

**IZT-Text 3-2018**

# Feedstock Change in der Chemieindustrie



## IZT-Text 3-2018

# Feedstock Change in der Chemieindustrie

Autor

Siegfried Behrendt

Berlin, 2018

Der vorliegende Beitrag entstand im Forschungsprojekt „Evolution2Green - Transformationspfade zu einer Green Economy: den Pfadwechsel gestalten“. Das Projekt wurde von adelphi gemeinsam mit dem IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung und dem Borderstep Institut im Rahmen des vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Schwerpunktprogramms "Nachhaltiges Wirtschaften" der Sozial-Ökologischen Forschung durchgeführt (SÖF; Förderkennzeichen FKZ 01UT1407).



© 2014 IZT - Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie.  
Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-941374-37-9

Herausgeber:

IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH,  
Schopenhauerstr. 26, 14129 Berlin  
Tel.: 030-803088-0, Fax: 030-803088-88, E-Mail: [info@izt.de](mailto:info@izt.de)

Coverabbildung: © Adobe Stock / 史男 野本 #214092277 und Jürgen Fälchle #51599612

## Kurzfassung

Die vorliegende Transformationsfeldanalyse wurde im Rahmen des Projekts „Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy: den Pfadwechsel gestalten“ angefertigt. Als eine von vier Studien aus dem Bereich Rohstoffe untersucht sie die Möglichkeiten für einen „Feedstock Change in der Chemieindustrie“. Das Papier beschreibt das Transformationsfeld sowie beteiligte Akteure. Im Rahmen der Untersuchung wurden Pfadabhängigkeiten identifiziert, die eine Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise verhindern, sowie relevante Transformationsansätze analysiert.

Ein Feedstock Change in der Chemieindustrie, also ein Wechsel der Rohstoffbasis weg von Erdöl hin zu nachwachsenden Rohstoffen, findet bis dato nicht statt. Zwar verläuft die Entwicklung auf dem Gebiet der Spezial- und Feinchemikalien positiv, Basischemikalien, die die großen Stoffströme der Chemieproduktion ausmachen, werden bisher aber nur selten biobasiert hergestellt. Ein Feedstock Change ist vor allem mit folgenden Pfadabhängigkeiten konfrontiert:

- Niedrige Preise für Erdöl ermöglichen eine günstige Rohstoffbasis. Daran hat sich die Chemieindustrie gewöhnt.
- Chemiefirmen nutzen Erdöl steuerbegünstigt, wenn sie daraus Chemikalien herstellen.
- Eine umfassende „Förderkulisse“ auf EU- und nationaler Ebene präferiert die energetische Nutzung von Biomasse. Trotz politischen Vorrang und trotz erheblicher F+E- Förderung stagniert die stoffliche Nutzung von Biomasse, während die energetische Nutzung expandiert.
- Für die chemische Industrie sind vielstufige und vielfach verzweigte Wertschöpfungsketten kennzeichnend. Die Chemieindustrie kann daher die Produktion von Basis-Chemikalien nicht einfach umstellen.
- Außer Erdöl stehen andere fossile Rohstoffe der Chemieindustrie noch lange Zeit zur Verfügung. Darauf könnte die chemische Industrie eher zurückgreifen als auf alternative Rohstoffquellen.
- Die Nachfrage nach Erdöl in der Chemieindustrie hat ein Niveau erreicht, dass ein vollständiger Umstieg auf Biomasse schon aufgrund der erforderlichen Mengenströme nicht absehbar ist. Biomasse könnte mittel- und langfristig sogar deutlich knapper werden als Erdöl.

Wahrscheinlich verläuft der Rohstoffwandel zukünftig inkrementell, Zug um Zug wird Erdöl durch nachwachsende Rohstoffe ergänzt und ersetzt; der Wandel könnte aber deutlich an Dynamik gewinnen, wenn die Umfeldbedingungen dies erfordern. Hinzu kommt, dass die Knappheit des Angebots an Biomasse nur unter Inkaufnahme von ökologischen Nebeneffekten stark ausgeweitet werden kann. Der Umstieg auf eine bio-basierte Chemie ist daher nicht nur ein „bloßes“ technologisches und wirtschaftliches Substitutionsproblem, vielmehr hängt ein nachhaltiger Feedstock Change entscheidend von der sozial-ökologischen Konfiguration und Einbettung in natürliche Systeme ab.

## Abstract

The present analysis was carried out as part of the project “Evolution2Green – Transformation Pathways towards a Green Economy: Shaping Path Change”. As one out of four studies regarding the field of resources, it investigates the transformation field “Feedstock change in the chemical industry”. The paper describes the transformation field as well as relevant players. Path dependencies that hinder

the transformation towards a sustainable economy have been identified, and relevant transformation approaches analysed.

Until now, a feedstock change in the chemical industry (that is, a shift in the resource base from oil to renewable resources) cannot be observed. While there is positive development in the field of fine chemicals and specialty chemicals, basic chemicals (which comprise the high mass streams in the chemical industry) are rarely won from renewable sources. The following path dependencies affect a feedstock change:

- Low prices for oil allow for a cheap resource base. The chemical industry has adapted to this.
- The chemical companies are being granted tax subsidies on oil used for the production of chemicals.
- A large number of funding programs on EU and national level prioritize the energetic use of biomass. Although there is a political priority on the material use of biomass and a lot of funding has gone into R&D, material use of biomass remains stagnant, while energetic use expands.
- Within the chemical industry, multi-stage and strongly branched value chains are characteristic. Therefore, changes in the production processes of basic chemicals cannot be easily implemented.
- Apart from oil, there are other fossil resources still available to the chemical industry for a long time. Those could more easily be used than alternative resources.
- The demand for oil in the chemical industry has reached a level at which a complete shift toward the use of biomass as a resource base cannot be expected due to the needed mass streams. Rather, biomass could be much more limited in supply in the mid- to long-term than oil.

It can be expected that the shift in the resource base will be incremental. Gradually, oil will be supplemented and substituted by renewable resources. This change could happen much quicker, though, if it was required by external conditions. Strongly expanding the limited supply of biomass would cause environmental side effects. Therefore, the shift towards a bio-based chemistry is not solely a technical and economical problem of substitution; a sustainable feedstock change rather depends strongly on the socio-ecological configuration and the interplay with environmental systems.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Transformationsfeld</b> .....	<b>8</b>
1.1 Feedstock Change in der Chemieindustrie .....	8
1.2 Akteure .....	9
1.2.1 Wirtschaft .....	9
1.2.2 Politik .....	10
1.2.3 Zivilgesellschaft .....	11
1.3 Historische Entwicklung .....	12
1.4 Umweltwirkungen .....	14
<b>2 Pfadabhängigkeiten</b> .....	<b>15</b>
2.1 Charakterisierung der Stärken des etablierten Pfades .....	15
2.2 Pfadabhängigkeiten .....	16
2.2.1 Rechtliche Pfadabhängigkeiten .....	16
2.2.2 Ökonomische Pfadabhängigkeiten .....	17
2.2.3 Technologische Pfadabhängigkeiten .....	18
2.2.4 Organisationale Pfadabhängigkeiten .....	18
2.2.5 Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten .....	19
2.3 Eingriffspunkte und Schwächen des etablierten Pfades .....	20
<b>3 Transformationsansätze</b> .....	<b>21</b>
3.1 Nachhaltige Erzeugung und Bereitstellung nachwachsender Rohstoffe .....	21
3.2 Integrierte Prozesse und neue Wertschöpfungsnetze .....	21
3.3 Optimierung bestehender und neue Bioproduktionssysteme .....	22
3.4 Bewertung .....	23
<b>4 Fazit und Möglichkeiten für einen Pfadwechsel</b> .....	<b>24</b>
4.1 Pfadabhängigkeiten .....	24
4.2 Auswirkungen der Pfadabhängigkeiten auf die Transformationsansätze .....	25
4.3 Handlungsempfehlungen .....	26
<b>Experteninterviews</b> .....	<b>30</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>31</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sozio-technisches Regime im Bereich der biobasierten Wirtschaft .....	9
Abbildung 2: Etablierter Pfad .....	15
Abbildung 3: Feedstock Change der Chemieindustrie .....	27

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entwicklung der stofflichen Märkte für nachwachsende Rohstoffe .....	8
Tabelle 2: Auswirkungen der Pfadabhängigkeiten auf Transformationsansätze.....	26

## Abkürzungsverzeichnis

DECHEMA	Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.
DIB	Biotechnologievereinigung des Verbandes der Chemischen Industrie e.V. (VCI) und seiner Fachverbände
VCI	Verband der Chemischen Industrie e.V

# 1 Transformationsfeld

## 1.1 Feedstock Change in der Chemieindustrie

Ein struktureller Wandel beim Rohstoffeinsatz in der chemischen Industrie wird seit längerem unter dem Stichwort „Feedstock Change“, das heißt Substitution fossiler durch nachwachsende Rohstoffe, diskutiert. Biopolymere, Naturfaser- und Holzverbundwerkstoffe, Hochleistungsschmierstoffe sowie biobasierte Produkte aus der industriellen Biotechnologie und der chemischen Biomassekonversion sind ein Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt der chemischen Industrie. Tatsächlich findet ein Feedstock Change bis dato nicht statt. Zwar verläuft die Entwicklung auf dem Gebiet der Spezial- und Feinchemikalien durchaus positiv, Basischemikalien, die die großen Stoffströme der Chemieproduktion ausmachen, werden aber nur selten biobasiert hergestellt. Der Anteil der Biomasse am insgesamt eingesetzten organischen Feedstock verharrt bei rund 13 Prozent (knapp 3 Mio. t/a).

Die Marktentwicklung der nachwachsenden Rohstoffe in Deutschland zeigt folgende Tabelle. Sie basiert auf Einschätzungen der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe.

Tabelle 1: Entwicklung der stofflichen Märkte für nachwachsende Rohstoffe

Markt	Gesamtmarkt in 2011	Nawaro-Marktgröße in 2011	Nawaro-Marktgröße in 2004	Wichtige Rohstoffe	Außenhandel	Marktentwicklung in D bis 2020
Chemikalien	32,5 Mio. t*	1,66 Mio. t Rohstoffe	2,1 Mio. t Rohstoffe	Cellulose, Öle und Fette, Zucker, Stärke	Produktionsaufbau im Ausland, vollständiger Import Chemiezellstoff	→
Kunst- und Werkstoffe	20,7 Mio. t	90.000 t Rohstoffe	112.420 t Rohstoffe	Stärke, Rizinusöl, Naturfasern	Rohstoffe außer z.T. Stärke weitgehend aus Ausland (Rizinus, Maisstärke, Baumwolle)	↗
Schmierstoffe	1 Mio. t	9.000 - 30.000 t	7.100 t	Pflanzenöle, tierische Fette	Palm- und Sojaölimporte	↗
Wasch- und Körperpflegemittel	2 Mio. t	516.000 - 550.000 t	234.600 - 405.000 t**	Palmöl, Palmkernöl, Kokosnussöl, tierische Fette, Getreide, Zuckerrüben, Melasse	sehr hoher Anteil von Importen	→
Papier, Pappe und Kartonage	19,6 Mio. t	6,3 Mio. t Holz-, Papier- und Chemiezellstoff, Stärke	6,9 Mio. t Holz- und Zellstoff, Stärke	Holz, Stärke	Nettoimporte von Zellstoff, Nettoexporte von Papier und Papierprodukten	→
Bauen und Wohnen	30,3 Mrd. €	53,7 Mio. m <sup>3</sup> Holz (Säge- und Holzwerkstoffindustrie)	n. v.	Holz, Leinöl, Faserpflanzen	spielt in allen Marktsegmenten eine Rolle	↗
Pharmazeutische Produkte	1,5 Mrd. € (Phytopharmaka)	30.800 t Rohdrogen	22.000 t Rohdrogen	Arzneipflanzen (Fenchel, Kamille, Pfefferminze)	Importe dominieren bei Drogen, Exporte von Halb- und Fertigprodukten	→

→ - Märkte bleiben konstant, ↗ - Märkte wachsen

Quelle: [http://fnr.de/marktanalyse/15\\_zf\\_stofflich.html](http://fnr.de/marktanalyse/15_zf_stofflich.html)

## 1.2 Akteure

Die Transformation der Chemieindustrie auf eine Rohstoffbasis ohne Öl involviert eine große Anzahl von Akteuren. Da sind erstens wirtschaftliche Akteure im Bereich der Chemieindustrie im engeren Sinne und Akteure in zahlreichen Wertschöpfungsketten, die für die Chemieindustrie die Rohstoffe liefert und für die die chemische Industrie selbst die Basis bildet. Zweitens sind da die Akteure im Bereich der Politik, die über politische Strategien und rechtliche Anforderungen bis hin zur Forschungs- und Entwicklungsförderung zentrale Rahmenbedingungen für ein Business as usual oder aber für einen strukturellen Wandel in der Chemieindustrie festlegen. Drittens sind Akteure der Zivilgesellschaft bedeutsam, insbesondere Umweltverbände und entwicklungspolitische Initiativen, die sich an dem Diskurs um einen Feedstock Change beteiligen.

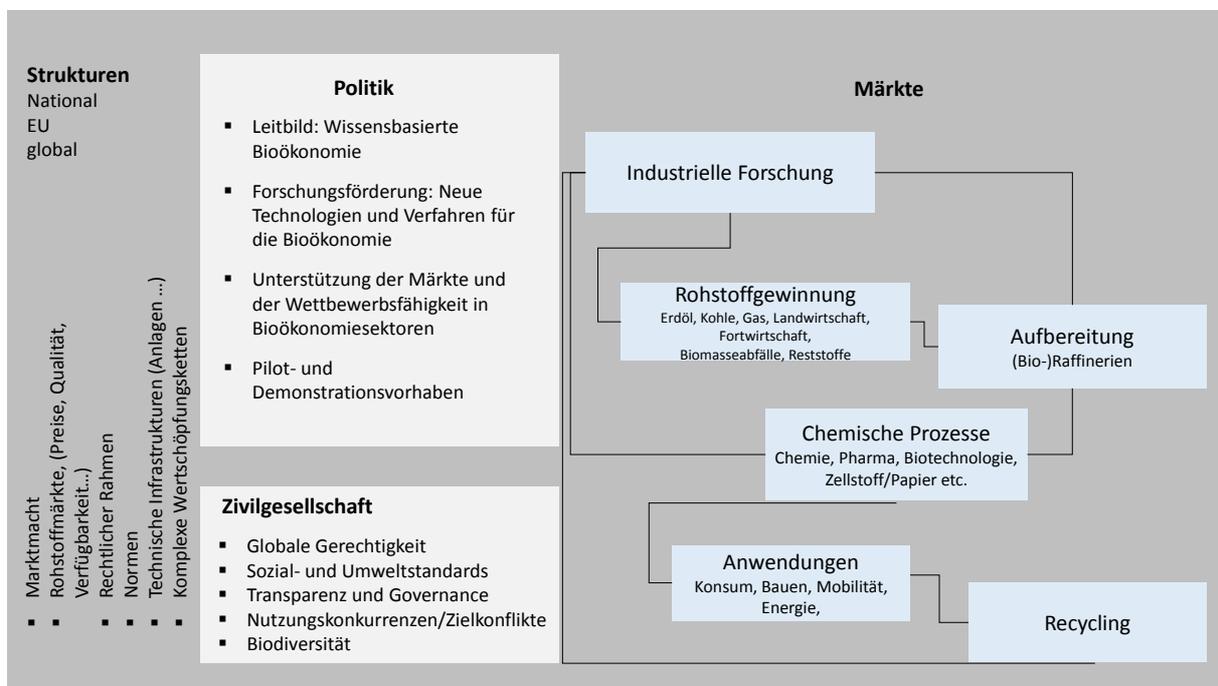


Abbildung 1: Sozio-technisches Regime im Bereich der biobasierten Wirtschaft

Quelle: eigene Darstellung

### 1.2.1 Wirtschaft

Die Chemieindustrie ist keine homogene Gruppe. Sie beinhaltet zum einen die Basischemie mit anorganischen Grundstoffen, Petrochemikalien, organischen Zwischenprodukten, Standardpolymeren und Düngemitteln. Zum anderen gibt es die Feinchemie und Hersteller von Spezialchemikalien, darunter Farben und Lacke, Pflanzenschutzmittel, Spezialkunststoffe und Konsumchemikalien. Sie stellen mit jeweils ca. 40 Prozent den größten Anteil an der deutschen Chemieproduktion. Die restlichen 20% sind Pharmazeutika. Die breite Aufstellung bedingt, dass die Chemie mit Akteuren in nahezu allen Branchen in engen Wertschöpfungsketten verknüpft ist.

Rohstoffseitig bezieht die Chemieindustrie aus der Erdöl verarbeitenden Industrie in Deutschland und Europa vor allem Naphta (Rohbenzin), während in anderen Regionen der Welt insbesondere Ethan

und Propan als Rohstoff fungieren. Das nach Deutschland importierte Erdöl kommt zu 60 Prozent von Unternehmen aus der Russischen Föderation, Großbritannien und Norwegen. Erdgas macht rund 8 Prozent der Rohstoffversorgung für die Chemie in Deutschland aus. Weitere Basis sind mit 13 Prozent die nachwachsenden Rohstoffe. Die Bereitstellung nachwachsender Rohstoffe erfasst eine Vielzahl von Akteuren in Branchen wie Land- und Forstwirtschaft, Fischerei und Aquakulturen sowie Pflanzen- und Tierzucht.

Um organische Moleküle aus nachwachsenden Rohstoffen statt aus Erdöl herzustellen, spielt die industrielle Biotechnologie eine besondere Rolle. Die industrielle Biotechnologie nutzt Mikroorganismen oder Enzyme für die industrielle Stoffproduktion. Zu den Produkten gehören Chemikalien, Lebensmittel, Agrar- und Pharmaprodukte, Hilfsstoffe für die verarbeitende Industrie, zunehmend auch Treibstoffe. Die industrielle Biotechnologie setzt auch auf nachwachsende Rohstoffe, die zum Beispiel mit Hilfe von biologischen Katalysatoren in wertveredelte Chemieprodukte umgewandelt werden. In Deutschland sind rund 600 Unternehmen im Geschäftsfeld der industriellen Biotechnologie tätig. Neben diesen kleinen und mittleren Unternehmen kommen große Unternehmen und Konzerne der Chemieindustrie hinzu. Dabei ist erkennbar, dass biotechnologische Prozessabläufe zunehmend in Bereiche der chemischen Industrie integriert werden.

Die chemische Industrie und die chemischen Fachgesellschaften haben verschiedene Positionspapiere zum Wandel der Rohstoffbasis vorgelegt (DECHEMA, GGCh, VCI, DGMK, 2010; VCI 2015: VCI, DIB 2011: VCI, BIB 2014). Demzufolge ist die „Diversifizierung der Rohstoffbasis ein zentrales Element der Rohstoffstrategie der chemischen Industrie. Dazu gehört auch der Einsatz nachwachsender Rohstoffe. Innovationen werden als der wesentliche Hebel für einen erweiterten stofflichen Einsatz nachwachsender Rohstoffe angesehen. Staatliches Handeln sollte sich daher aus Sicht der chemischen Industrie auf die verstärkte Förderung von Forschung und Entwicklung konzentrieren, bestehende Handelshemmnisse sollten abgebaut werden, um nachwachsende Rohstoffe zu wettbewerbsfähigen Weltmarktpreisen bekommen zu können. Mit Blick darauf werden aus heutiger Sicht der Chemieindustrie „fossile Rohstoffe auch in Zukunft der wichtigste Bestandteil im Rohstoffmix der chemischen Industrie bleiben“ (VCI-Positionspapier 12. Mai 2015). Politische Zielvorgaben für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe werden abgelehnt, der Rohstoffwandel sollte vielmehr marktgetrieben sein.

### 1.2.2 Politik

Auf Ebene der Politik wird die Transformation der Rohstoffbasis der chemischen Industrie -national und international- in Form zahlreicher politischer Initiativen angestoßen. Angestrebt wird eine „Bioökonomie“, die biologische Ressourcen produziert, be- und verarbeitet oder in irgendeiner Form nutzt (Bioökonomierat 2010). Weltweit verfolgen mehr als 50 Staaten, darunter Deutschland, sowie die EU Konzepte der Bioökonomie.

Auf EU-Ebene wurde ein **gemeinsames Technologieunternehmen für biobasierte Industriezweige gegründet** (BBI).<sup>1</sup> Die Basis hierfür liefert die strategische Innovations- und Forschungsagenda, die von dem Konsortium für biobasierte Industriezweige (BIC) auf der Grundlage einer Konsultation der öffent-

<sup>1</sup> Verordnung (EU) Nr. 560/2014 des Rates vom 6. Mai 2014 zur Gründung des Gemeinsamen Unternehmens für biobasierte Industriezweige.

lichen und privaten Interessenträger entwickelt wurde. Damit das Unternehmen sein Ziel erreicht, sollen Forschungs- und Innovationstätigkeiten gefördert und Ressourcen aus dem öffentlichen und dem privaten Sektor eingesetzt werden. Der deutsche Bundesrat hält dies allerdings nur für akzeptabel, wenn dabei alle Möglichkeiten für eine größtmögliche Transparenz sowie Einwirkungsmöglichkeiten zugunsten der Mitgliedstaaten genutzt werden. In seiner Stellungnahme fordert der Bundesrat außerdem Nachhaltigkeitskriterien, die sicherstellen, dass das Arbeitsprogramm des Gemeinsamen Unternehmens BBI der Bedeutung der Biomasse für die biologische Vielfalt, den natürlichen Lebensmittelversorgungsketten und dem Lebensmittelbedarf der Menschen Rechnung tragen muss. Weiterhin fehle die verbindliche Einbeziehung von unabhängigen Experten und Akteuren aus den Bereichen Agrar und Umwelt in den vorgesehenen Gremien des BBI wie zum Beispiel dem Verwaltungsrat oder dem Wissenschaftlichen Beirat (Bundesrat Drucksache 589/13).

Politische Impulse für einen Rohstoffwandel gehen auch von internationalen politischen Initiativen aus. So fordern die **G7-Staaten** unter Bezug auf den Klimaschutz die Abkehr von Erdöl, Erdgas und Kohle bis zum Ende des Jahrhunderts. Die **UN-Klimakonferenz in Paris 2015** beschloss ein Abkommen, das die Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius, möglichst 1,5 Grad Celsius, vorsieht. Um dieses Ziel erreichen zu können, müssen die globalen Nettotreibhausgasemissionen zwischen 2045 und 2060 auf Null zurückgefahren werden. Praktisch bedeutet dies eine Dekarbonisierung, die auch die Rohstoffbasis der Chemieindustrie beeinflusst und eine Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe erfordert (Lahl 2012). Einen nachhaltigen Handlungskorridor für die Bioökonomie hat das **International Panel on Climate Change (IPCC) der UN** in seinem 2012 erschienenen „Special Report Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation“ (SRREN) aufgezeigt:

„In order to achieve the high potential deployment levels of biomass for energy, increases in competing food and fibre demand must be moderate, land must be properly managed and agricultural and forestry yields must increase substantially. Expansion of bioenergy in the absence of monitoring and good governance of land use carries the risk of significant conflicts with respect to food supplies, water resources and biodiversity, as well as a risk of low GHG benefits. Conversely, implementation that follows effective sustainability frameworks could mitigate such conflicts and allow realization of positive outcomes, for example, in rural development, land amelioration and climate change mitigation, including opportunities to combine adaptation measures.“ (zit. nach Lahl 2012)

### 1.2.3 Zivilgesellschaft

Die Entwicklung einer biobasierten Wirtschaft wird von einer zivilgesellschaftlichen Diskussion begleitet. Beteiligt sind Vertreter von Umwelt- und Naturschutz, Verbraucherschutz und Menschenrechten (z.B. NABU). Seit kurzem taucht das Stichwort Bioökonomie auch in den entwicklungspolitischen Diskussionen hierzulande auf (z.B. FDCL). Die Debatten machen auf offene Fragen und Defizite der politischen Strategien und Förderprogramme zur biobasierten Ökonomie aufmerksam. Wesentliche Aspekte der Bioökonomie, wie die Frage nach den Bedingungen der Bereitstellung von Ökosystemdienstleistungen bleiben unberücksichtigt. Faktisch fokussiert das Konzept der „Bioökonomie in dem Sinne auf einen Paradigmenwechsel, als es vorrangig darum geht, die neuen technologischen Möglichkeiten (insbesondere auf der molekularen und genetischen Ebene) für industrielle Prozesse zu nutzen“ (Petschow 2011). So wird darauf hingewiesen, dass offen ist, wie die Biodiversität durch verstärkte Nutzung nachwachsender Rohstoffe gesichert oder wie ein gerechter Zugang zu Ressourcen, der in politischen Strategien betont wird, garantiert werden kann. So wird befürchtet, dass das Patentregime

die Machtkonzentration im Norden verstärkt und damit „das alte Schema des Südens als Rohstofflieferant reproduziert“ (Fatheuer 2015). Außerdem fehle es an Konzepten, wie die Zielkonflikte, die auf konkurrierenden Landnutzungsinteressen beruhen, gelöst werden können.

Vor diesem Hintergrund fordert ein Europäisches Bündnis von kleinbäuerlichen Bewegungen und Nichtregierungsorganisationen aus dem Bereich Entwicklung, Umwelt und Menschenrechte einen grundlegenden Kurswechsel der offiziellen Bioökonomie-Strategien, die von der EU und einigen ihrer Mitgliedsländer vorangetrieben werden. Das Bündnis kritisiert, dass „solche Strategien das Risiko von kontraproduktiven, falschen Lösungen für die globale Klima-, Energie- und Ernährungskrise in sich bergen, die insbesondere im Globalen Süden Umwelt und Ressourcenkonflikte verschärfen können“ (FDCL 2015a). Das Forschungs- und Dokumentationszentrum Chile Lateinamerika (FDCL) konstatiert ein „Green Grabbing“ im Kontext der Bioökonomie (FDCL 2015a). Kritisiert wird u.a. auch, dass der Natur- und Umweltschutz in relevanten Initiativen von Politik, Forschung und Industrie bislang weder von der zivilgesellschaftlichen noch von der wissenschaftlichen Seite adäquat vertreten sei. Vielmehr dominierten Industrie und technologisch orientierte Wissenschaft. Konkret gemeint ist beispielsweise die EU-Verordnung über das gemeinsame Unternehmen "Biobasierte Industriezweige" (COM (2013) 496 final). „Wer die Interessen der Verbraucher, des Naturschutzes und der Landwirtschaft absichert, ist völlig unzureichend gewährleistet. Im EU-Konsortium sind Natur- und Umweltschutz weder von der zivilgesellschaftlichen noch von der wissenschaftlichen Seite vertreten“, so der NABU auf seiner Website; er betont deshalb, dass „die als allgemein anerkannte, zentrale gesellschaftliche Herausforderung sehr viel demokratischer und transparenter gestaltet werden muss“ (NABU 2015b). Deshalb unterstützt der NABU Bundesverband den Bundesrat in seiner Kritik an der EU-Verordnung (Drucksache 589/13 11.10.13) und fordert wie der Bundesrat „die Einbeziehung von Experten aus Natur- und Umweltschutz in den gesamten Prozess der gemeinsamen Technologieentwicklung von der Planung bis zur Evaluation“.

### 1.3 Historische Entwicklung

Nachwachsende Rohstoffe spielten bei der Entstehung der chemischen Industrie im 19. Jahrhundert eine wichtige Rolle. Sie wurden zunächst von Kohle abgelöst, seit Mitte des 20. Jahrhunderts dominiert Erdöl. Es verblieb ein stabiler Anteil nachwachsender Rohstoffe bei rund 10 Prozent des Feedstocks (in Deutschland liegt dieser Anteil bei 13 Prozent). Nachwachsende Rohstoffe kommen aufgrund ihrer Vorteile durch die Nutzung der Syntheseleistung der Natur für spezielle Molekülstrukturen besonders bei der Herstellung von Spezialchemikalien zum Einsatz. „Dies gilt sowohl für die Vielzahl oleochemischer Produkte auf der Basis von Stärke und Cellulose; hinzu kommt Zucker, von dem ein erheblicher Anteil in der Weißen Biotechnologie als Fermentationsrohstoff Verwendung findet. Als ein weiterer Rohstoff kommt durch die stark gestiegene Biodieselproduktion das Glycerin hinzu“ (GDCh 2010).

Heute wird vor allem versucht, politikgetrieben eine biobasierte Wirtschaft zu entwickeln. In Deutschland relevant ist z.B. der Förderschwerpunkt „Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz“ vom Bundesforschungsministerium, das Forschungsvorhaben zur Erweiterung der Rohstoffbasis und damit einem schonenderen Umgang mit fossilen Rohstoffen („weg vom Öl“) fördert. Nachwachsende Rohstoffe industriell zu nutzen, ist Ziel mehrerer Aktivitäten, so u.a. BioIndustrie 21, Biotechnologie 2020+, ERA-Net-Industrie-Biotechnologie und der Gründungsoffensive Biotechnologie Go-Bio. Das Bundesmi-

nisterium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz bringt das Förderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“ in die Nationale Forschungsstrategie Bioökonomie 2030 ein. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit und Bauen fördert die Optimierung von Prozessen und Verfahren zur Erzeugung von Strom, Wärme und Kraftstoffen aus Biomasse im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative.

In der aktuellen Diskussion der Bioökonomie wird zunehmend die begrenzte Verfügbarkeit der Biomasse und des absehbar wachsenden Bedarfs für die Ernährung erkannt. Die verfügbaren Flächen sind limitiert, und es gibt eine Nutzungskonkurrenz um die Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln einerseits und Biokraftstoffen und Chemikalien andererseits. Hoffnungen beruhen darauf, Reststoffe und Bioabfälle als Kohlenstoffquelle zu nutzen. Der VCI und der Bioökonomierat fordern deshalb die Nutzung von Non-Food-Biomasse sowie Abfall- und Reststoffen in Nutzungskaskaden. Die EU-Kommission verfolgt seit 2014 ein Kreislaufwirtschaftskonzept für Kohlenstoff recycelnde Wertschöpfungsketten. Eine Option stellt die kombinierte stoffliche und energetische Nutzung von Biomasse in Bioraffinerien dar, die Grundstoffe für die chemische Industrie herstellen und gleichzeitig Energieträger zur Verfügung stellen können. Mit Blick darauf wurde gemeinsam mit der Industrie eine Roadmap erstellt, die eine Bündelung und Zusammenschau des technologischen Standes vornimmt und Herausforderungen aufzeigt. Derzeit erweitert sich die Basis für Kohlenstoffquellen. „Waren vor zehn Jahren Zucker, Stärke und pflanzliche Öle Stand der Technik, so haben heute Verfahren zur Nutzung von Non-Food-Biomasse (Holz, Stroh) den Produktionsmaßstab erreicht. Seit einigen Jahren sind Technologien zur biokatalytischen Verwertung von CO und CO<sub>2</sub> fortgeschritten. Synthesegas aus Stahlwerken oder auch vergastem Siedlungsabfällen kann so mit einer im Vergleich zu Fischer-Tropsch enger definierten Produktspezifikation umgesetzt werden. Hier erschließt sich für die industrielle Kohlenstoff-Recyclingung nicht nur eine Alternative zur fotosynthetischen Kohlenstoff-Fixierung, auch die nicht unerhebliche Treibhausgasemission der Landwirtschaft wird vermieden“ (CHEManager 2015).

Auf dem Weg hin zur Bioökonomie wird vor allem auf die industrielle Biotechnologie gesetzt. Biotechnologische Verfahren waren vor zehn Jahren auf Intermediate des biologischen Stoffwechsels beschränkt und konnten deshalb viele Produkte der Synthesechemie nicht liefern. Heute ist die synthetische Biologie auf dem Weg, biobasierte Produkte dem Bedarf der chemischen Industrie entsprechend zu ermöglichen. Damit eröffnet sich ein erhebliches Innovationspotenzial, das durch entsprechende Forschungsanstrengungen erschlossen werden soll. Bereits in den letzten Jahren hat sich die Feinchemie als der Sektor gezeigt, der am schnellsten von biotechnologischen Verfahren durchdrungen wird. Dies liegt zum einen daran, dass die teilweise sehr spezifischen Produkte durch biotechnologische Verfahren kostengünstiger hergestellt werden können, zum anderen lassen sich durch biotechnologische Verfahren neue Produkte im Bereich der Feinchemikalien herstellen. Ein dynamisches Wachstumsfeld ist die Biokatalyse. Ein Treiber ist der technologische Fortschritt im Bereich der Molekularbiologie und Molekulargenetik in Kombination mit der Bioprozesstechnik. Ein weiteres dynamisches Wachstumssegment sind Biopolymere. Der Weltmarkt für bioabbaubare und biobasierte Kunststoffe wächst um mehr als 20 Prozent pro Jahr.

## 1.4 Umweltwirkungen

Ein Feedstock Change hat das Potenzial Kohlendioxid-Emissionen zu reduzieren. Biokatalytische Verfahren haben zudem das Potenzial, Energie und Ressourcen einzusparen, da chemische Prozesse wesentlich präziser und damit effektiver ablaufen können. Damit könnte ein Feedstock Change dazu beitragen, dass erhebliche Mengen an Erdöl im Boden verbleiben können, um die globale Klimaerwärmung zu bremsen. Schätzungen zufolge müssten dauerhaft etwa ein Drittel der gegenwärtig technisch und wirtschaftlich förderbaren Ölreserven ungenutzt bleiben (zit. nach Spiegel 8.1.2015). Rein theoretisch könnten rund 15 Prozent des weltweiten Erdölverbrauchs durch den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in der Chemieindustrie substituiert werden, der deutlich größere Beitrag müsste im Verkehrssektor erzielt werden.

Allerdings handelt es sich um Umweltentlastungspotenziale, bei deren Erschließung eine Reihe verschiedener Aspekte beachtet werden müssen.

- So besteht das Risiko, dass beim Anbau der Biomasse durch Düngemittelinträge zusätzliche Treibhausgasemissionen freigesetzt werden.
- Mit Landnutzungsänderungen kann der Verlust von Kohlenstoffsenken einhergehen.
- Es muss außerdem beachtet werden, dass bei einer Ausweitung der Anbauflächen die Biodiversität nicht beeinträchtigt wird.

Tatsächlich stellt letzteres ein gravierendes Problem dar. So werden beispielsweise artenreiche Ökosysteme für den Anbau von Ölpalmen (in Indonesien etc.) zerstört. Die chemische Industrie erkennt den Stellenwert eines nachhaltigen Anbaus von Biomasse für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe an. Mit Blick darauf nutzen Unternehmen bestehende Nachhaltigkeitszertifizierungen auf freiwilliger Basis. Trotzdem schreitet die rasante Vergrößerung der Plantagenfläche und somit die Vernichtung von Regenwald weiter voran.

Dass der Einsatz nachwachsender Rohstoffe nicht zwangsläufig ökologisch vorteilhaft ist, zeigt auch die Abbaubarkeit bzw. Recyclingfähigkeit der daraus gewonnenen Produkte. So geht der Trend bei Biokunststoffen in Richtung biobasierter, nicht biologisch abbaubarer Kunststoffe. Vor allem „drop-in“-Lösungen, also Massenkunststoffe, die auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden und identische Eigenschaften wie ihre Pendanten aus fossilen Rohstoffen haben, gewinnen Marktanteile. In zunehmendem Maße wird von den Herstellern die gezielte Compoundierung von biobasierten Polymeren zur Modifizierung und Optimierung der Materialeigenschaften vorangetrieben. Neben dem Einsatz von Additiven wie Stabilisatoren oder Weichmachern spielen mehr und mehr auch Füllstoffe und Farben eine wichtige Rolle. Problemlos wiederverwerten kann man sie nur, wenn sie chemisch völlig identisch mit den gängigen, aus Erdöl hergestellten Kunststoffsorten sind. Dies trifft zwar auf „drop-in“-Lösungen zu. Die Schwierigkeit besteht aber darin, recycelbare von nicht recyclingfähigen Biokunststoffen zu unterscheiden.

Die beschriebenen Aspekte zeigen, dass die Erschließung von Umweltvorteilen durch einen Pfadwechsel von einer erdölbasierten Rohstoffbasis zu nachwachsenden Rohstoffen voraussetzungsvoll ist. Ob die jeweiligen Ansätze tatsächlich zu umweltentlastenden Lösungen führen (können), ist nur im Einzelfall durch Analysen über den gesamten Lebenszyklus beurteilbar.

## 2 Pfadabhängigkeiten

### 2.1 Charakterisierung der Stärken des etablierten Pfades

Der Entwicklungspfad der Chemieindustrie basiert auf der leichten und wettbewerbsfähigen Verfügbarkeit von Erdöl als Rohstoff. Die beim Steamcracken und Reformieren aus Erdöl gewonnenen Olefine und Aromaten bilden die „Basisverbindungen von Wertschöpfungsketten entlang derer ein großer Teil der organischen Chemieprodukte produziert wird“ (VCGh 2010). An erster Stelle der petrochemischen Produktion steht das Spalten von Rohbenzin (Naphtha) in einige Basischemikalien, deren Weiterverarbeitung eine nahezu unerschöpfliche Vielfalt an Synthesemöglichkeiten bietet. Heute sind die Prozesse der chemischen Industrie hochgradig integriert. Kennzeichnend sind vielstufige und vielfach verzweigte Wertschöpfungsketten, in denen über komplexe und sehr unterschiedliche Prozesse mehr als 100.000 Produkte hergestellt werden (VCI 2015). Oft sind Chemieprodukte zugleich Rohstoffe für die nächste Produktionsstufe. Nachwachsende Rohstoffe bzw. biologische Verfahren werden selektiv dort eingesetzt, wo diese Vorteile gegenüber fossilen Einsatzstoffen bringen. Dies gilt sowohl für fermentativ hergestellte komplexe Moleküle, die Ergänzung von Syntheseschritten durch Biokatalyse oder die Herstellung von Spezialchemikalien. Die Einsatzbereiche reichen von Kunststoffen, Fasern, Waschmitteln, Kosmetika, Farben und Lacken, Druckfarben, Klebstoffen, Baustoffen, Hydraulikölen, Schmiermitteln bis hin zu Arzneimitteln. Die breite Aufstellung der Chemieindustrie in Kombination mit einer effizient ausgebauten Verbundstruktur, die sowohl Basis- als auch Fein- und Spezialchemikalien umfasst, ermöglicht eine hochintegrierte Produktionsweise. Infolge dieses etablierten Pfades ist die deutsche Chemieindustrie im globalen Wettbewerb erfolgreich.

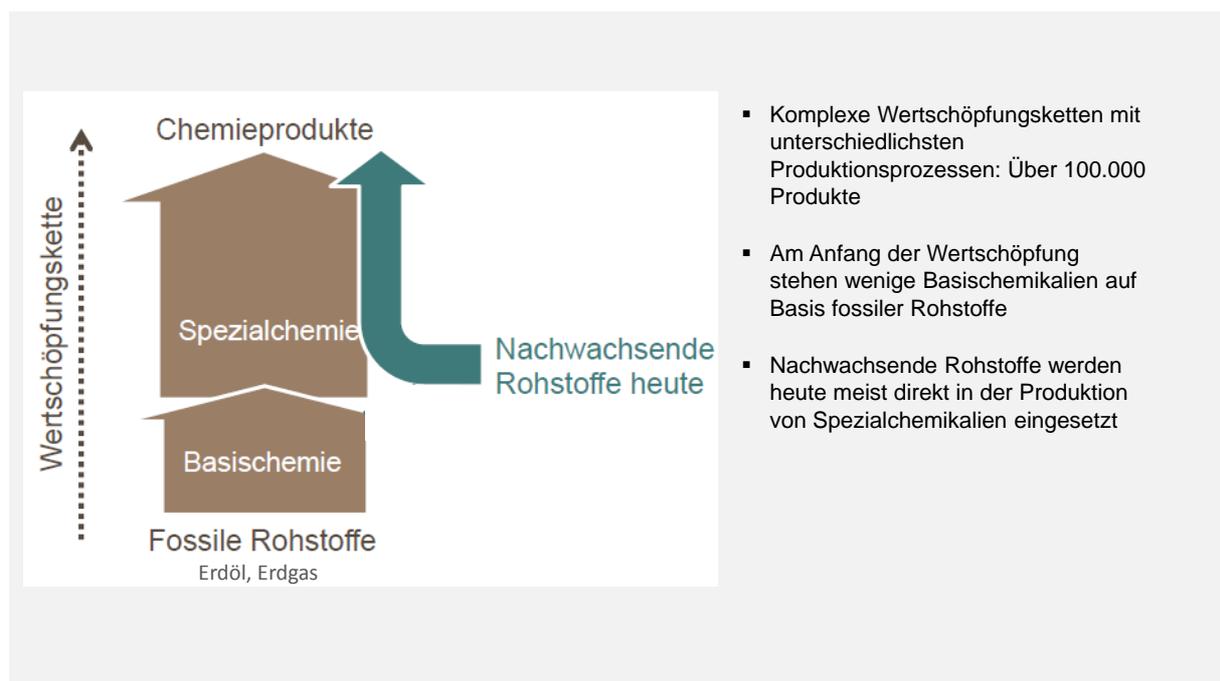


Abbildung 2: Etablierter Pfad

Quelle: eigene Darstellung, VCI 2015

## 2.2 Pfadabhängigkeiten

Zwar sind erdölbasierte Grundstoffe durch nachwachsende Kohlenstoffquellen prinzipiell austauschbar. „Dies setzt jedoch technische Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit voraus, wobei sich keine nachteiligen Effekte für die Performance und Nachhaltigkeit der Anwendung ergeben dürfen. Diese Voraussetzungen sind bei nachwachsenden Rohstoffen vielfach noch nicht gegeben“ (VCI 2015). Die chemische Industrie geht deshalb davon aus, dass auch in Zukunft fossile Rohstoffe der wichtigste Bestandteil im Rohstoffmix bleiben werden (VCI 2015).

Der Wandel der Rohstoffbasis der chemischen Industrie von Erdöl auf nachwachsende Rohstoffe ist durch folgende Pfadabhängigkeiten eingeschränkt.

### 2.2.1 Rechtliche Pfadabhängigkeiten

Die Chemieindustrie und die ihr nahestehenden Industrien bewegen sich in einem spezifischen regulatorischen Umfeld, das einen starken Einfluss auf die Nutzung nachwachsender Rohstoffe hat. Dazu zählen in Deutschland insbesondere die Biostoffverordnung, das Gentechnikgesetz und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Hemmend für einen Wandel ist die finanzielle Förderung (Subventionierung) von Bioenergie durch den Staat. In Deutschland erfolgt die Förderung durch verschiedene Maßnahmen. Durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wird unter anderem eine erhöhte Vergütung für Strom aus Biomasse sichergestellt. Nach dem Energiesteuergesetz sind zudem reine Biokraftstoffe steuerbegünstigt. Auch in anderen Staaten (Österreich, Schweden, USA etc.) werden Bioenergien gefördert und decken teilweise einen großen Anteil des Energiebedarfs.

Die chemische Industrie fordert die Subventionierung der Bioenergie abzubauen, um die notwendige Wettbewerbsgleichheit für die verschiedenen Nutzungsarten von Biomasse zu erreichen. Aus ökologischer Sicht am effizientesten wäre eine Kaskadennutzung von Biomasse, d.h. die energetische Nutzung sollte am Ende einer Kaskade, nach stofflicher Nutzung erfolgen. Das bestehende Förderinstrumentarium ist darauf jedoch nicht ausgerichtet. Erste Schritte einer Umsteuerung erfolgten mit der Novellierung des EEG 2014. Die bis dahin noch enthaltenen einsatzstoffbezogenen „Sondervergütungen“ für neue Biomasseanlagen (Einsatzstoffvergütungsklassen I+II nach BiomasseV) entfallen seither. Vielmehr wurde der Ausbau der Biomasse auf den Einsatz von Reststoffen (z. B. Gülle und Abfallstoffe) konzentriert, da zukünftig keine erhöhte, einsatzstoffbezogene Vergütung (z. B. für Mais, Zuckerrüben und Getreide) mehr vorgesehen ist. „Für Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Biomasse wurde ein Ausbauziel von bis zu 100 Megawatt pro Jahr festgelegt. Hierbei handelt es sich um ein Brutto-Ausbauziel, d.h. nicht die Bemessungsleistung einer Anlage ist ausschlaggebend, sondern die tatsächlich zugebaute Leistung. Für Strom aus Biogas, der in Anlagen mit einer Größe von mehr als 100 Kilowatt produziert wird, besteht eine Kappungsgrenze für den Anspruch auf finanzielle Vergütung. Dies bedeutet, dass für größere Anlagen (> 100 kW) der Anspruch auf finanzielle Vergütung für Strom aus Biogas nur für einen bestimmten Anteil der in einem Kalenderjahr erzeugten Strommenge besteht“ (Dağışan 2014).

Was die EU Ebene anbetrifft, wird an dem Ziel festgehalten, künftig zehn Prozent des Energiebedarfs im Transportsektor über Biokraftstoffe zu decken. Der Anteil von herkömmlichen Biokraftstoffen aus Mais oder Raps soll jedoch auf sieben Prozent beschränkt werden. Mindestens 0,5% soll aus Biokraftstoffen der zweiten Generation gedeckt werden, die aus Biomasseabfällen und -reststoffen gewonnen werden und nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen.

### 2.2.2 Ökonomische Pfadabhängigkeiten

Ob ein Strukturwandel der chemischen Industrie möglich ist, wird wesentlich von der Preisentwicklung für fossile und nachwachsende Rohstoffe abhängen. Entgegen den Erwartungen, dass der Erdölpreis steigt, ist er in den letzten Jahren drastisch gefallen. Trotz zunehmender Förderung von Erdöl erhöhten sich sowohl die Reserven als auch insbesondere die Ressourcen durch neue nicht-konventionelle Potenziale. Ölsande und seit kurzem Schieferöl gewinnen zunehmend an Bedeutung. Hinzu kommt die Strategie einiger OPEC-Staaten, die Förderung nicht zu drosseln, so dass ein Überangebot den Erdölpreis niedrig hält. „Insofern scheint das globale Ölfördermaximum (Peak Oil) eine Chimäre, abhängig von technologischer Entwicklung und Preisniveau, mit allen schädlichen Konsequenzen für Umwelt und Klima“ (Westphal 2012). Ein Umstieg auf nachwachsende Rohstoffe wird unter diesen ökonomischen Bedingungen tendenziell gebremst. Hinzu kommt, dass unklar ist, inwieweit nachwachsende Rohstoffe zukünftig zu wettbewerbsfähigen Preisen angeboten werden können. Langfristig gehen die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) und die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) in langfristigen Projektionen (bis 2030) von real steigenden Agrarrohstoffpreisen aus. Kurz- bis mittelfristig dürfte die zukünftige Preisentwicklung aber sehr volatil sein, weil angebots- und nachfragebedingte Faktoren nicht synchron verlaufen, teilweise auch Spekulationen maßgeblich für die Volatilität sind. Dabei unterliegen die einzelnen Rohstoffe unterschiedlichen Marktmechanismen. Auch spielen politische Rahmenbedingungen und – stärker als bei Erdöl - regionale Rohstoffpotenziale eine wichtige Rolle<sup>2</sup>. Die zukünftige Preisentwicklung hängt insbesondere auch von Fortschritten in der Landwirtschaft und der Biomassennutzung ab. Neue Ansätze bieten die Möglichkeit, Biomasse-Reststoffe und Pflanzenbestandteile (Blätter, Schalen, Halme), die bisher nicht verwendet werden, als nachwachsende Rohstoffe der nächsten Generation zu nutzen. Sie weisen in der Regel eine deutlich bessere ökologische Bilanz auf und bringen kostenseitig Vorteile, da die Biomasse nicht land- oder forstwirtschaftlich angebaut werden muss, sondern als pflanzlicher Reststoff anfällt. Unsicher ist, inwieweit zukünftig nachfrageorientiert die entsprechenden Mengen verfügbar sind.

Neben der Preisentwicklung für fossile und nachwachsende Rohstoffe wirken sich fehlende Finanzierungsmöglichkeiten und -bereitschaft hemmend auf einen erweiterten Einsatz nachwachsender Rohstoffe aus. Dies gilt insbesondere für integrative Anlagen, die unterschiedliche Biomasse zu verschiedenen Produkten verarbeiten. Kritisch ist, dass zur Entwicklung von speziellen Anwendungen (beispielsweise Drop-in-fuels) zunächst eine ausreichend große Menge der entsprechenden Vorprodukte verfügbar sein muss. Das können Pilotanlagen in der Regel nicht leisten. Eine integrierte Nutzung von Biomasse stößt zudem auf das Problem, dass für eine Vielzahl von möglichen Produkten noch kein Markt existiert. Momentan betreibt vor allem die Holzindustrie größere integrierte Anlagen zur Verarbeitung von Biomasse, da sie zum einen Erfahrung mit Massenströmen hat, zum anderen auch alternative Produkte zum zurückgehenden Papiermarkt sucht. Die Chemieindustrie hält sich in der Frage

---

<sup>2</sup> So ist beispielsweise der europäische Binnenpreis für Zucker im Vergleich zum Weltmarktpreis höher, was einen Standortnachteil im internationalen Wettbewerb darstellt. Erhebliche Unsicherheit existiert in der chemischen Industrie bei der Produktionsplanung durch ein im Zuge der europäischen Zuckermarktreform eingeführtes Importkontingent für die Fermentationsindustrie. Die für die Herstellung von Biokunststoffen benötigte Chemiezellulose wird vor allem in Nord- und Südamerika, Südafrika, Skandinavien und einigen europäischen Ländern gewonnen. Die in Deutschland eingesetzte Chemiezellulose wird deshalb fast vollständig importiert.

mit Investitionen zurück, sie sieht sich nicht primär als Betreiber von Bioraffinerien, sondern eher als deren Abnehmer (Lahl 2012).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass unter diesen Wettbewerbsbedingungen die Investitionsbereitschaft, auf einen Pfad nachwachsender Rohstoffe umzuschwenken, bis dato gering ist. Die chemische Industrie setzt nachwachsende Rohstoffe ein, wenn sie nur so technisch verfügbar sind (z.B. enantiomerenreine Moleküle), sie höhere technische Leistungsspezifikationen erreichen (z.B. langkettige Moleküle) oder ein Konsumprodukt aufwerten (wie z.B. die „Plantbottle“ von Coca-Cola).

### 2.2.3 Technologische Pfadabhängigkeiten

Die Unternehmen der chemischen Industrie reizen eingeschlagene Technikpfade erst einmal aus. Technologische Erneuerungen sind an betriebliche Innovationszyklen gebunden, so dass kurzfristig weitreichende Änderungen mit Blick auf nachwachsende Rohstoffe kaum zu erwarten sind. Die Gründe liegen generell im Vermeiden von Risiken und fehlenden Marktanreizen. Die eingeschlagenen Technologielinien werden deshalb erst abgelöst, wenn die Vorteilhaftigkeit konkurrierender Technologien offensichtlich wird, es sei denn, außergewöhnliche Wettbewerbsbedingungen oder wirtschafts- und umweltpolitische Rahmenbedingungen erzwingen dies. Die Pfadabhängigkeit der technologischen Entwicklung wird von verschiedenen Faktoren begünstigt. So verfügen etablierte Technologien über eine Reihe von Vorteilen, die den Marktdurchbruch für Innovationen erschweren. Infolgedessen sind in den nächsten Jahren lediglich Fortschritte relativ geringer Innovationstiefe zu erwarten, größere Fortschritte finden nur in Teilbereichen (Biokatalyse etc.) statt. Eine große Herausforderung ist das Scale-up vom Labor- in den Produktionsmaßstab. Bei Stärke, Zucker, Pflanzenöl werden dazu vorhandene Anlagen über einen Bottom-up-Ansatz zu Bioraffinerien weiterentwickelt. Für Lignocellulose sind erste Pilotanlagen in Betrieb. Hier sind neue Anlagen notwendig (Top-Down-Ansatz). Vielfach sind Einzelprozesse realisiert, eine technologische Verknüpfung der einzelnen Elemente zu integrierten Bioraffinerien steht noch aus.

### 2.2.4 Organisationale Pfadabhängigkeiten

„Im reinen Kostenwettbewerb leiden alternative Rohstoffe und Verfahren, weil ihre Gewinnung und Verarbeitung noch nicht den fossilen Prozessketten entsprechend optimiert ist“ (CHEManager 2015). Eine Schwierigkeit stellt die Integration nachwachsender Rohstoffe in bestehende Prozessketten der chemischen Industrie dar. Produkte der Bioraffinerien haben meist eine hohe Oxidationsstufe und sind deshalb vielfach inkompatibel mit herkömmlichen chemischen Wertschöpfungsketten. Eine Kooperation entlang von (potentiellen) Wertschöpfungsketten ist voraussetzungsvoll und vielfach noch nicht absehbar. Regionale und saisonale Schwankungen der Rohstoffe müssen ausgeglichen werden. Erforderlich sind „rohstofftolerante“ Bioraffinerien. Grundlegender ist die Verfügbarkeit von nachwachsenden Rohstoffen. Je stärker die Biomasse für industrielle Zwecke genutzt wird, umso wahrscheinlicher treten Konkurrenzen mit anderen Nutzungsansprüchen auf. Der Verband der Chemischen Industrie (VCI) geht davon aus, dass Verfügbarkeit (und Preis, siehe oben) von nachwachsenden Rohstoffen aufgrund der Nutzungskonkurrenzen limitierende Einsatzfaktoren sein werden. Die derzeitigen Diskussionen um „food or fuel“, d.h. die Frage der Nutzungskonkurrenz zwischen Biomassenutzung zur Energieversorgung und als Nahrungsmittel und die zum Teil erheblichen Preisanstiege bei einzelnen Nahrungsmitteln belegen eine hohe Brisanz des Themas. Die zukünftigen Nutzungsmöglichkeiten von

nachwachsenden Rohstoffen werden also insbesondere auch davon abhängen, wie viel und zu welchem Preis Biomasse zur Verfügung stehen wird. Zwischen den verschiedenen Einsatzgebieten für Biomasse sind erhebliche Nutzungskonkurrenzen heute schon deutlich erkennbar. Bei einem steigenden Einsatz dürfte sich die Konkurrenz zwischen dem stofflichen Einsatz in der Chemie und den ungleich größeren Sektoren Energieerzeugung und Treibstoffe noch verstärken. Selbst wenn die Rohstoffbasis der Basischemie nicht substituiert wird, würde sich der absolute Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen - angesichts des überdurchschnittlichen Wachstums der Spezialchemie- um 50 Prozent bis zum Jahr 2030 erhöhen. Unklar ist, wie die Verfügbarkeit nachwachsender Rohstoffe sichergestellt werden kann. Dies gilt erst recht, wenn über den Trend hinaus, also bei einem Strukturwandel noch größere Mengen an nachwachsenden Rohstoffen benötigt werden. Bereits heute liegt der Importanteil von nachwachsenden Rohstoffen für die chemische Industrie in Deutschland bei 60 Prozent. Die Konflikte um die begrenzte Landverfügbarkeit, grünes Landgrabbing und ungeregelte Biomassenutzung zu Lasten von Biodiversität und kohlenstoffspeichernden Ökosystemen (z.B. auf den Philippinen) zeigen, wie wichtig eine integrierte Organisation der Biomassenutzung ist. Nachhaltigkeits-Zertifikate sind ein organisatorischer Ansatz, das Hauptproblem (steigender Flächenbedarf, Intensivierung der Flächennutzung, indirekte Landnutzungsänderungen etc.) ist damit aber nicht gelöst.

### 2.2.5 Nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten

Produkte auf Grundlage nachwachsender Rohstoffe verkaufen sich nicht von selbst, vielmehr sind Preise, Qualitäten, Eigenschaften und Kundeninteresse ausschlaggebend. Der VCI beschreibt die nutzerbezogene Pfadabhängigkeit wie folgt: „Bei völlig neuartigen Anwendungen und Produkten kommt die Notwendigkeit dazu, nicht nur neue Märkte zu erschließen, sondern im Zusammenspiel ganz neue Wertschöpfungsketten aufzubauen. Diese Herausforderungen, die in der Vergangenheit häufig unterschätzt wurden, sind ein Grund dafür, dass sich die Entwicklung in vielen Bereichen nicht so dynamisch gezeigt hat“ (VCI 2015), wie erhofft. Erst langsam entwickelt sich das Interesse seitens konsumnaher Unternehmen, nachhaltig erzeugte Produkte, die auf Basis von Biomasse hergestellt wurden, in ihr Produkt-Portfolio aufzunehmen. Von den verschiedenen Feldern macht sich diese Entwicklung schon heute bei Biokunststoffen bemerkbar. Unternehmen fragen Biokunststoffe nach, weil sie in ihre Nachhaltigkeits- und Marketingstrategie passen. Anwendungen sind insbesondere Lebensmittelverpackungen, Einkaufs- und Mülltüten sowie Flaschen. Besonders dynamisch wächst der Markt für Flaschen, wo vor allem teil-biobasiertes PET eingesetzt wird. Rund 40 Prozent der gesamten Biokunststoff-Produktion wird hier verbraucht. Immer mehr Unternehmen setzen in diesem Bereich auf nachwachsende Rohstoffe, nicht zuletzt weil Verbraucher zunehmend Wert auf nachhaltig erzeugte Produkte legen. So plant Coca Cola seine PET-Flaschen vollständig auf Bio-PET umzustellen, die aus Zuckerrohr und Abfällen aus der Zuckerrohrgewinnung als Rohstoff hergestellt werden. Allerdings ist für den Nutzer nicht immer deutlich, ob biomassebasierte Produkte ökologisch tatsächlich vorteilhaft sind. Betrachtet man den gesamten Lebensweg biologisch abbaubarer Kunststoffverpackungen aus nachwachsenden Rohstoffen - von der Herstellung bis zur Entsorgung - schneiden diese nicht unbedingt besser als herkömmliche Produkte ab. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß fällt zwar geringer aus, ebenso der Verbrauch von Erdöl. In anderen Umweltbereichen kann es aber zu größeren Belastungen kommen. Hier sind Kommunikations- und Informationsdefizite im Nutzer- und Verbraucherbereich zu konstatieren.

### 2.3 Eingriffspunkte und Schwächen des etablierten Pfades

Erdöl ist der mit Abstand am meisten genutzte Rohstoff der Chemieindustrie, der das Rückgrat der vielen Produkte der chemischen Industrie bildet. In Deutschland kommt hinzu, dass die chemische Industrie vollständig von Ölimporten abhängig ist. Zwar geht die Deutsche Rohstoffagentur davon aus, dass für die nächsten Jahre „aus geologischer Sicht bei einem moderaten Anstieg des Erdölverbrauchs die Versorgung mit Erdöl gewährleistet werden kann“. Langfristig ist bei Fortsetzung der Nachfragestrukturen und -dynamik mit einer globalen Verknappung des Erdöls und daraus resultierenden Preissteigerungen zu rechnen. Kurzfristig bestimmen vor allem externe Faktoren (Preispolitik einiger OPEC-Staaten, Krise in Venezuela, Sanktionen gegenüber Iran etc.) die Preisentwicklung stark, was sich in einer hohen Preisvolatilität niederschlägt.

Aus Sicht der Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie ist eine Verbreiterung der Rohstoffbasis unerlässlich. Auch aus Gründen des Klimaschutzes ist eine Abkehr von Erdöl notwendig. Zwar konnte die deutsche Chemieindustrie zwischen 1990 und 2009 den Energieeinsatz um ein Drittel reduzieren, bei gleichzeitiger Erhöhung der Produktion um 42%, aber diese Entwicklung lässt sich so dynamisch nicht fortsetzen (VCI 2013). Weiterhin ist zu bedenken, dass zunehmend unkonventionelle Öle und damit „schmutzigere“ Öle an Bedeutung gewinnen werden, die mit höheren Umweltbelastungen einhergehen. Die steile Zunahme der Ölschieferförderung in den USA (Shale Oil Boom) der letzten Jahre wird einen erheblichen Einfluss auf die Importe der USA nehmen und sich auch spürbar auf die Struktur der globalen Produktion niederschlagen. Ob die Förderung nicht-konventionellen Erdöls (Ölschiefer, Ölsande) durch die USA und Kanada mittel- bis langfristig aufrechterhalten und sich möglicherweise sogar global ausweiten wird (z.B. China, Venezuela), ist nicht zuletzt wegen gravierender Umweltprobleme und weiterer Risiken noch nicht absehbar. Mittel- bis langfristig dürfte mit einem Abebben des Booms zu rechnen sein.

Jedenfalls stellt sich für die chemische Industrie die Herausforderung, zu Erdöl entsprechende Rohstoffalternativen für die bestehenden, hocheffizienten Wertschöpfungsketten zu entwickeln. Grundsätzlich kommen auch andere fossile Rohstoffe wie Kohle und Erdgas in Frage. Erdgas, das derzeit vergleichsweise billig zu haben ist, weist Vorteile auf, um kurzkettige Olefine als wichtige Basisprodukte herzustellen. Selbst Kohle könnte wegen der hohen Reserven und der Verfügbarkeit langfristig eine bedeutende Rolle als Rohstoff für die Chemieindustrie spielen. Allerdings fällt bei der Nutzung von Kohle in großem Umfang CO<sub>2</sub> an. Denkbar ist auch der Einsatz von biogenem Methan, Wasserstoff oder Kohlenstoffdioxid. Eine Wasserstoff- oder CO<sub>2</sub>-Nutzung ist allerdings nur auf Basis regenerativer Energiebereitstellung sinnvoll, doch bei allen Verfahren ist man aus dem Pilotstadium noch nicht hinausgekommen.

## 3 Transformationsansätze

Ein Feedstock Change der Chemieindustrie ist von dem Zusammenspiel vieler Ansätze abhängig. Die Ansätze sind im Folgenden vier Handlungsfeldern zugeordnet.

### 3.1 Nachhaltige Erzeugung und Bereitstellung nachwachsender Rohstoffe

Ein Umstieg auf nachwachsende Rohstoffe in der Chemieindustrie führt zu einem steigenden Bedarf an pflanzlicher Biomasse. Daher wird eine Steigerung der Ernteerträge verfolgt. Im Mittelpunkt stehen moderne Züchtungsmethoden und Effizienzverbesserungen insbesondere in Bezug auf den Einsatz von Energie, Dünge- und Pflanzenschutzmittel, wobei gleichzeitig die natürlichen Ressourcen Biodiversität, Boden und Wasser aufrechterhalten werden (BMEL 2014) sollen. Um Nutzungskonkurrenzen mit Nahrungs- und Futtermitteln zu vermeiden, wie sie die 1. Generation von Biomasserohstoffen aus landwirtschaftlichen Produkten (Mais, Raps etc.) bereits hervorruft, wird in der 2. Generation auf Holz-, Stroh- und Reststoffe aus der Agrar- und Forstwirtschaft als nachwachsende Rohstoffe für die Chemieindustrie gesetzt. Das Augenmerk richtet sich insbesondere auf die Nutzung von Lignocellulose. Aus lignocellulosehaltigen Rohstoffen lassen sich Plattformchemikalien gewinnen, aus denen biobasierte Produkte entstehen. Auch Algen können (als so genannte 3. Generation) grundsätzlich als Rohstoffquelle kultiviert werden. Bei der Nutzung von Algen entsteht kein Konflikt mit der Erzeugung von Nahrungsmitteln, da eine Algenkultivierung keine landwirtschaftlichen Anbauflächen benötigt. Ob Algen als Biomasse in Frage kommen, ist noch nicht abzuschätzen. Die wirtschaftliche Nutzung von Reststoffen und Algen erfordert Fortschritte bei der Züchtung, in der Logistik und Aufarbeitung der Biomasse sowie neue Ansätze bei der Weiterverarbeitung zur Gewinnung von Grundstoffen für die chemische Produktion. Darüber hinaus ist sicherzustellen, dass die erzeugte Biomasse stofflich genutzt wird und nicht, wie derzeit, hauptsächlich energetisch. Unter der Bezeichnung 5F-Kaskade hat die OECD eine Reihenfolge erstellt, in der Biomasse am sinnvollsten zu nutzen ist. „Nahrungs- und Futtermittel sollen Vorrang genießen, dann folgen Spezial- und Massenchemikalien sowie Inhaltsstoffe für Arzneimittel, dann kommen Fasern und Biomaterialien (Holz, Zellstoff und Papier), erst dann Treibstoffe und Bioenergie, das Ende bilden schließlich Dünger und Bodenverbesserer“ (BioPro 2014). „Damit bleibt CO<sub>2</sub> möglichst lange gebunden und die Biomasse kann vor der Verbrennung erst noch andere Wertschöpfungsprozesse durchlaufen“. Bis dato gibt es kaum Kaskaden, vielmehr wird Biomasse verbrannt, sei es zu Wärmezwecken (in Form von Holzpellets, Biogas) oder zur Gewinnung von Treibstoff für Fahrzeuge (z.B. Bioethanol). Von der Agrarfläche, die für die Gewinnung nachwachsender Rohstoffe genutzt wird, entfallen 82 Prozent auf die Produktion von Biomasse für den Energiesektor, wobei Biokraftstoffe mit über 55 Prozent den größten Anteil am gesamten Flächenverbrauch einnehmen. Nur 8,6 Prozent der Fläche entfällt auf die Nutzung von Biomasse zur Herstellung von Chemikalien (FNR 2014).

### 3.2 Integrierte Prozesse und neue Wertschöpfungsnetze

Ein Handlungsschwerpunkt für eine Transformation ist die Steigerung der Effizienz der Prozesse bei der Biomassebereitstellung und -aufarbeitung bis hin zur Herstellung neuer biobasierter Produkte. Notwendig ist dazu eine effiziente Auftrennung der Rohstoffe in ihre einzelnen Komponenten und de-

ren Umwandlung zu Chemierohstoffen durch eine Kombination von geeigneten physikalischen, biotechnologischen und chemischen Prozessen. Ansätze für integrierte Prozesse und neue Wertschöpfungsnetze sind:

- Integration biotechnischer Verfahrensschritte in chemische Produktionsprozesse,
- Integrative Verfahrenskonzepte zur hochwertigen Verwertung aller Bestandteile nachwachsender Rohstoffe (Rohstoffe der zweiten Generation),
- Nutzung von Algen als Biomassequelle,
- Nutzung von Synthesegas,
- Kaskadennutzung von Biomasse, d.h. primär stoffliche Nutzung und erst sekundär Nutzung zur Wärme- und Stromerzeugung.

Bioraffinerien zeichnen sich dabei als integratives Gesamtkonzept aus. Biomasse wird als vielfältige Rohstoffquelle für die Erzeugung eines breiten Spektrums an unterschiedlichen Zwischen- und Endprodukten (z.B. Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie) bei einer möglichst vollständigen Verwertung verwendet. In Deutschland existieren heute 16 Anlagen, die integrierte Konzepte zur Nutzung von Biomasse verfolgen. Mit der Realisierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen tritt die Entwicklung von Bioraffinerien in eine neue Phase ein. Erste kommerzielle Bioraffinerien im industriellen Maßstab, die unterschiedliche Biomasserohstoffe mit verschiedenen Verfahren zu einem Produktspektrum verarbeiten, sind frühestens in fünf bis zehn Jahren zu erwarten.

### 3.3 Optimierung bestehender und neue Bioproduktionssysteme

Als wesentliche Innovationskraft für die Transformation der Rohstoffbasis in der Chemieindustrie gilt die industrielle Biotechnologie. Das liegt zum einen an der spezifischen Leistungsfähigkeit der Biokatalyse (z.B. stereoselektive Synthese), zum anderen haben biokatalytische Verfahren das Potenzial, Energie und Ressourcen einzusparen. Darüber hinaus eröffnen neue Entwicklungen bei der Verbesserung biokatalytischer Verfahren zahlreiche Möglichkeiten, traditionelle chemische Verfahren durch biotechnologische Prozesse zu ergänzen oder zu ersetzen. Verschiedene Ansätze zielen auf Optimierung bestehender und Entwicklung neuer Wertschöpfungsketten und -netze. Eine Schwäche sind beispielsweise die „geringen volumetrischen Produktivitäten (Raum-Zeit-Ausbeuten)“ biokatalytisch basierter Herstellungsprozesse (Dechema, 2011; Zeng 2014). Heutige biotechnologische Produktionssysteme benutzen überwiegend Reinkulturen von Mikroorganismen bzw. einzelne Enzyme. Die Produktion unter Verwendung von Enzymen ist höchst selektiv und für einzelne Syntheseschritte sehr effektiv. Für komplexere Synthesen und Einsatz mehrerer Enzyme nimmt die Effektivität jedoch stark ab. Mikroorganismen sind evolutionär nicht auf die Produktion von Stoffen ausgerichtet, daher werden nur geringe Konzentrationen gewonnen. Da die Reaktionen in wässriger Lösung stattfinden, sind komplexe Aufbereitungsverfahren nötig, um die gewünschten Produkte zu gewinnen. Komplexe Substrate können nur schwer verarbeitet werden; die Katalyse von Bioreaktionskaskaden ist beschränkt. Entwicklungsschwerpunkte sind einerseits die Optimierung von Enzymen mit Blick auf Aktivität, Selektivität und Stabilität, andererseits geht es um Hochdurchsatzverfahren zum Beispiel für das Screening neuer Enzymeigenschaften. Darüber hinaus eröffnen neue Entwicklungen insbesondere bei der Verbesserung biokatalytischer Verfahren zahlreiche Möglichkeiten, traditionelle chemische Verfahren durch biotechnologische Prozesse zu ergänzen oder zu ersetzen. Zunehmende Bedeutung erlangen moderne Verfahren der Molekularbiologie und Molekulargenetik in Kombination mit der Bioprozesstechnik.

Eine wichtige Rolle spielt dabei insbesondere die Synthetische Biologie, also das gezielte Modifizieren zellulärer Prozesse. Ein Ansatz ist zum Beispiel die „de novo“-Konstruktion von völlig neuartigen Biokatalysatoren. Neue Entwicklungen im Bereich der Gensequenzierung, funktionellen Genomik, synthetischen Biologie einerseits und in Technologiefeldern wie Computersimulation, Mikrofluidik und Nanotechnologie andererseits lassen völlig neue Möglichkeiten für die Entwicklung von Bioproduktionssystemen erwarten (Bley 2012, 2014).

### 3.4 Bewertung

Im Mittelpunkt der Ansätze zum Feedstock Change der Chemieindustrie stehen Effizienzsteigerungen, die verstärkte Nutzung von „Non-Food“-Biomasse, Optimierung der Verarbeitungsprozesse und die Entwicklung neuer Produkte. Für den Übergang auf nachwachsende Rohstoffe sind neue Synthesestrategien und Herstellungsprozesse erforderlich, die es erlauben, chemische Produkte aus heterogener Biomasse herzustellen und in bestehende Prozesse kaskadenförmig zu integrieren. Eine Schlüsselrolle nimmt dabei die industrielle Biotechnologie ein. Hier sind in den letzten Jahren viele junge Unternehmen gegründet worden, die die Innovationsdynamik deutlich beschleunigt haben. Festzustellen ist aber auch, jenseits von Nischen (z.B. Biokunststoffe), eine fehlende Wettbewerbsfähigkeit von Biomasse in der stofflichen Nutzung gegenüber fossilen Rohstoffen. Hier besteht in vielen Ansätzen ein erheblicher Forschungs-, Entwicklungs- und vor allem Investitionsbedarf, um vom Pilot- und Demonstrationsstadium in eine kommerzielle Phase einzutreten. Angesichts der begrenzten Flächen in Deutschland und Europa ist der weitere Ausbau der stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in der chemischen Industrie vor allem im globalen Kontext zu sehen. Aktuell liegt der Importanteil von nachwachsenden Rohstoffen für die chemische Industrie bei 60 Prozent. Auch in einer „biomassebasierten Ökonomie“ würde die chemische Industrie aufgrund der stark begrenzten Verfügbarkeit von Anbauflächen in Deutschland und Europa in erheblichem Maße von Rohstoffimporten abhängig bleiben (VCI 2015). Regionen wie Asien oder Südamerika haben durch große Agrarflächen und optimale klimatische Bedingungen deutliche Standortvorteile bei der Produktion von nachwachsenden Rohstoffen. Eine steigende Nachfrage nach Biomasse muss daher hauptsächlich über den Weltmarkt gedeckt werden (VCI 2015). Gegenwärtig werden für Nahrungsmittel und Rohstoffe rund 1,5 Milliarden Hektar Fläche genutzt, davon 0,15 Milliarden Hektar für Bioenergie und stoffliche Nutzung. Für einen Feedstock Change der chemischen Industrie weltweit, in dem langfristig 500 Millionen Tonnen Erdöläquivalente substituiert werden, würde global eine Fläche von weiteren 0,3 Milliarden Hektar benötigt. Zwar stünde diese Fläche theoretisch zur Verfügung, Schätzungen gehen davon aus, dass global etwa 0,5 Milliarden Hektar Fläche für die Biomassenutzung erschließbar wären (Lahl 2012). Angesichts des global wachsenden Nahrungsmittelbedarfs ist dennoch von einer Zunahme von Nutzungskonkurrenzen auf regionaler und lokaler Ebene auszugehen, die eine Balancierung zwischen den konkurrierenden Flächenansprüchen notwendig macht. International anerkannte Nachhaltigkeitsstandards in der Land- und Forstwirtschaft (z.B. Nachhaltigkeitszertifizierung für Biomasse) sind dabei ein wichtiges Instrument zur Gewährleistung ökologischer und sozialer Anforderungen und Standards. Allerdings bleibt bis dato die Problematik indirekter Landnutzungsänderungen unberücksichtigt. Ein Anstieg der Nachfrage führt über steigende Preise zu Anreizen, mehr Biomasse zu produzieren, entweder über eine Intensivierung auf bereits genutzten Flächen oder durch eine Ausweitung der agrar- und forstwirtschaftlichen Flächen (IfW 2015).

## 4 Fazit und Möglichkeiten für einen Pfadwechsel

Die vorliegende Fallstudie untersucht die Transformation der Chemieindustrie auf eine Rohstoffbasis ohne Öl, den sogenannten „Feedstock Change“. Der Fokus liegt auf Biomasse als Alternative zu Erdöl als Rohstoff. Im Folgenden werden die wichtigsten Pfadabhängigkeiten zusammengefasst, ihre Auswirkungen auf mögliche Transformationsansätze beleuchtet und Handlungsempfehlungen gegeben, wie Pfadabhängigkeiten aufgebrochen werden könnten bzw. wie die Perspektiven für einen Wandel der Rohstoffbasis einzuschätzen sind.

### 4.1 Pfadabhängigkeiten

Erdöl ist heute als Rohstoff für die chemische Industrie unersetzlich: Kunststoffe und Dämmstoffe basieren ebenso auf Kohlenstoff wie Medikamente und Düngemittel. Über 70 Prozent der chemischen Erzeugnisse werden derzeit aus Erdöl bzw. Naphtha produziert. Diese Dominanz des Erdöls als Rohstoffbasis hat sich im Laufe von rund 100 Jahren entwickelt und manifestiert sich in einer Reihe von Pfadabhängigkeiten, die den Erdölpfad regelrecht zementieren und einen Feedstock Change bis dato verhindern. Ein Feedstock Change ist vor allem mit folgenden Pfadabhängigkeiten der erdölbasierten Chemieindustrie konfrontiert:

- Niedrige Preise für Erdöl ermöglichen eine günstige Rohstoffbasis. Daran hat sich die Chemieindustrie gewöhnt. Aber auch hohe Erdölpreise, wie sie zeitweilig auftraten, müssen nicht zwangsläufig einen Rohstoffwandel fördern. Stattdessen werden Investitionsmittel in die Erschließung und Produktion von fossilen Rohstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten verschoben. Peak-oil ist bis dato jedenfalls kein Treiber für einen Feedstock Change, eher eine „Chimäre“ (Westphal 2012). Die Entwicklung der Energie- und Rohstoffpreise sorgt somit zur Zementierung des „fossilen“ Pfades.
- Lobbying hat eine Besteuerung des Erdöls im Chemiesektor verhindert. Chemiefirmen nutzen Erdöl steuerbegünstigt, wenn sie daraus Chemikalien herstellen. Besteuert wird die energetische Nutzung von Erdöl. Werden fossile Rohstoffe in der (petro-) chemischen Industrie eingesetzt, so sind diese nicht Gegenstand der Besteuerung. Je nach industriellem Einsatzbereich des Mineralöls und Erdgases ist diese Nutzung klimapolitisch eine Lücke, insofern fossile Kohlenstoffe mobilisiert werden, die früher oder später als Kohlendioxid freigesetzt werden (Töne 2011).
- Eine umfassende „Förderkulisse“ auf EU- und nationaler Ebene präferiert die energetische Nutzung von Biomasse (Carus et al. 2014). Trotz politischen Vorrang und trotz erheblicher F+E-Förderung stagniert die stoffliche Nutzung von Biomasse, während die energetische Nutzung expandiert. Infolge politischer Förderbedingungen, u.a. der EU Erneuerbare-Energien-Richtlinie, sind die Preise für Biomasse deutlich gestiegen, wodurch die stoffliche Nutzung erschwert und verteuert wurde, was durch keine Förderung kompensiert wird.
- Für die chemische Industrie sind vielstufige und vielfach verzweigte Wertschöpfungsketten kennzeichnend, in denen über komplexe und sehr unterschiedliche Prozesse mehr als 100.000 Produkte hergestellt werden. Die Chemieindustrie kann daher die Produktion von Basis-Chemikalien nicht einfach umstellen, denn damit würde sie einen wesentlichen Wettbewerbsvor-

teil aufgeben, nämlich die Verbundproduktion, das heißt aufeinander abgestimmte, hocheffiziente Produktionsverbände, in denen der Stoff einer Produktionsanlage zum Grundstoff einer anderen wird.

- Außer Erdöl stehen andere fossile Rohstoffe der Chemieindustrie noch lange Zeit zur Verfügung. Darauf könnte die chemische Industrie eher zurückgreifen als auf alternative Rohstoffquellen. Kohle könnte wegen der hohen Reserven und der Verfügbarkeit eine wichtigere Rolle als Rohstoff für die chemische Industrie erlangen. Erdgas könnte Erdöl ersetzen, um kurzketige Olefine als wichtige Grundprodukte zu erzeugen. Infolge der Exploration von Schiefergas erscheint mittelfristig eine Renaissance von fossilen Rohstoffen näherliegend als ein umfassender Wandel hin zu nachwachsenden Rohstoffen als Basis für bestehende chemische Produktionen (BÖR 2014). Weiterhin erscheint es möglich, dass sich der Zeithorizont für die stoffliche Nutzung fossiler Energieträger deutlich erweitert, wenn die energetische Nutzung von Erdöl (Verkehr, Wärme etc.) verringert werden würde. 85 Prozent des Erdölaufkommens wird im Verkehr als Treibstoff verbrannt, nur 15 Prozent des Erdöls wird in der Chemieindustrie stofflich genutzt.
- Die Nachfrage nach Erdöl in der Chemieindustrie hat ein Niveau erreicht, dass ein vollständiger Umstieg auf Biomasse schon aufgrund der erforderlichen Mengenströme nicht absehbar ist. Biomasse könnte mittel- und langfristig sogar deutlich knapper werden als Erdöl. Auf jeden Fall ist festzustellen, dass je stärker die Biomasse für industrielle Zwecke genutzt wird, umso wahrscheinlicher treten Konkurrenzen mit anderen Nutzungsansprüchen auf. Eine steigende Nachfrage der Chemieindustrie nach Biomasse müsste angesichts der begrenzten Flächen in Deutschland und der EU hauptsächlich über den Weltmarkt gedeckt werden.

Zwar heben zahlreiche Akteure in Deutschland die Notwendigkeit für einen Rohstoffwandel in der Chemieindustrie hervor, um den Herausforderungen einer Erdölverknappung und des Klimaschutzes gerecht zu werden. So schreibt die DECHEMA bereits im Jahr 2004 in einem Positionspapier zur Weißen Biotechnologie: „Die Endlichkeit der weltweiten Erdölvorräte ist ...absehbar...Insgesamt erscheint eine langfristige Vorbereitung auf eine stärker auf nachwachsenden Rohstoffen basierende Technologie unerlässlich“. In einem weiteren Positionspapier zur Rohstoffbasis im Wandel heißt es 2010: „Vor allem die chemische Industrie, die besonders von der Verfügbarkeit organischer und anorganischer Rohstoffe abhängig ist, muss Strategien zur Rohstoffsicherung entwickeln“ (GDCh 2010). Allerdings ist in der Chemieindustrie das Problembewusstsein und eine grundsätzliche Bereitschaft für einen Wandel der Rohstoffbasis nicht sehr ausgeprägt. Kontrovers diskutiert wird die Geschwindigkeit, die Richtung und die Mittel, die notwendig sind, um solche Wandlungsprozesse zu initiieren und zu begleiten. Angesichts der Pfadabhängigkeiten ist ein Feedstock Change unter den aktuellen Umfeldbedingungen kein zentrales Innovationsfeld, eine Transformation hin zu einer bio-basierten Wirtschaft ist nur schwer vorstellbar.

## 4.2 Auswirkungen der Pfadabhängigkeiten auf die Transformationsansätze

Ein Feedstock Change hin zu einer biobasierten Wirtschaft ist gerade in Anbetracht der enormen wirtschaftlichen Stärken und hervorragenden Strukturen schwieriger als gemeinhin angenommen. Es ist vielmehr zu erwarten, dass biologische Verfahren dort zum Einsatz kommen, wo die Produkte sich durch verbesserte Eigenschaften im Markt differenzieren oder wirtschaftlicher herzustellen sind als

mit herkömmlichen chemischen Synthesen (BÖR 2014). Auf die in Kapitel 4 vorgestellten Transformationsansätze wirken sich die Pfadabhängigkeiten mit unterschiedlicher Intensität aus. Eine starke Pfadabhängigkeit stabilisiert dabei das System mit seinen Akteuren in besonders hohem Ausmaß. Sie stellt damit ein besonders starkes Hemmnis für einen Pfadwechsel dar.

Tabelle 2: Auswirkungen der Pfadabhängigkeiten auf Transformationsansätze

<b>Transformationsansatz</b>  <b>Leitstrategie</b>  <b>Pfadabhängigkeit</b>	<b>Nachhaltige Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse, z.B. Lignocellulose, 5F-Kaskade</b>  <b>Konsistenz</b>	<b>Integrierte Prozesse/ neue Wertschöpfungsnetz, z.B. Bioraffinerien, Algenbiotechnologie</b>  <b>Konsistenz/ Effizienz</b>	<b>Bioproduktionssysteme, z.B. biokatalytische, Verfahren, neuartige Biokatalysatoren</b>  <b>Effizienz</b>
Niedrige Erdöl-Preise	stark	stark	gering
Lobbying: Keine Besteuerung des Erdöls als Rohstoff	stark	mittel	gering
„Förderkulisse“ für energetische Nutzung von Biomasse	stark	mittel	gering
Vielstufige, verzweigte und hoch-effiziente Wertschöpfungsketten	stark	stark	stark
Langfristige Verfügbarkeit fossiler Rohstoffe	stark	stark	mittel
Kritikalität der Biomasseverfügbarkeit	stark	stark	mittel

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Effizienzstrategie zur Optimierung bestehender und die Entwicklung neuer Bioproduktionssysteme ist im vorherrschenden Chemiesektor am ehesten anschlussfähig. Die Pfadabhängigkeiten machen sich deutlich stärker bemerkbar, wenn es um eine nachhaltige Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse sowie neue integrierte Prozesse geht, die eine Rekonfiguration herkömmlicher Wertschöpfungsketten erfordert.

### 4.3 Handlungsempfehlungen

Voraussetzung für einen Feedstock Change der Chemieindustrie ist das Ineinandergreifen vieler Faktoren. Die damit verbundenen Prozessdynamiken illustriert (auf Basis einer Mehrebenenperspektive (Geels/Schot 2010) die folgende Abbildung.

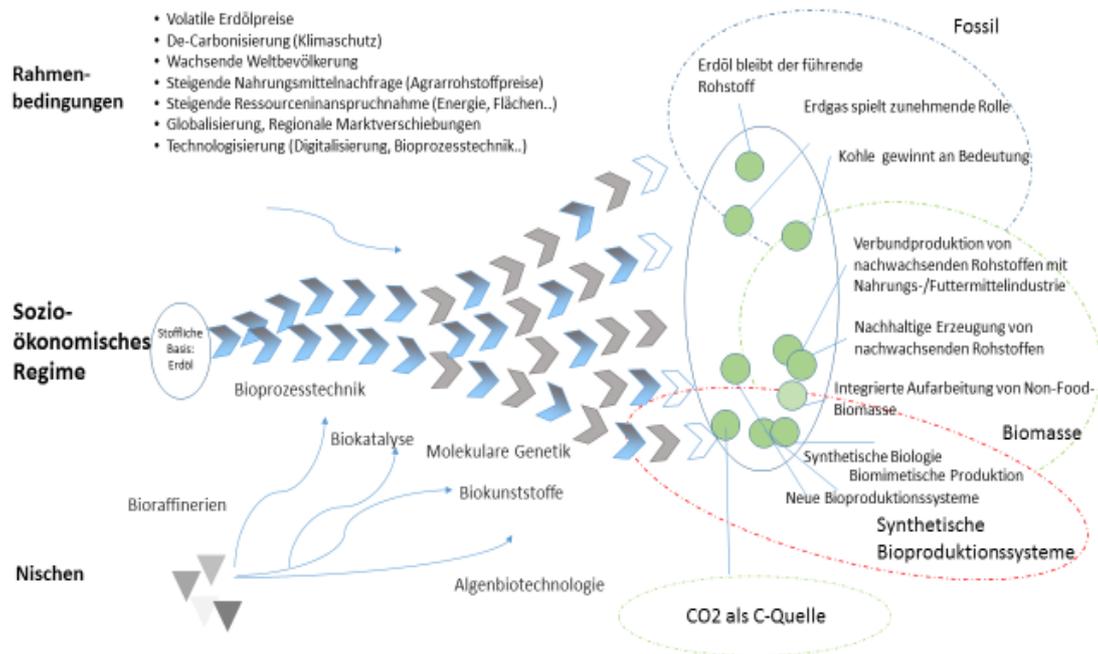


Abbildung 3: Feedstock Change der Chemieindustrie

Quelle: IZT, eigene Darstellung

Angesichts der Pfadabhängigkeiten wird der Erdölpfad so schnell nicht verlassen, wahrscheinlicher ist eine Verbreiterung der Rohstoffbasis der Chemieindustrie, die sich ko-evolutiv entwickelt, teilweise überlagert, teilweise aber auch in Widerspruch gerät. Dazu gehören:

Erstens eine stärkere Nutzung von Erdgas und Kohle, deren Nutzung heute schon etabliert ist.

Zweitens eine effiziente Erzeugung, Aufarbeitung und Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen (Non-Food-Biomasse) und deren integrierte Aufarbeitung, die im Verbund Chemikalien, Energie, Biogas und Kraftstoffe liefert.

Drittens neue Bioproduktionssysteme, um größtmögliche Erträge zu erzielen. Potenziale bietet insbesondere die Synthetische Biologie, also das gezielte Modifizieren zellulärer Prozesse. Zum Einsatz kommen dabei neueste Methoden der Gensynthese, künstliche genetische Schaltkreise sowie minimalisierte Zellen.

Viertens, als Quelle für Kohlenstoff könnte CO<sub>2</sub> Erdöl ersetzen. Aus CO<sub>2</sub> lassen sich mit Wasserstoff chemische Grundstoffe herstellen. Die Technologie dazu steht erst am Anfang.

Wie stark und wie schnell sich die Rohstoffbasis der Chemieindustrie verbreitert, hängt von vielen Faktoren ab: Preis, Qualität, Eigenschaften, Kundeninteresse, Verfügbarkeit. Der VCI geht bei nachwachsenden Rohstoffen bis 2030 von einem nahezu konstanten Anteil aus, wenngleich sich absolut, aufgrund des überdurchschnittlichen Wachstums der Feinchemie, bis dahin die Nachfrage nach nachwachsenden Rohstoffen um 50% erhöht. Hirth rechnet mit voraussichtlich noch fünfzig Jahre für einen Wandel der Rohstoffbasis (VCI 2013). Ähnlich lange habe schließlich „auch die Umstellung von Kohle auf Erdöl und Erdgas erfordert. Kohle war bis in die fünfziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts der

wichtigste Rohstoff der chemischen Industrie. Bei jeder Umstellung auf eine neue Rohstoffbasis mussten zahlreiche neue Prozesse entwickelt und optimiert werden. Im vergangenen Jahrhundert war es ein Wechsel von einer Chemie, die auf Acetylen aufbaute, zu einer Chemie deren Ausgangsstoff Ethylen ist“ (Hirth o.J.).

Marktgetrieben verläuft der Rohstoffwandel in Teilbereichen (z.B. Biokatalyse) dynamisch, insgesamt aber inkrementell, Zug um Zug wird Erdöl durch nachwachsende Rohstoffe ergänzt und ersetzt. Für einen beschleunigten Feedstock Change sind politische Maßnahmen notwendig, die über bisherige Strategien, Programme und Aktivitäten der Bundesregierung bzw. der -ressorts deutlich hinausgehen.

### **Synchronisierung des angebots- und nachfrageseitigen Wandels der Rohstoffbasis der Chemieindustrie**

Um Pfadabhängigkeiten aufzubrechen, bedarf es nicht nur innovativer Forschung und Entwicklung, sondern in vielen Fällen auch einer Veränderung der Nachfragebedingungen. Die Verbreiterung der Rohstoffbasis der Chemieindustrie hin zu nachwachsenden Rohstoffen ist auf eine Synchronisierung des angebots- und nachfrageseitigen Wandels angewiesen. Um Substitutionsprozesse anzustoßen bzw. zu beschleunigen, bedürfen Innovationen flankierender Maßnahmen und der kooperativen Mobilisierung finanzieller und personeller Ressourcen in Zusammenarbeit von Wirtschaft und Politik. Neben staatlichen Finanzierungs- und Fördermaßnahmen, Innovations- und Marktfördereinrichtungen (wie der Agentur für nachwachsende Rohstoffe) spielt die Kooperation von Unternehmen, Politik und zivilgesellschaftlichen Gruppen in strukturpolitische Netzwerken (z.B. Bioraffinerie-Forschungszentrum CBP) eine zentrale Rolle. Sie fungieren als Treiber der Wandlungsprozesse, indem sie, Technologien entwickeln und deren Ausbreitung beeinflussen. Zwar ist in jüngster Zeit eine Reihe von Initiativen ergriffen worden, die sich um einen Feedstock Change bemühen. Mit der Bioökonomiestrategie wurde ein Dokument vorgelegt, das sich um eine Bündelung und Zusammenschau einzelner Initiativen bemüht und eine langfristige Orientierung liefert. Gleichwohl fehlt es bis dato an einer umfassenden und kohärenten nationalen Strategie und Roadmap für die Erschließung der Potenziale für einen Feedstock Change. Ein Vorbild könnten die USA sein, wo nicht nur Forschung und Entwicklung, sondern die Stimulation des Marktes für biobasierte Chemikalien konsequenter unterstützt und gefördert wird.

### **Umbau der Förderkulisse bei der energetischen und stofflichen Nutzung von Erdöl und Biomasse**

Ein Feedstock Change setzt den Abbau der wettbewerbsverzerrenden Förderbedingungen, der die stoffliche Nutzung von Biomasse erschwert, voraus. Die vorliegenden Reformvorschläge (u.a. von VCI und UBA) zielen beispielsweise darauf ab, stoffliche Nutzungen von Biomasse zur Erfüllung der existierenden Quoten der Renewable Energy Directive anrechenbar zu machen und zu einer Renewable Energy und Material Directive weiter zu entwickeln (Carus et al. 2014). Hinzu kommt das Problem der Treibhausgasemissionen aus den Produkten der chemischen Industrie. Bisher werden die Emissionen aus der energetischen Entsorgung von Kunststoffen und chemischen Produkten anderen Sektoren, dort wo sie verbrannt werden, zugeordnet. Das muss nicht so bleiben, denkbar wäre, diese „Emissionen im Rahmen einer erweiterten Produktverantwortung dem Sektor Chemische Industrie anzulasten“ (Lahl 2011).

## **Erschließung neuer C-Quellen jenseits von fossilen Rohstoffen und Biomasse**

Es ist davon auszugehen, dass Verfügbarkeit und Preis von nachwachsenden Rohstoffen aufgrund der Nutzungskonkurrenzen limitierende Faktoren für einen umfassenden Feedstock Change der chemischen Industrie sein werden. Dies betrifft insbesondere die Knappheit des Angebots an Biomasse, das nur unter Inkaufnahme von ökologischen Nebeneffekten stark ausgeweitet werden kann (IFW 2015). Solche Nebeneffekte sind in globaler Perspektive insbesondere indirekte Landnutzungsänderungen und Landnutzungskonflikte. Der Umstieg auf eine bio-basierte Chemie ist daher nicht nur ein „bloßes“ technologisches und wirtschaftliches Substitutionsproblem, vielmehr muss der Wandel der Rohstoffbasis an systemischen Zusammenhängen ansetzen. Dies bezieht sich auf Konflikte um Anbauflächen, Betreibermodelle für die integrierte Nutzung von Biomasse, geeignete politische Rahmenbedingungen bis hin zu Veränderungen im Nutzer- und Verbraucherverhalten. Neue Bioproduktionssysteme auf Basis der Synthetischen Biologie werfen auch Fragen nach neuen Risiken und dem Umgang mit ihnen auf (Sauter 2015), insbesondere wenn man bedenkt, dass die Ansätze nicht nur wirtschaftlich effizient, sondern ökologisch und sozial nachhaltig sein sollen. Inwieweit ein nachhaltiger Feedstock Change möglich ist, hängt entscheidend von der sozial-ökologischen Konfiguration und Einbettung in natürliche Systeme ab. Dabei zeigt sich, dass eine vollständige Umstellung der Rohstoffbasis der Chemieindustrie auf Biomasse fragwürdig ist. Das Ziel kann jedenfalls nicht sein, möglichst viel Biomasse mit geringer Wertschöpfung hoch subventioniert (wie derzeit) in den Markt zu bringen. Angesichts der Kritikalität der Biomasseverfügbarkeit und der Einschätzung, dass die Nutzung nur mit ökologischen Nebenfolgen stark zunehmen kann, geht es auch darum neue Rohstoffquellen für die Chemieindustrie zu erschließen. Eine solche Alternative könnten CO<sub>2</sub>-basierte Kohlenwasserstoffe aus erneuerbarer Energie darstellen. Möglicherweise liegt in einer „CO<sub>2</sub>-basierten“ Chemie ein wesentlich größeres Potential für ein Feedstock Change als in dem Leitbild einer biobasierten Chemie. Daher sollte die Innovationsräume auch auf diesem Gebiet deutlich ausgeweitet werden.

## Experteninterviews

Interviews wurden geführt mit:

- Tilman Benzing, VCI Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt/M.
- Michael Carus, nova-Institut GmbH, Hürth

## Literaturverzeichnis

- Bioökonomierat (2014): Die deutsche Chemieindustrie – Bedeutung für die Wettbewerbsfähigkeit der Bioökonomie, BÖRMEMO 02/3.6.2014.
- BioPro (2014): Industrielle Biotechnologie: Schwieriger Wechsel der Rohstoffbasis, Bioökonomie Baden-Württemberg, <https://www.biooekonomieb.w.de/de/fachbeitrag/dossier/industrielle-biotechnologieschwieriger-wechsel-der-rohstoffbasis/>.
- Bley, T. (2014): Bioprozesstechnik - Status und aktuelle Entwicklungen. ZVEI Workshop Zukunftsmarkt Biokatalyse - Potenziale, Herausforderungen und neue Perspektiven der Automation am 12. März 2014 in Frankfurt/M. .
- Bley, T., Pfefferle, W., & Holtmann, D. (2012). Biotechnologie von morgen. BIoSpektrum, 7/2012, S. 787-788.
- BMBF (2014): Wegweiser Bioökonomie, <https://www.bmbf.de/pub/Wegweiser-Biooekonomie.pdf>.
- BMBF (2014): Bioraffinerien, [www.bmbf.de/de/6164.php](http://www.bmbf.de/de/6164.php).
- BMBF (2014): ERA-Net Industrielle Biotechnologie, <http://www.bmbf.de/de/14999.php>.
- BMBF (2014): Nächste Generation biotechnologischer Verfahren - Biotechnologie 2020, <http://www.bmbf.de/de/biotechnologie2020plus.php>.
- BMBF (o.J.): Innovationsinitiative industrielle Biotechnologie, <http://www.bmbf.de/de/16336.php>.
- BMBF, BIOCOM: Nächste Generation Biotechnologischer Verfahren, Ergebnisse der Fachgespräche, Berlin, Oktober 2010 bis Januar 2011.
- BMEL (2013): Nationale Politikstrategie: Bioökonomie, [http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/BioOekonomiestrategie.pdf;jsessionid=E85FAD3FFC7CE5ADA96A502BD4ED567B.2\\_cid296?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/BioOekonomiestrategie.pdf;jsessionid=E85FAD3FFC7CE5ADA96A502BD4ED567B.2_cid296?__blob=publicationFile).
- Carus, M. et al. (2014): Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Texte 2/2014.
- CHEManager (2013): Rohstoffe in der chemischen Industrie: <http://www.chemanager-online.com/news-opinions/grafiken/rohstoffe-der-chemischen-industrie>.
- CHEManager (2015): Zehn Jahre Bioökonomie: Bilanz und Ausblick, Rohstoff- und Energieeffizienz bestimmen Wirtschaftlichkeit und sind für die Zukunft unumgänglich, <http://www.chemanager-online.com/themen/konjunktur/zehn-jahre-biooekonomie-bilanz-und-ausblick>.
- Dağışan, P; Schulz, S., Trockel, S. (2014): Das neue EEG 2014 – Was ändert sich?, Energie Dialog NRW <http://www.energedialog.nrw.de/das-neue-ee-2014-was-aendert-sich/>.
- DECHEMA, GDCh, VCI und DGfK, (2010): Rohstoffbasis im Wandel, Positionspapier, [https://www.gdch.de/fileadmin/downloads/Service\\_und\\_Informationen/Presse\\_Oeffentlichkeitsarbeit/PDF/pos\\_rohst\\_de.pdf](https://www.gdch.de/fileadmin/downloads/Service_und_Informationen/Presse_Oeffentlichkeitsarbeit/PDF/pos_rohst_de.pdf).

- DECHEMA. (2011). Biotechnologie von morgen., [http://www.dechema.de/biotech\\_media/Bio-tech\\_von\\_morgen\\_ZF\\_2011-p-630.pdf](http://www.dechema.de/biotech_media/Bio-tech_von_morgen_ZF_2011-p-630.pdf).
- Fatheuer, Th. (2015): Biomasse für die Green Economy, Thesen zum Handlungsfeld Bioökonomie im entwicklungspolitischen Kontext, FDCL Arbeitspapier, Berlin.
- FDCL (2015a): Bioökonomie, <https://www.fdcl.org/tag/biooekonomie/>.
- FDCL (2015b): Green Grabbing und Bioökonomie in Lateinamerika, <http://lateinamerika-nachrichten.de/?aaartikel=green-grabbing-und-biooekonomie-in-lateinamerika>.
- Fichter, K. (2005): Interaktives Innovationsmanagement, in: Fichter, K.; Paech, M.; Pfriem, R.: Nachhaltige Zukunftsmärkte, Marburg.
- FNR 2014: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Schriftenreihe 34, Gülzow.
- Hirth, Th. (o.J): Rohstoffwandel – Anforderungen an biotechnologische und chemische Prozesse, Institut für Grenzflächenverfahrenstechnik der Universität Stuttgart und Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Stuttgart, [http://www2.mpimagdeburg.mpg.de/projects/cna/cna/news/Abstract\\_Hirth\\_030811.pdf](http://www2.mpimagdeburg.mpg.de/projects/cna/cna/news/Abstract_Hirth_030811.pdf).
- IfW (2015): Institut für Weltwirtschaft an der Universität Kiel, Sachstandsbericht über vorhandene Grundlagen und Beiträge für ein Monitoring der Bioökonomie: Wirtschaftliche Kennzahlen, vorgelegt durch Delzeit, R., Klepper, G., Söder, M., <https://www.ifw-kiel.de/forschung/umwelt/landnutzung/aktuelle-projekte/2015-12-04.6824252015/download>.
- ISI 2006: Potenzialanalyse der industriellen, weißen Biotechnologie, [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/t/de/publikationen/potenzialanalyse\\_weisse\\_bt.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/t/de/publikationen/potenzialanalyse_weisse_bt.pdf).
- Lahl, U.; Zeschmar-Lahl, B. (2012): weg vom Öl durch „feedstock change“ in der Chemieindustrie, [http://www.leibniz-institut.de/archiv/lahl\\_23\\_07\\_12.pdf](http://www.leibniz-institut.de/archiv/lahl_23_07_12.pdf).
- Lindinger, M. (2009): Rohstoffwandel. Ein halbes Jahrhundert bis zur grünen Wende, <http://www.faz.net/aktuell/wissen/erde-klima/rohstoffwandel-ein-halbes-jahrhundert-bis-zur-gruenen-wende-1855486.html>.
- Lippert, F. (2015): Rohstoffwandel in der Chemie, BASF, [https://www.infraserv.com/media/content/aktuell/perspectives\\_1/2015/referenten/150615\\_ISH\\_perspectives\\_Praesentation\\_Lippert.pdf](https://www.infraserv.com/media/content/aktuell/perspectives_1/2015/referenten/150615_ISH_perspectives_Praesentation_Lippert.pdf).
- NABU (2015): Noch ganz am Anfang. Viele offene Fragen beim Ausbau der Bioökonomie, <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/ressourcenschonung/biooekonomie/19308.html>.
- Petschow, U. (2011): Bioökonomie – Können neue Technologien die Energieversorgung und die Welt-ernährung sichern?, NABU, [https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/gentechnik/nabu-bio\\_\\_konomie.pdf](https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/gentechnik/nabu-bio__konomie.pdf).
- Sauter, A., S. Albrecht, D. van Doren, H. König, T. Reiß, R. Trojok unter Mitarbeit von S. Elsbach (2015): Synthetische Biologie – die nächste Stufe der Bio- und Gentechnologie. Endbericht zum

- TA-Projekt. Büro für Technikfolgen-Abschätzung des Deutschen Bundestages. Arbeitsbericht Nr. 164. Berlin.
- Sommer, S., (2011): Konzerne verzögern Öl-Alternativen, <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/industrie/a-736239.html>.
- Spiegel online, (2015), Studie zur Klimaerwärmung: Diese Brennstoffe müssen im Boden bleiben, 8.1.201, 5 <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/klima-wieviel-kohle-erdgas-und-erdoel-darf-noch-gefoerdert-werden-a-1011767.html>.
- Thöne, M. (2010): Steuerliche Instrumente in der Prüfung, Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln, [www.nova-institut.de/download/oekologische-innovationspolitik-attach4](http://www.nova-institut.de/download/oekologische-innovationspolitik-attach4).
- TU München, (2015): <https://www.biotech.mse.tum.de/industrielle-biotechnologie/>.
- VCI (2013): Die deutsche chemische Industrie 2030, VCI-Prognos-Studie, Frankfurt/M., <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/langfassung-prognos-studie-30-01-2013.pdf>.
- VCI (2015): VCI Verband der Chemischen Industrie e.V, Positionspapier, Chancen und Grenzen des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie, <https://www.vci.de/langfassungen-pdf/chancen-und-grenzen-des-einsatzes-nachwachsender-rohstoffe-in-der-chemischen-industrie.pdf>.
- VCI, BIB (2014): Forschungs- und technologiepolitische Empfehlungen der chemischen und biotechnischen Industrie zur Ressourceneffizienz und zur Rohstoffbasis im Wandel, <https://www.vci.de/langfassungen-pdf/forschungs-und-technologiepolitik-fuer-ressourceneffizienz-und-breitere-rohstoffbasis.pdf>.
- VCI, DIB (2011): Statusbericht zu möglichen Potenzialen von Bioraffinerien, <https://www.vci.de/langfassungen-pdf/statusbericht-zu-moeglichen-potenzialen-von-bioraffinerien-fuer-die-bereitstellung-von-rohstoffen-in-industrie-und-forschung.pdf>.
- VDI (2006): Biokatalyse in der industriellen Produktion. Düsseldorf.
- Westphal, K. (2012): Die Energiewende global denken, [https://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/aktuell/2012A37\\_wep.pdf](https://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/aktuell/2012A37_wep.pdf).
- Zeng, A.-P. (2014): Neue Bioproduktionssysteme: Ansätze, Perspektiven und die Rolle der Automation. ZVEI Workshop Zukunftsmarkt Biokatalyse - Potenziale, Herausforderungen und neue Perspektiven der Automation, am 12. März 2014 in Frankfurt/M.

## **Impressum**

IZT - Institut für Zukunftsstudien  
und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH

Tel.: +49 (0) 30 803088-0

Fax: +49 (0) 30 803088-88

Schopenhauerstr. 26  
14129 Berlin

Berlin, AG Charlottenburg, HRB 18 636

Wissenschaftlicher Direktor  
Prof. Dr. Stephan Rammler

Geschäftsführer  
Dr. Roland Nolte

Aufsichtsratsvorsitzende  
Doris Sibum

ISBN 978-3-941374-37-9

[www.izt.de](http://www.izt.de)

---