? Umweltbundesamt beauftragt Studie zu Obsoleszenz* (Presseinformation 33/2013), 19.8.2013, S. 1, [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/381/dokumente/pm\\_33\\_2013\\_defekte\\_elektogeraete-zufaellig\\_oder\\_geplant.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/381/dokumente/pm_33_2013_defekte_elektogeraete-zufaellig_oder_geplant.pdf) (18.9.2014).

vor allem die Ermittlung systematischer Informationen, um eine angemessene Beurteilung des Phänomens zu ermöglichen und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten«, sagt Flasbarth.<sup>18</sup>

## Effizienzstrategie – Anhebung der Ressourceneffizienz

Kernelement jeder Effizienzstrategie ist die Anhebung der Ressourcenproduktivität als Mengenverhältnis von Produkten (Outputs) zu den dafür erforderlichen Ressourcen (Inputs). Der klassische Ansatz für eine CO<sub>2</sub>-Vermeidung besteht in der Anhebung der Ressourceneffizienz. Dabei gelingt es durch technologische Maßnahmen aus der gleichen Menge an Ausgangsstoffen eine größere Energiemenge zu gewinnen oder die Produktausbeute durch Anhebung von Umsatzgraden zu steigern. Energieeffizienz und Erhöhung von Stoffumsatzgraden sind in der Regel die kostengünstigen Maßnahmen, um die Versorgungssicherheit mit Energie und Rohstoffen zu verbessern und die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermindern, ohne etablierte Technologien und Verhaltensmuster grundlegend verändern zu müssen.

Das größte Effizienzpotenzial liegt im Energiesektor selbst und in energieintensiven Industriebranchen. Etwa 30 % des Primärenergieverbrauchs der EU entfallen auf die Umwandlung von Energie in Strom und Wärme und für deren Verteilung bzw. Transport.<sup>19</sup> Große Einsparpotenziale liegen in der Kraft-Wärme-Kopplung und innovativer Abwärmenutzung. Die Umsetzung von Effizienzstrategien wird insbesondere im energetischen Bereich bereits durch eine Vielzahl von Instrumenten und Maßnahmen wie Ordnungsrecht, Förderprogramme, Marktinstrumente und freiwillige Vereinbarungen unterstützt. An dieser Stelle sei auf die dena-Studie »EnEffV Sys« verwiesen, in der die wichtigsten Instrumente zusammengefasst dargestellt sind.<sup>20</sup>

Am Endenergieverbrauch sind in Deutschland die Industrie mit 30 %, Haushalte mit 25 %, und der Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen mit 15 % beteiligt.<sup>21</sup> Maßnahmen zur Effizienzsteigerung sind für alle Sektoren von

---

18 Ebd.

19 KOM(2011) 109, *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Energieeffizienzplan 2011*, 8.3.2011, S. 10, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0109&from=DE> (18. 9. 2014).

20 Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.), *Steigerung der Energieeffizienz mit Hilfe von Energieeffizienz-Verpflichtungssystemen*, Berlin/Köln 2012.

21 Umweltbundesamt, AG Energiebilanzen, Grafik: Endenergieverbrauch 2011 nach Sektoren und Energieträgern, <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/me>

Bedeutung. Vor dem Hintergrund, dass rund 40 % des deutschen Endenergieverbrauchs und damit rund 30 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf den Energieeinsatz in Gebäuden entfallen,<sup>22</sup> bildet dieser Bereich einen Schwerpunkt für Maßnahmen zum effizienteren Energieeinsatz, da auch alle oben genannten Sektoren mit ihrem Gebäudebestand betroffen sind. Durch Maßnahmen zur energetischen Gebäudesanierung (Wärmedämmung) soll der Wärmebedarf gegenüber 2008 bis zum Jahr 2020 um 20 % und bis 2050 um 80 % gesenkt werden. Die energetische Sanierungsrate soll dazu auf 2 % verdoppelt werden. Weiterhin bieten sich vielfältige Maßnahmen zur Steigerung der effizienteren Nutzung von Elektroenergie durch den Einsatz energiesparender Geräte an. Dazu gehören neben energiesparenden Beleuchtungsmitteln und tageslichtabhängigen Steuerungen auch energieeffiziente elektrische Maschinen und Antriebe – vom Kühlschrank bis zur IT-Technik. Durch die Nutzung energieeffizienter Technik kann der Stromverbrauch in Haushalten um bis zu 25 %, in Industrie und Gewerbe im Bereich Druckluft und Pumpen um bis zu 30 % reduziert werden. Bei der Beleuchtung werden Einsparpotenziale von bis zu 70 % und im Bereich der Informations- und Kommunikations-Technik bis zu 75 % gesehen.<sup>23</sup>

Weitere Effizienzpotenziale liegen im Bereich der Nutzung von Abwärme und betreffen nicht nur die Prozesswärme im industriellen und gewerblichen Bereich, sondern z. B. auch im Bereich Abwasser und Kanalisation von Wasser und Luft. Nach einer im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführten Studie hätte eine konsequente Abwasserwärmenutzung in Deutschland das Potenzial, 10 % des Gebäudebestandes mit Wärme zu versorgen.<sup>24</sup>

Die ausschließliche Verfolgung der Effizienzstrategie ist nicht ausreichend. Zur Etablierung nachhaltiger Produktions- und Verbrauchsprozesse muss der Ressourcenverbrauch durch Suffizienzmaßnahmen so weit abgesenkt werden, dass erzielbare Einsparungen infolge von Effizienzsteigerungen nicht durch

---

dien/384/bilder/3\_abb\_endenergieverbrauch\_2013-09-27\_neu.png (18. 9. 2014).

22 Die Bundesregierung, *Die Energiewende kommt voran*, 14. 5. 2013, S. 8, [http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/\\_Anlagen/2013/05/013-05-14-energie-wende.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2013/05/013-05-14-energie-wende.pdf?__blob=publicationFile&v=4) (18. 9. 2014).

23 Initiative EnergieEffizienz, <http://www.dena.de/projekte/stromnutzung/initiative-energieeffizienz-ein-starkes-buendnis-fuer-stromeffizienz.html> (18. 9. 2014); Stephan Kohler, Präsentation »Energiewende in Deutschland – Roadmap bis 2020/2050«, Salzburg 9. 3. 2013, [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Veranstaltungen/Vortraege\\_GF/sk/130309\\_SK\\_Umweltkonferenz\\_Naturfreunde\\_OEsterreich\\_Salzburg\\_Energiewende\\_in\\_Deutschland\\_-\\_Roadmap\\_bis\\_2020-2050.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Veranstaltungen/Vortraege_GF/sk/130309_SK_Umweltkonferenz_Naturfreunde_OEsterreich_Salzburg_Energiewende_in_Deutschland_-_Roadmap_bis_2020-2050.pdf) (18. 9. 2014).

24 Ernst A. Müller u. a., *Untersuchung der Voraussetzungen für Projekte zur Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Abfallwirtschaft*, 2010.

erhöhten Ressourcenverbrauch kompensiert bzw. überkompensiert werden. Dieses Phänomen wird als Rebound-Effekt bezeichnet. Die qualitativen, quantitativen und gesellschaftlichen Dimensionen von Rebound-Effekten sind in vielen Bereichen relativ unerforscht, weshalb das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF entsprechende wissenschaftliche Untersuchungen fördert, um diese Effektkategorie besser zu verstehen.<sup>25</sup>

Ein Produkt, das effizienter hergestellt wird, kann billiger angeboten werden. Was billiger wird, wird stärker nachgefragt. Für die Situation am Strommarkt bedeutet das: Das Stromangebot durch erneuerbare Energien steigt, folglich sinkt der Marktpreis und die Nachfrage nimmt zu. Verstärkt wird dieser Effekt durch die Tatsache, dass effizientere und damit sparsamere Technologien stärker genutzt werden. Werden dank Effizienzsteigerung Ressourcen und damit Kapital eingespart, wird dieses Kapital für andere Zwecke eingesetzt, für die wiederum Ressourcen verbraucht werden. Darüber hinaus sind der Erhöhung der Effizienz mit klassischen Mitteln in der Regel auch technische, ökologische und wirtschaftliche Grenzen gesetzt. So wird beispielsweise mit enormem technischen und wirtschaftlichen Aufwand seit vielen Jahren kontinuierlich an der Entwicklung neuer Hochtemperaturwerkstoffe gearbeitet, um die Dampfparameter eines Kraftwerks und damit dessen Wirkungsgrad zu erhöhen. Derzeit ist ein Wirkungsgrad auf Heizwertbasis von etwa 46 % möglich. Die Steigerung der Dampfparameter auf 700 °C und 350 bar ermöglicht theoretisch eine Anhebung des Wirkungsgrades um circa vier Prozentpunkte auf 50 %. Diese Verbesserung führt zu einer Verringerung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen um circa 8 %. Aktuell liegt der Kraftwerkswirkungsgrad weltweit bei nur circa 30 %, insofern ist der Hebel für Effizienzsteigerungen hier anzusetzen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erhalten, zumindest in Deutschland und Europa, bei konventionellen Kraftwerken jedoch zunehmend Flexibilität und Mindestlastabsenkung im Zusammenspiel mit erneuerbaren Energien eine zunehmende Bedeutung. Es stellt sich die Frage, ob zumindest in Deutschland andere Nachhaltigkeitsstrategien wirksamer sein könnten als Effizienzsteigerungen um wenige Prozentpunkte. Lässt sich die Effizienz nicht mehr verbessern, da z. B. technologische oder gar thermodynamische Grenzen erreicht werden, ist über Substitutionsmöglichkeiten durch Konsistenzstrategien nachzudenken.

---

25 <http://kooperationen.zew.de/de/rebound> (18. 9. 2014).

## **Konsistenzstrategie – Energie-, Rohstoff- und Ressourcenwende**

Im Gegensatz zu Suffizienz und Effizienz zielt Konsistenz (lat. ›con-‹, zusammen- und ›sistere‹, stellen) nicht auf eine quantitative Absenkung des materiellen Inputs, sondern auf eine qualitative Veränderung industrieller Stoffstromqualitäten. Danach ist das System mit all seinen Umwandlungs- und Austauschprozessen nach dem Vorbild der Natur naturangepasst in seine Umgebung zu integrieren. Die mit der Konsistenz angestrebte Entwicklung naturangepasster Stoff- und Energieströme ist durch Effizienzsteigerung bzw. Suffizienz nicht realisierbar, sondern bedingt grundlegende qualitative Veränderungen. Bezogen auf Kohlenstoffträger besteht die Konsistenzstrategie im Übergang von nicht-erneuerbaren zu erneuerbaren Ressourcen und von der energetischen zur stofflichen Nutzung (Abb. 3).

Die in Deutschland eingeleitete Energiewende betrifft den energetischen und rohstofflichen Bereich gleichermaßen. Die Energiewende erreicht eine neue Qualität durch den Übergang von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern. Die neue Qualität spiegelt sich dabei nicht nur in der angestrebten Umkehrung der Anteilsverhältnisse im Energiemix wider, sondern in der Substitution von fossilen durch nachwachsende Kohlenstoffträger und vor allem der Nutzung kohlenstofffreier, erneuerbarer Energieformen, wie Wind, Sonne, Wasser, und Geothermie.

Im stofflichen Bereich besteht die neue Qualität darin, konventionelle primäre/fossile Kohlenstoffträger durch sekundäre und biogene zu ergänzen bzw. abzulösen. Im Gegensatz zur energetischen Nutzung kann im stofflichen Bereich auf fossile Kohlenstoffträger als Kohlenstoffquelle nicht grundsätzlich verzichtet werden.

Energie- und Rohstoffwende sind ihrem Wesen nach Konsistenzstrategien. Die Absenkung des Verbrauchs an fossilen Primärressourcen bei gleichzeitiger Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission erfolgt im energetischen Bereich durch die systematische Substitution fossiler Kohlenstoffträger durch erneuerbare Energien. Gelingt eine vollständige Substitution, so kann auf die energetische Nutzung fossiler Energieträger gänzlich verzichtet werden.

Im stofflich-chemischen Bereich wird seit einiger Zeit versucht, den Rohstoffmix durch biogene bzw. sekundäre Kohlenstoffquellen zu erweitern, um die einseitige Abhängigkeit vom knapper und teurer werdenden Erdöl zu überwinden. Die schrittweise Substitution primärer/fossiler Rohstoffe durch nachwachsende und sekundäre Kohlenstoffträger schafft die Voraussetzung, mit fossilen Kohlenstoffressourcen wesentlich schonender und intelligenter umzugehen.

Abb.3a zeigt schematisch, wie das Energiesystem durch Einkopplung erneuerbarer Energien in Kombination mit der Co-Nutzung nachwachsender bzw. sekundärer Rohstoffe dekarbonisiert werden kann (Low Carbon Economy).

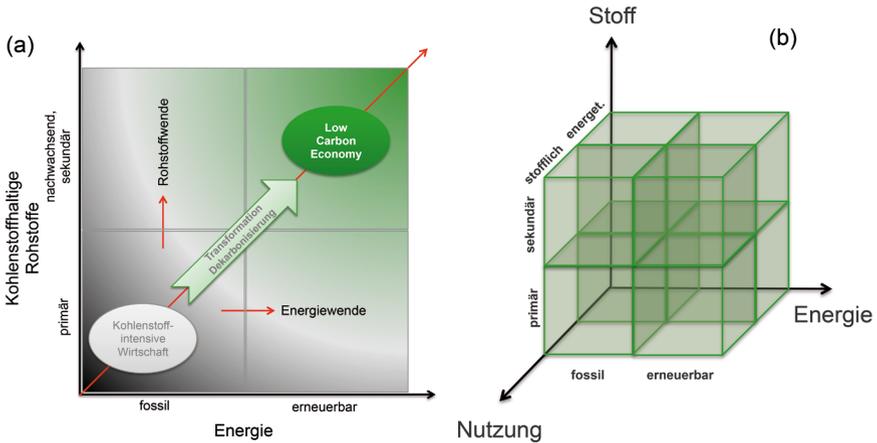


Abb.3: (a) Transformation des Kohlenstoffeinsatzes in Richtung einer CO<sub>2</sub>-armen Wirtschaft (Low Carbon Economy), (b) Ressourcenwende im Technologieraum einer Low Carbon Economy.

Die Beschränkung des Kohlenstoffeinsatzes auf die stofflich-chemische Nutzung in Kombination mit der Nutzung erneuerbarer Energien zur Rückführung der kohlenstoffhaltigen Produkte nach ihrer Nutzungsphase – inklusive des anfallenden CO<sub>2</sub> – in den Konversionsprozess, lässt die Schließung des anthropogenen Kohlenstoffkreislaufs in den Bereich des Möglichen rücken. Die folgende Tabelle beschreibt stichpunkthaft die Konsistenzstrategien Energie-, Rohstoff- und Ressourcenwende.

Konsistenzstrategie	Übergang von ...	zu ...
Energiewende	fossilen Energien	erneuerbaren Energien
Rohstoffwende	primären Rohstoffen	sekundären/nachwachsenden Rohstoffen
Ressourcenwende	energetischer Nutzung	stofflicher Nutzung

Abb. 4: Strategien zur Transformation einer kohlenstoffintensiven Wirtschaft in eine Low Carbon Economy.

Obwohl sie bisher weitgehend isoliert voneinander betrachtet werden, sind die Energie- und die Rohstoffwende unmittelbar aneinander gekoppelt, da jede chemische Reaktion neben der Stoffumwandlung untrennbar mit einer Energiewandlung verbunden ist. Hier liegt ein gewaltiges Potenzial für die Ressourcenwende, der Transformation der derzeit dominierenden energetischen hin zu einer stofflichen Nutzung primärer und sekundärer Rohstoffe unter Einkopplung erneuerbarer Energien, wobei die Möglichkeit der Bereitstellung und Einkopplung von regenerativem Strom im großen Stil historisch gesehen eine neue Dimension der Verbindung von Stoff- und Energiewirtschaft eröffnet. Die Art der Nutzung, ob energetisch oder stofflich, bildet eine dritte Dimension (Abb. 3b). Die Dimensionen Energie, Rohstoff und Nutzungsart spannen zusammen den Technologieraum auf, in dem die Transformation von einer kohlenstoffintensiven Wirtschaft hin zur Low Carbon Economy stattfinden muss.

Erst die stoffliche Nutzung unter Einsatz erneuerbarer Energien ermöglicht die Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf ein Mindestmaß. Abb. 5 zeigt schematisch den Übergang von der kohlenstoffintensiven in eine CO<sub>2</sub>-arme Wirtschaft und die Wirkungsbereiche der hier betrachteten Nachhaltigkeitsstrategien. Eine vollständige Substitution fossiler durch erneuerbare und sekundäre Kohlenstoffträger ist, so wie Kurve 1 und 2 in Abb. 5 schematisch andeuten, vorerst nicht zu erwarten. Nachwachsende und sekundäre Rohstoffe haben nur langfristig das Potenzial, die Rolle der heutigen Primärrohstoffe einzunehmen. Aus heutiger Sicht entspricht Kurve 3 qualitativ dem zu erwartenden Verlauf der Kohlenstoffmenge, welche durch nachwachsende und sekundäre Rohstoffe bereitgestellt werden kann. Es ist zu erwarten, dass fossile und biogene Kohlenstoffquellen auf längere Zeit feste Bestandteile des Rohstoffmixes sein werden. Das bedeutet, dass weiterhin primäre/fossile oder sekundäre Kohlenstoffträger die Kohlenstoffdifferenz  $\Delta C$  in Abb. 5 ergänzen müssen, jedoch in geringerem Umfang, um insbesondere den Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie zu decken. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch die Produktion nachwachsender Rohstoffe durchaus mit energieintensiven und umweltrelevanten Prozessen verbunden ist. Abgesehen von der Konkurrenz zur Nahrungskette sind die Naturbeeinflussung und die Landinanspruchnahme hoch, sodass die Wirkungen der Pflanzenproduktion nicht zu vernachlässigen sind.

Betrachtet man den in Abb. 5 dargestellten Übergang im Kontext der Energiebereitstellung, so ist eine vollständige Substitution fossiler kohlenstoffbasierter Energieträger durch erneuerbare Energien prinzipiell möglich. Gelingt eine vollständige Substitution, so kann auf die energetische Nutzung fossiler Kohlenstoffträger möglicherweise ganz verzichtet werden. Dabei spielt die technologische Durchführbarkeit sogar eine untergeordnete Rolle. Die Barrieren zur Umsetzung der Konsistenzstrategien sind vorwiegend sozio-ökonomischer Art.

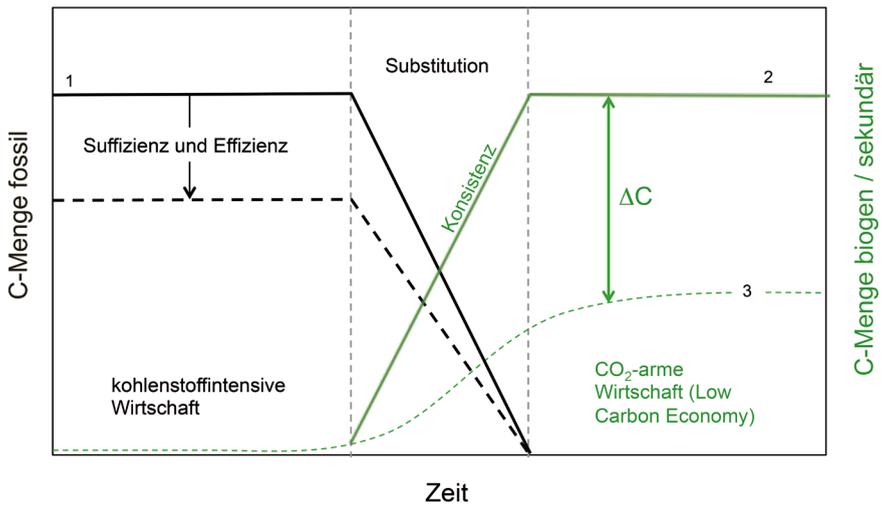


Abb. 5: Transformation der kohlenstoffintensiven in eine CO<sub>2</sub>-arme Wirtschaft (Low Carbon Economy) und Wirkungsbereiche der Nachhaltigkeitsstrategien.

Gesamtgesellschaftlich muss die Frage beantwortet werden, ob wir uns eine derartige Transformation des Energiesystems leisten können und wollen. Derzeit verfügt Deutschland über zwei komplementäre Energiesysteme (fossil und regenerativ), die noch nicht ausreichend miteinander verbunden und abgestimmt sind. Im Strategiebereich der Substitution stehen CO<sub>2</sub>-intensive und CO<sub>2</sub>-arme Technologien nebeneinander. In diesem Bereich ist von einer ›Entweder-oder-Logik‹ zu einer ›Sowohl-als-auch-Logik‹ überzugehen. Für fossile und erneuerbare Energien einerseits und primäre bzw. nachwachsende/sekundäre Rohstoffe andererseits sollten keine Konkurrenzen zueinander aufgebaut werden. Im Gegenteil: Sie müssen miteinander in Einklang gebracht werden und sich solange gegenseitig unterstützen, bis sich eine nachhaltigere Lösung etablieren kann.

Es wird erwartet, dass in Zukunft in Deutschland erhebliche Mengen an Überschussstrom aus erneuerbaren Energien zur Verfügung stehen, welche nicht zeitgleich verbraucht werden können. Daher besteht zukünftig Bedarf nach innovativen und ökonomisch tragfähigen Lösungen zur Nutzung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien. Die Einkopplung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien in physikalische und chemische Phasenumwandlungsprozesse bewirkt eine Änderung des Energiehaushalts hinsichtlich thermischer (Elektrothermie) und chemischer Energie (Elektrochemie).

Bei elektrothermischen Verfahren wird elektrische Energie gezielt in Wärme umgewandelt. Der Wärmeeintrag erfolgt z. B. konduktiv, induktiv, dielektrisch, über Widerstandsheizung, Lichtbogen, Plasma-, Elektronen- oder Laserstrahlen. Der Wärmetransport wird über Wärmeleitung, Wärmestrahlung oder Konvektion realisiert. Eine innovative Einkopplung von Wärme in bestimmte Prozesse der Kohlenstoffchemie erhöht in signifikanter Weise stoffliche und energetische Wirkungsgrade und senkt die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Besonders nachhaltig können Prozesse gestaltet werden, wenn als Energiequelle zur Wärmeerzeugung erneuerbare Energien eingesetzt werden. Der Wärmeeintrag kann rein physikalisch erfolgen z. B. zur Beheizung von Reaktoren, Vorwärmung von Edukten, Trocknung und Aufbereitung von Einsatzstoffen oder zur thermischen Zersetzung durch pyrolytische Umwandlungen. Eine weitere innovative Möglichkeit der Elektrothermie ist die Einkopplung von Wärme in Stofftransformationsprozesse der Kohlenstoffchemie. Dies gilt insbesondere für endotherme Prozesse, die für ihren Ablauf die Zuführung von Wärme benötigen. Schlüsselreaktionen im Bereich der Kohlenstoffchemie ist die Umsetzung kohlenstoffhaltiger Edukte mit Wasserdampf bzw. Kohlendioxid nach der Boudouard-Reaktion nach Gl. 1, der Wassergasreaktion nach Gl. 2 oder der Steam-reforming-Reaktion nach Gl. 3 zur Herstellung der Synthesegas CO und H<sub>2</sub>.



Großtechnisch werden heute autotherme Prozesse angewendet, bei denen die für endotherme Reaktionen (Gl. 1) erforderliche Reaktionswärme durch exotherme Reaktionen, wie z. B. Verbrennungsreaktionen von Kohlenstoffträgern (Gl. 4) oder (Gl. 5), bereitgestellt wird.



Dieser Teil des Kohlenstoffs, der lediglich zur Reaktionswärmebereitstellung dient, wird zu CO<sub>2</sub> verbrannt und kann nicht im Produkt, z. B. im Synthesegas, fixiert werden. Wird die Reaktionswärme allotherm, also von außen, und auf der Basis erneuerbarer Energien zugeführt, erhöhen sich Kohlenstoffeinbindungsgrad und Gesamtwirkungsgrad um circa 20 Prozentpunkte gegenüber autothermen Verfahren bei gleichzeitiger signifikanter Absenkung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Bei elektrochemischen Verfahren wie z. B. der Elektrolyse wird elektrische Energie verwendet, um den Ablauf bestimmter Redoxreaktionen zu erzwingen. Über Elektrolyse werden Stoffe gewonnen, deren Herstellung über rein chemi-

sche Prozesse aufwendig, teuer oder gar nicht möglich ist. Zukünftig bedeutsam nicht nur im Bereich der Kohlenstoffchemie ist die Elektrolyse von Wasser zur Gewinnung von Wasserstoff und Sauerstoff. Erfolgt die Elektrolyse von Wasser auf der Basis erneuerbarer Energien, können die Produkte Wasserstoff und Sauerstoff dazu verwendet werden, die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kohlenstoffchemie auf ein Minimum abzusenken. Der über erneuerbare Energien gewonnene Wasserstoff kann als Hydrierwasserstoff genutzt werden. Ein weiteres vielversprechendes Einsatzgebiet für Wasserstoff ist die Gaskonditionierung zur Herstellung von Synthesegas mit geeigneter Zusammensetzung für anschließende Synthesen. Ist genügend Wasserstoff vorhanden, kann auf eine Shift-Reaktion verzichtet werden, was eine drastische Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach sich zieht.

Die Nutzung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien und dessen Einkopplung über elektrothermische und elektrochemische Prozesse in kohlenstoffgeführte Veredlungsketten ermöglicht völlig neue Perspektiven für eine CO<sub>2</sub>-arme Kohlenstoffchemie (Abb. 6). Die prinzipielle Durchführbarkeit eines chemischen Recyclings von CO<sub>2</sub> durch erneuerbare Energien wurde anhand zahlreicher Anwendungen bereits demonstriert. Ein erfolgreicher Technologietransfer in den Markt hängt davon ab, ob es gelingt, diese grundlegenden Ansätze in wirtschaftlich tragfähige Technologien zu überführen. Die Kosten zur Vermeidung, Abtrennung, Speicherung und zur stofflich-chemischen Nutzung einer Tonne CO<sub>2</sub> müssen geringer sein als der jeweilige Zertifikatpreis zur Emittierung derselben Menge.

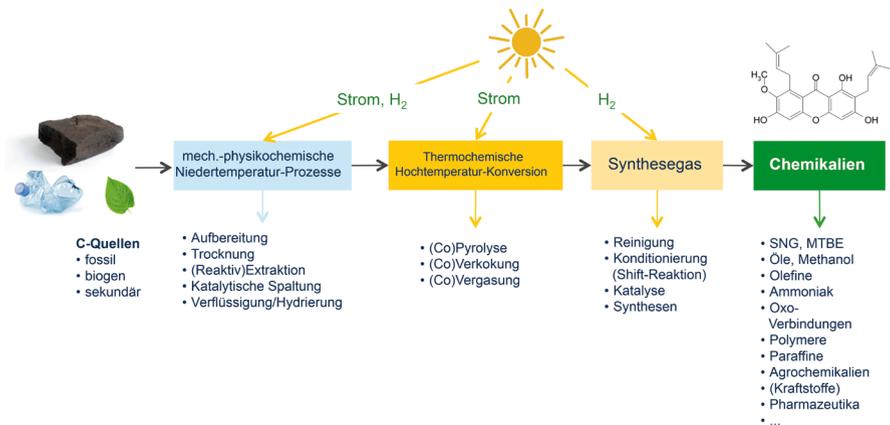


Abb. 6: Konsistenzstrategie am Beispiel einer kohlenstoffgeführten Veredlungskette unter innovativer Nutzung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien und Co-Nutzung biogener und sekundärer Kohlenstoffquellen zur Etablierung einer CO<sub>2</sub>-armen Kohlenstoffchemie.

Zur Methanisierung von einem Mol CO<sub>2</sub> über die Sabatier-Reaktion nach Gl. 6 werden vier Mole Wasserstoff benötigt. Zur Bereitstellung von vier Molen Wasserstoff über die Wasserspaltung nach Gl. 7 bedarf es einer Energiemenge von 2 mal 571 kJ/mol also 1.142 kJ/mol. Um eine Megatonne CO<sub>2</sub> mit Elektrolyse-Wasserstoff zu methanisieren, ist allein durch die Bereitstellung des Wasserstoffs eine Energiemenge von 7,217 TWh erforderlich. In dieser rein auf Thermodynamik basierenden Abschätzung ist noch nicht berücksichtigt, dass der Gesamtwirkungsgrad moderner Elektrolyseure bei etwa 70 % liegt. Werden darüber hinaus Umwandlungsverluste, spezifische Methanausbeuten sowie mögliche Katalysatordeaktivierungen und die Anlagenperipherie wie H<sub>2</sub>-Kompression auf 30 bar, Kühlung, Pumpen, Stromwandler usw. berücksichtigt, ergibt sich laut Herstellerangaben ein Strombedarf von 4,3–4,65 kWh/Nm<sup>3</sup> Wasserstoff.<sup>26</sup> Damit ergibt sich eine erforderliche Strommenge zur Methanisierung von 8,7–9,3 TWh pro Megatonne CO<sub>2</sub>. Würde man die gesamte für 2050 in Deutschland zu erwartende Menge an Überschussstrom von etwa 38 TWh<sup>27</sup> zur Methanisierung von CO<sub>2</sub> verwenden, so könnten damit circa 5,3 Mio. t CO<sub>2</sub> methanisiert werden. Das entspricht in etwa 0,5 % der im Jahr 2013 emittierten CO<sub>2</sub>-Menge von 951 Megatonnen.<sup>28</sup> Demzufolge hat die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Suffizienz- und Effizienzstrategien zur Absenkung des Primärenergieverbrauchs für Strom, Wärme und Transport gegenüber der stofflich chemischen Nutzung von CO<sub>2</sub> klare Priorität, da alle Maßnahmen zur Abtrennung, Reinigung, Speicherung und chemischen Umsetzung von CO<sub>2</sub> einen erheblichen zusätzlichen Energiebedarf bedeuten, der derzeit nur fossil abgedeckt werden kann.

Sabatier-Reaktion:  $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$  mit  $\Delta H = - 160 \text{ kJ/mol}$  (Gl. 6)

Wasserspaltung:  $2 \text{H}_2\text{O} = 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$  mit  $\Delta H = + 571 \text{ kJ/mol}$  (Gl. 7)

Darüber hinaus ist der Ressourcenverbrauch zur Herstellung regenerativer Energiesysteme zu berücksichtigen. Beispielsweise befinden sich in einem einzigen

---

26 ELB Elektrolysetechnik GmbH, »Druckelektrolyse. Auf dem LURGI System basierend«, [http://elektrolyse.de/wordpress/?page\\_id=38&lang=de](http://elektrolyse.de/wordpress/?page_id=38&lang=de) (18. 9. 2014).

27 Florian Ess u. a./Prognos AG, *Bedeutung der internationalen Wasserkraft-Speicherung für die Energiewende* (Studie im Auftrag des Weltenergieerat – Deutschland e. V.), Berlin 2012, S. 9, [http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/121009\\_Prognos\\_Bericht\\_Internationale\\_Speicherung\\_WEC\\_\\_9\\_Oktober\\_2012.pdf](http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/121009_Prognos_Bericht_Internationale_Speicherung_WEC__9_Oktober_2012.pdf) (18. 9. 2014).

28 Umweltbundesamt, *Treibhausgasausstoß im Jahr 2013 erneut um 1,2 Prozent leicht gestiegen. Kohlestrom erhöht die Emissionen – und gefährdet so das nationale Klimaschutzziel* (Presseinformation 10/2014), 10. 3. 2014, S. 1, <http://www.umweltbundesamt.de/presse/presseinformationen/treibhausgasausstoß-im-jahr-2013-erneut-um-12> (18. 9. 2014).

Windrad mit Direktantrieb im Permanentmagneten je nach Leistung mehrere hundert Kilogramm seltene Erden, vor allem Neodym und Dysprosium. Für einen Direktantrieb auf der Basis von Neodym-Eisen-Bor (NdFeB)-Magneten sind gegenwärtig näherungsweise 200 kg Neodym pro Megawatt installierter Leistung erforderlich.<sup>29</sup> Zum Betrieb einer modernen 5-MW-Anlage wird demnach eine Tonne Neodym benötigt. Die installierte Windleistung an Land und auf See soll bis 2020 auf zusammen circa 45.000 MW und bis 2050 auf 85.000 MW anwachsen.<sup>30</sup> Würden diese Windkraftanlagen aus Effizienzgründen vollständig mit einem Direktantrieb ausgestattet, so ergäbe sich ein Neodym-Bedarf von 170.000 t. Größter Neodymlieferant ist China, das seit einigen Jahren den Export begrenzt, sodass die Weltproduktion an Neodym im Rekordjahr 2009 bei circa 110.000 t lag.<sup>31</sup> Werden weltweit die Windkraftkapazitäten ausgebaut, kann der Bedarf an Neodym das Niveau der aktuellen Weltjahresproduktion erreichen und möglicherweise übersteigen. Infolge weltweit steigender Nachfragen und der Verringerung chinesischer Exporte wäre mit Lieferengpässen und starken Preisanstiegen zu rechnen. Darüber hinaus führt die Gewinnung von Neodym aufgrund der Vergesellschaftung mit radioaktiven Elementen wie Uran und Thorium zum Anfall signifikanter Mengen an radioaktiven Abfällen. Das ursprüngliche ›Energieproblem‹ wird so zu einem ›Rohstoffproblem‹ verschoben.

Hinzu kommt der raumgreifende Charakter erneuerbarer Produktionsweisen, wie z. B. bei nachwachsenden Rohstoffen. Hier wird eine Verringerung an CO<sub>2</sub>-Emissionen gegen den Verbrauch von Anbaufläche aufgewogen, obwohl, wie das folgende Beispiel zeigen soll, nachwachsende Rohstoffe nicht über das Substitutionspotenzial verfügen, um den Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie zu decken.

Gegenwärtig basiert die organische Chemieindustrie auf fossilen und nur zu einem geringen Teil auf nachwachsenden Kohlenstoffträgern. 2011 wurden

---

29 Studie trend:research – Institut für Trend- und Marktforschung, *Der Markt für Getriebe, Generatoren und Condition Monitoring Systeme für Windenergieanlagen bis 2020. Potenziale, Wettbewerber, Handlungsoptionen*, 2010; Peter Odrich, »Magnet-Rohstoff Neodym: China will nicht nur liefern, sondern verarbeiten«, in *ingenieur.de*, 27.3.2014, <http://www.ingenieur.de/Branchen/Rohstoffindustrie/Magnet-Rohstoff-Neodym-China-liefern-verarbeiten> (18.9.2014).

30 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und BMU (Hg.), *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*, Berlin 2010.

31 Keith R. Long u. a., *The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States – A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective* (Scientific Investigations Report 2010–5220), 2012, S. 13, Tab. 7, <http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5220/pdf/SIR2010-5220.pdf> (18.9.2014).

in Deutschland insgesamt 21,6 Mio. t Rohstoffe verarbeitet. Fossile Rohstoffe bilden derzeit mit rund 18,9 Mio. t das Rückgrat der organischen Basischemie (zum Vergleich: der gesamte Erdölverbrauch Deutschlands lag im Jahr 2013 bei rund 118 Mio. t<sup>32</sup>). Mit 15,2 Mio. t dominieren mit Abstand Erdölderivate, gefolgt von Erdgas mit 3,2 Mio. t und Kohle mit 0,4 Mio. t. Die Menge eingesetzter nachwachsender Rohstoffe liegt nur bei rd. 2,7 Mio. t.<sup>33</sup> Geht man von einem Kohlenstoffgehalt von 86,5 Massenprozent (Ma%) für Rohöl aus, beinhalten die 15,2 Mio. t Erdölderivate eine Kohlenstoffmenge von 13,2 Mio. t. Ohne Berücksichtigung von Umwandlungsverlusten könnte diese Kohlenstoffmenge bei einem angenommenen Kohlenstoffgehalt von 45 Ma%<sup>34</sup> für nachwachsende Rohstoffe durch rund 29 Mio. t derselben gedeckt werden. Selbst unter der optimistischen Annahme, dass die gesamte Anbaufläche nachwachsender Rohstoffe in Deutschland von rund 2,4 Mio. ha ausschließlich mit Silomais bewirtschaftet würde, entspräche das unter der Annahme eines Flächenertrages von 20 t Trockenmasse pro Hektar<sup>35</sup> und eines durchschnittlichen Kohlenstoffgehalts von 45 Ma% nur rund 75 % der oben genannten erforderlichen Kohlenstoffmenge von rund 29 Mio. t.

## Zusammenwirken der Nachhaltigkeitsstrategien

Im Fokus von Effizienz- und Suffizienzstrategien stehen quantitative, mengenbezogene Aspekte. Nach Huber können Effizienz- und Suffizienzstrategien allenfalls einen Beitrag zu Verbesserungen in der ökologischen Gesamtbilanzierung leisten. Begründet wird dies mit »Nischenausfüllung durch andere Akteure sowie infolge von Rebound-Effekten.«<sup>36</sup>

---

32 Statista, Erdölverbrauch in Deutschland in den Jahren von 1997 bis 2013 (in 1.000 Barrel pro Tag), <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1004/umfrage/entwicklung-des-oelverbrauchs-in-deutschland> (18. 9. 2014).

33 »Rohstoffe in der Chemischen Industrie«, in *CHEmanager* 13–14 (2013), <http://www.chemanager-online.com/news-opinions/grafiken/rohstoffe-der-chemischen-industrie> (18. 9. 2014).

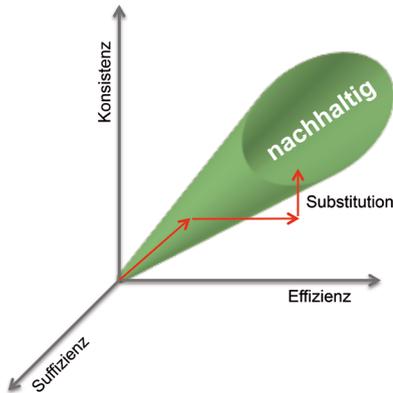
34 Martin Kaltschmitt, Hans Hartmann und Hermann Hofbauer (Hg.), *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Technik und Verfahren*, Heidelberg u. a. 2009.

35 Joachim Eder u. a., *Silomais als Biogassubstrat* (Fachinformationen Biogas Forum Bayern, Nr. 1 4/2012), S. 9, [http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/leitfaden\\_2012-04\\_biogasforum.pdf](http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/leitfaden_2012-04_biogasforum.pdf) (18. 9. 2014).

36 Joseph Huber, »Industrielle Ökologie: Über Konsistenz, Effizienz und Suffizienz«, in Rolf Kreibich und Udo E. Simonis (Hg.), *Global Change – Globaler Wandel. Ursachenkomplexe und Lösungsansätze. Causal Structures and Indicative Solutions*, Berlin 2000,

Die Effizienzstrategie ist ihrem Charakter nach eine Aufwandsoptimierung technologischer Prozesse, bei der ein Minimum des Input-Output-Verhältnisses angestrebt wird. Obwohl Effizienzstrategien fester Bestandteil einer industriellen Ökologie sein können, bilden sie nur eine Facette dieser mit insgesamt nachrangigem Stellenwert ab.<sup>37</sup> Das Spannungsverhältnis zwischen Ökonomie und Ökologie kann durch Effizienzstrategien gemindert aber nicht aufgehoben werden.

Mit Suffizienzstrategien soll der absolute Verbrauch von Ressourcen gesenkt werden. Vor dem Hintergrund der globalen Bevölkerungsentwicklung und des damit verbundenen notwendigen industriellen Wachstums erscheint dies zunächst fragwürdig. Bezogen auf die Übernutzung fossiler Kohlenstoffressourcen und die begrenzte Aufnahmefähigkeit der Umwelt als CO<sub>2</sub>-Senke kann eine deutliche Einschränkung bzw. der Verzicht auf die gegenwärtige energetische Hauptnutzungsform fossiler Kohlenstoffträger aber durchaus zum Sachzwang werden. Dies erfordert eine neue Qualität im Umgang mit den Ressourcen, die allein durch Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen nicht erreichbar ist. Vielmehr geht es um die Entwicklung naturangepasster Stoff- und Energieströme, bei denen sich die Potenziale der Quellen und Senken in einem ausgewogenen Verhältnis, d. h. im Gleichgewicht befinden. Diese Überlegungen finden ihren Ausdruck in Konsistenzstrategien. Die qualitative Transformation der industriellen Stoff- und Energieströme bezeichnet Huber als Konsistenz. »Konsistenz stellt die Frage nach der qualitativen Beschaffenheit des industriellen Metabolismus.



- **Suffizienzstrategie**
  - Verbrauchsreduzierung
  - Verhaltensänderungen
- **Effizienzstrategie**
  - Steigerung der Ressourcenproduktivität → Input/Output-Minimum
- **Konsistenzstrategie**
  - Naturangepasste Stoffkreisläufe
  - Substitution mit erneuerbaren Energien
  - Nutzung biogener und sekundärer Kohlenstoffträger

Abb. 7: Zusammenwirken der Nachhaltigkeitsstrategien zur Etablierung einer Low Carbon Economy (In Anlehnung an Bauer, Industrielle Ökologie (Fn. 6), S. 70).

S. 107–124, hier S. 119.

<sup>37</sup> Ebd., S. 111.

Dem Konsistenz-Ansatz geht es nicht um ein Mehr oder Weniger vom Gleichen, sondern um grundlegendere Formen des Strukturwandels im Rahmen einer ökologischen Modernisierung.«<sup>38</sup>

Jede der in Abb. 7 dargestellten Strategien hat für die Etablierung einer Low Carbon Economy ihre Bedeutung, aber auch Grenzen. Effizienz- und Suffizienzstrategien sind quantitativer Natur, bei den Konsistenzstrategien stehen qualitativ neue Möglichkeiten der Rohstoffnutzung im Vordergrund. Insofern bedingen und ergänzen sich die Strategien. Die einseitige Entwicklung bzw. Überbetonung einzelner Strategien führt zwangsläufig dazu, dass der Nachhaltigkeitsbereich (Kegel) verlassen wird. Werden die thermodynamischen Grenzen eines Prozesses erreicht, so sind Effizienz- bzw. Suffizienzsteigerungen nicht mehr zielführend und diese Technologien müssen durch Anwendung von Konsistenzstrategien substituiert werden.

## Fazit

Der vorliegende Beitrag versucht, ausgehend von grundlegenden Ansätzen der industriellen Ökologie und des industriellen Metabolismus die Nachhaltigkeitsstrategien Suffizienz, Effizienz und Konsistenz auf die Transformation einer kohlenstoffintensiven in eine CO<sub>2</sub>-arme Wirtschaft anzuwenden und die relevanten technologischen Methoden zu systematisieren. Suffizienz-, Effizienz- und Konsistenzstrategien erfordern zu deren Umsetzung spezifische Technologieinnovationen, individuelle und kollektive Verhaltensregulation und die institutionelle Organisation und Steuerung der Ausgestaltung einer nachhaltig naturintegrierten Gesellschaft. Den Bedarf an Primärenergie in Deutschland bis 2050 gegenüber 2008 zu halbieren und die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 bis 95 % bis 2050 gegenüber 1990 abzusenken, erfordert einen strukturellen Umbau der Energieversorgung und Basisinnovationen im Bereich der Energietechnologien.<sup>39</sup>

Durch Suffizienz-, Effizienz- und Konsistenzstrategien muss das wachsende Potenzial erneuerbarer Energien und nachwachsender bzw. sekundärer Rohstoffe in völlig neuer Weise ausgeschöpft werden. Diese Qualitätsänderung kann nur durch die Umsetzung von Konsistenzstrategien erreicht werden, da Suffizienz- und Effizienzstrategien lediglich auf eine mengenmäßige Optimierung bereits etablierter Systeme fokussieren. Im Beitrag wird die vornehmlich isoliert debattierte Frage der Umsetzung der Energiewende in Deutschland in

---

38 Ebd.

39 BMWi und BMU, Energiekonzept (Fn. 29).

einen größeren Zusammenhang gerückt, der ihren Bezug zum Stoff und zu den insgesamt eingesetzten Ressourcen herstellt. Durch die naturgesetzliche Kopplung von Energie und Stoff wird, jedenfalls mittel- und längerfristig, mit der Energiewende eine Rohstoffwende herbeigeführt, die den Übergang von primären zu nachwachsenden und sekundären Rohstoffen einschließt. Und schließlich eröffnet der erst seit wenigen Jahren verfügbare regenerative Strom in wachsendem Maße die Möglichkeit der Einkopplung in Stoffwandlungsprozesse, wodurch sich eine Ressourcenwende abzeichnet, die im Kern nichts anderes darstellt als die Transformation der derzeit dominierenden energetischen hin zu einer stofflichen Nutzung primärer und sekundärer Rohstoffe und die Schließung von Stoffkreisläufen unter drastischer Reduzierung bzw. weitestgehender Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Alle Nachhaltigkeitsstrategien haben aber auch technische, ökologische und wirtschaftliche Grenzen bzw. können durch entgegenwirkende Effekte kompensiert werden. So können z. B. Verbrauchsreduzierungen über Suffizienz- oder Effizienzsteigerungen teilweise oder vollständig durch Rebound- bzw. Ausgleichseffekte aufgehoben werden. Mit der Umsetzung von Konsistenzstrategien sind mitunter erhebliche technische und wirtschaftliche Konsequenzen verbunden, wobei qualitative Veränderungen von Stoffströmen zu Problemverschiebungen in völlig andere Technologiebereiche führen können.

Damit gehört die Etablierung einer Low Carbon Economy zu den vielschichtigsten und komplexesten Herausforderungen, denen sich eine Industriegesellschaft derzeit überhaupt stellen kann. Wenn es aber gelingt, eine nachhaltige Energie- und Rohstoffversorgung auf der Basis erneuerbarer Energien und nachwachsender bzw. sekundärer Rohstoffe zu etablieren, so eröffnen sich mit den, historisch gesehen, neuen Gestaltungsoptionen für eine Ressourcenwende völlig neue technologische Zugänge für eine Low Carbon Economy. Alternativen zu traditionellen Industrieprozessen entstehen z. B. in der Energietechnik, der Metallurgie und bei der Erzeugung von Kohlenwasserstoffen. Werkstoffentwicklung, Maschinen- und Anlagenbau, physikalische Technologien und insbesondere das stoffliche Recycling moderner Industrieprodukte werden wichtige Innovationsimpulse erhalten.

Deutschland als einem führendem Technologieland und Initiator der Energiewende kommt bei der Transformation einer kohlenstoffintensiven Wirtschaft in eine Low Carbon Economy eine Führungsposition zu. Sollte es Deutschland durch die Umsetzung von Nachhaltigkeitsstrategien gelingen, seinen weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionsanteil von derzeit etwa 2 % auf nahezu Null abzusenken, so ist das globale Ressourcen- und Klimaproblem keinesfalls gelöst, aber das Signal, dass eine Low Carbon Economy tatsächlich wirtschaftlich tragfähig funktionieren kann, wird international Wirkung entfalten.