



Die
Bundesregierung



Roadmap Bioraffinerien

im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur
stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe

Vorwort

Mit der im Jahr 2010 vorgelegten „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ hat die Bundesregierung die Ziele einer biobasierten Wirtschaft formuliert: Wir wollen mit Forschung und Innovation einen Strukturwandel von einer erdöl- hin zu einer bio-basierten Industrie ermöglichen. Um die mit der biobasierten Wirtschaft eng verbundenen Chancen für Wachstum und Beschäftigung zu realisieren, brauchen wir ganzheitliche und nachhaltige Ansätze.

Dazu gehört auch, nachwachsende Rohstoffe stofflich und energetisch noch besser zu nutzen als bisher. Dabei müssen wir die gesamte Wertschöpfungskette von der Biomasseproduktion bis zum Endprodukt berücksichtigen. Eine wichtige Aufgabe dabei können Bioraffinerien übernehmen, die künftig eine breite Palette von Produkten erzeugen können. Derzeit befinden sich solche Bioraffinerie-Konzepte überwiegend noch in der Phase von Forschung und Entwicklung. Um den aktuellen Stand und den weiteren Entwicklungsbedarf verschiedener Bioraffinerie-Konzepte zu ermitteln, hat die Bun-

desregierung mit dem Aktionsplan zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe die Erarbeitung einer „Roadmap Bioraffinerien“ unter Einbeziehung von Wirtschaft und Wissenschaft angekündigt. Dieser umfassende Überblick über verschiedene Technologien und über Wege zur Realisierung liegt nun vor. Unser besonderer Dank gilt den mehr als 30 Experten aus verschiedenen Fachgebieten, die ihr großes Fachwissen eingebracht haben und mit hohem persönlichen Einsatz zum Gelingen der Roadmap beigetragen haben. Die Ergebnisse zeigen, dass noch einige Hürden überwunden werden müssen, um das gesamte Potenzial von Bioraffinerien zu erschließen. Auf dem Weg dorthin hat der Gleichklang wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer Belange für uns hohe Priorität.

Die Bundesregierung wird notwendige Weiterentwicklungen auch künftig durch eine gezielte Forschungsförderung unterstützen. Von zentraler Bedeutung wird auch das verstärkte Engagement der Wirtschaft sein. Es lohnt sich: Denn wir bewegen uns auf einem echten Zukunftsfeld.



Annette Schavan

Prof. Dr. Annette Schavan,
Bundesministerin für Bildung und Forschung



Ilse Aigner

Ilse Aigner,
Bundesministerin für Ernährung,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Inhalt

Vorwort	3
Kurzfassung „Roadmap Bioraffinerien“	6
1 Motivation	18
2 Bioraffinerien im Kontext der Biomassenutzung	19
2.1 Bioraffinerien im politischen Kontext	19
2.2 Bioraffinerien im Kontext anderer Biomassenutzungspfade	20
3 Definition und Systematik von Bioraffinerien, Stand der Technik und Ausgangslage	22
3.1 Begriffsbestimmung und Abgrenzung	22
3.2 Nachhaltige Biomasse für Bioraffinerien	23
3.3 Klassifizierung	25
3.4 Bioraffinerie-Wertschöpfungskette versus petrochemische Wertschöpfungskette	33
3.5 Bioraffinerie-Konzepte	34
3.6 Entwicklungsansätze	34
3.7 Entwicklung von Bioraffinerien in Deutschland – Einordnung in den internationalen Kontext	36
4 Technologische Beschreibung und Analyse	40
4.1 Zucker- und Stärke-Bioraffinerie	40
4.2 Pflanzenöl- und Algenlipid-Bioraffinerie	46
4.3 Lignocellulose-Bioraffinerie und Grüne Bioraffinerie	51
4.4 Synthesegas-Bioraffinerie	56
4.5 Biogas-Bioraffinerie	59
5 Ökonomische und ökologische Einordnung	61
5.1 Allgemeine Aspekte der Analyse und Bewertung von Bioraffinerien	61
5.2 Ökonomische und ökologische Aspekte von Anbau, Bereitstellung und Transport der Rohstoffe	63
5.3 Ökonomische und ökologische Aspekte der betrachteten Bioraffineriekonzepte	70
5.4 Diskussion und Schlussfolgerung	79
6 Herausforderungen zur Etablierung von Bioraffinerien – SWOT-Analyse	82
6.1 Zucker- und Stärke-Bioraffinerie	83
6.2 Pflanzenöl- und Algenlipid-Bioraffinerie	85
6.3 Lignocellulose-Bioraffinerie und Grüne Bioraffinerie	87
6.4 Synthesegas-Bioraffinerie	90
6.5 Biogas-Bioraffinerie	92
7 Handlungsbedarf	93
7.1 Handlungsbedarf für Forschung, Entwicklung und Implementierung	93
7.2 Forschungspolitischer Handlungsbedarf, Verbesserung der Rahmenbedingungen	95
8 Ausblick	97
Anmerkungen	99
Anhang	104

Kurzfassung „Roadmap Bioraffinerien“

Motivation und Entstehung der „Roadmap Bioraffinerien“

Im Hinblick auf die weitere globale Bevölkerungsentwicklung, knapper werdende fossile Rohstoffquellen und den fortschreitenden Klimawandel stehen Deutschland wie auch alle anderen Länder der internationalen Staatengemeinschaft vor gewaltigen Herausforderungen. Die zentrale Aufgabe wird sein, eine wachsende Weltbevölkerung ausreichend mit Nahrungsmitteln, Energie und Rohstoffen zu versorgen und dabei darauf zu achten, Natur und Umwelt nicht zu beeinträchtigen und klimaschädliche Treibhausgase zu verringern. Hierfür sind intelligente Lösungsansätze zu entwickeln, die einer ressourceneffizienten, nachhaltigen Wirtschaftsweise gerecht werden. Unter dieser Prämisse könnten Bioraffinerie-Konzepte für die zukünftige Bioökonomie bei der Verwertung und Konversion biogener Roh- und Reststoffe eine wichtige Rolle spielen, da sie eine weitgehend abfallfreie Biomassenutzung über effiziente Konversionsrouten versprechen und Wege zur energetischen und stofflichen Nutzung von Biomasse als zentralen Elementen einer bio-basierten Wirtschaft eröffnen.

Weltweit ist seit einigen Jahren ein verstärkter Trend zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe festzustellen. Die wesentlichen Bestimmungsfaktoren hierfür sind die Preisentwicklungen und regionalen Verfügbarkeiten auf den Märkten für fossile Rohstoffe, z. T. ordnungspolitische Maßnahmen zur Förderung des Ausbaus von Energien aus erneuerbaren Quellen und nicht zuletzt auch ein stärkeres Bewusstsein für Themen wie etwa Nachhaltigkeit und Klimaschutz. Allein in Deutschland werden bereits auf über 2 Millionen Hektar oder fast einem Fünftel der Ackerfläche nachwachsende Rohstoffe angebaut. Dabei hat die energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe ihren Beitrag zur Energieversorgung stetig steigern können. Die Zuwachsraten bei der stofflichen Nutzung fielen geringer aus, obgleich Deutschland auch hier bereits heute einen Spitzenplatz einnimmt. Dabei hat insbesondere die stoffliche Verwendung nachwachsender Rohstoffe ein hohes Innovationspotenzial im Hinblick auf neue Technologien und Produkte. Sie kann zur Wertschöpfung und Sicherung von Arbeitsplätzen auch im ländlichen Raum beitragen. Die stoffliche Nutzung leistet darüber hinaus auch über die Bindung von Kohlenstoff in langlebigen Produkten einen deutlichen Beitrag zum Erreichen

der nationalen, europäischen und internationalen Klimaschutzziele.

Nicht zuletzt wegen dieser Vorteile hatte der Deutsche Bundestag die Bundesregierung im Jahr 2008 aufgefordert, eine Strategie für die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe zu erarbeiten und daraus auch Schwerpunkte für die weitere Forschungsförderung abzuleiten. Bereits im September 2009 hat das Bundeskabinett daraufhin den „Aktionsplan der Bundesregierung zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe“ verabschiedet. Mit diesem Aktionsplan werden u. a. verschiedene Handlungsfelder zur Weiterentwicklung der stofflichen Nutzung, also der Verwendung außerhalb des Energiesektors, identifiziert. Eines dieser Handlungsfelder beinhaltet die Themen „Industrielle Biotechnologie“ und „Bioraffinerien“. Als eine durchzuführende Maßnahme ist dort die „Erarbeitung einer Roadmap zu Bioraffinerien durch Vertreter von Wirtschaft, Forschung und Bundesministerien“ festgelegt. Die „Roadmap Bioraffinerien“ leistet somit einen Beitrag zur Strategie der Bundesregierung zur Entwicklung einer Bioökonomie im Sinne der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“, zum Energiekonzept der Bundesregierung, zur Klimaschutzinitiative der Bundesregierung sowie zu den Aktionsplänen zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe der Bundesregierung.

Im Zuge der Umsetzung des Aktionsplans hatten sich das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) als wesentliche „Forschungsförderer“ in diesem Bereich auf eine gemeinsame Federführung unter enger Einbindung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) verständigt. Die Ressorts wählten über 30 namhafte Experten aus Wissenschaft und Industrie für eine Arbeitsgruppe aus, deren Mitglieder die Autoren der vorliegenden „Roadmap Bioraffinerien“ sind. Für den Vorsitz konnte Prof. Dr. Kurt Wagemann, Geschäftsführer der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V., gewonnen werden.

Die erste Sitzung der Gesamtarbeitsgruppe fand im September 2010 statt. Als ein wesentliches Ergebnis wurden Unterarbeitsgruppen zu verschiedenen

technologischen und ökonomisch/ökologischen Fragen eingerichtet. Die vorliegende Endfassung der Roadmap stellt auf nahezu 100 Seiten eine detaillierte Übersicht über die einzelnen Plattformen und Technologien dar, die es bislang in dieser Form nicht gab. Die einzelnen Bioraffinerietypen werden zudem umfassend analysiert.

Zum besseren Verständnis sei zusätzlich darauf hingewiesen, dass die Roadmap vorrangig die Positionen der beteiligten Experten und nicht in jedem Fall die Haltung der Bundesregierung darstellt. Auf Grund der Komplexität dieser Langfassung wurde entschieden, zusätzlich eine Kurzfassung herauszugeben. Nachfolgend werden die wichtigsten Inhalte und Ergebnisse der „Roadmap Bioraffinerien“ zusammengefasst und bewertet. Für detailliertere und vertiefende Informationen wird an dieser Stelle auf die Langfassung verwiesen.

Zusammenfassung der Roadmap

Was ist unter einer Bioraffinerie zu verstehen?

Eine Bioraffinerie zeichnet sich durch ein explizit integratives, multifunktionelles Gesamtkonzept aus, das Biomasse als vielfältige Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung eines Spektrums unterschiedlicher Zwischenprodukte und Produkte (Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie inkl. Biokraftstoffe) unter möglichst vollständiger Verwendung aller Rohstoffkomponenten nutzt; als Koppelprodukte können ggf. zusätzlich auch Nahrungs- und/oder Futtermittel anfallen. Hierfür erfolgt die Integration unterschiedlicher Verfahren und Technologien.

Die Verfahrenskette der Bioraffinerie besteht im Wesentlichen aus Anlagenkomponenten zur Vorbehandlung und Aufbereitung der Biomasse sowie zur Auftrennung der Biomassekomponenten (Primärraffination) und nachfolgenden Konversions- und Veredelungsschritten (Sekundärraffination).

In der Primärraffination erfolgt die Auftrennung der Biomassekomponenten zu sogenannten Intermediaten (z. B. Cellulose, Stärke, Zucker, Pflanzenöl, Lignin, Pflanzenfasern, Biogas, Synthesegas), üblicherweise unter Vorbehandlung und Konditionierung der Biomasse. Während die Komponententrennung zentral am Standort der Bioraffinerie stattfindet, können ein oder mehrere Prozesse der Vorbehandlung/Konditionierung auch dezentral

erfolgen. In der Sekundärraffination wird über weitere Konversions- und Veredelungsschritte eine größere Zahl an Produkten hergestellt. Bei der Primärraffination und/oder Sekundärraffination entstehende Koppelprodukte können für Prozessenergie oder ggf. bei Eignung und Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben für Nahrungs- oder Futtermittel verwendet werden.

In Bioraffinerien erfolgt zudem immer eine Koppelung von verschiedenen stofflichen und energetischen Nutzungspfaden. Allerdings hat die Praxis gezeigt, dass eine Bioraffinerie aus wirtschaftlichen Gründen entweder stärker stofflich oder energetisch orientiert ist.

Zur Umsetzung eines Bioraffineriekonzepts können grundsätzlich zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt werden: *Bottom-up* und *Top-down*. Handelt es sich um die Erweiterung einer bereits vorhandenen Biomasseverarbeitungsanlage (bspw. Zucker-, Stärke-, Zellstoffwerk, Ölmühle, Ethanolanlage), spricht man vom *Bottom-up*-Ansatz. Im Gegensatz dazu spricht man vom *Top-down*-Ansatz, wenn es sich um neu-konzipierte, hoch integrierte Anlagen handelt, die für die Nutzung verschiedenster Biomassefraktionen und zur (abfallfreien) Erzeugung einer Vielfalt von Produkten für unterschiedliche Märkte ausgelegt sind. Dabei wird nicht an bestehende Prozesse der Konversion von Biomasse angeknüpft, sondern die Anlagen für Primär- und Sekundärraffination werden eigens auf Basis einer Bioraffinerieplattform zur Erzeugung unterschiedlicher Produkte entwickelt und errichtet.

Sowohl der *Bottom-up* als auch der *Top-down* Entwicklungsansatz können zentralisiert an einem neuen Standort („green field“) oder an einem bereits bestehenden Industriestandort („brown field“) umgesetzt werden. Im letzteren Fall geschieht dies vorzugsweise durch Integration in einen bestehenden Industrie- oder Chemiepark bzw. als Weiterentwicklung bestehender Biomassekonversionsanlagen. Es ist aber auch denkbar, dass Komponenten der Primärraffination (bspw. die Biomassekonditionierung) dezentral organisiert sind, so dass eine gemischte Struktur entsteht.

Wo stehen wir heute?

In Deutschland werden Bioraffineriekonzepte schon seit einigen Jahren verfolgt. Es gibt verschiedene Aktivitäten zur Untersuchung und Entwicklung von diversen Bioraffineriepfaden, die sich in unterschiedlichen Realisierungsstadien befinden. Beispiele dafür sind:

- Zucker/Stärke-Bioraffinerie auf Basis Getreide/ Zuckerrüben der Firma Südzucker/CropEnergies in Zeitz (Sachsen-Anhalt)
- Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis Holz eines Konsortiums unter Koordination der DECHEMA als Teil des Chemisch-Biotechnologischen Prozesszentrums der Fraunhofer-Gesellschaft am Chemiestandort Leuna (Sachsen-Anhalt)
- Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis Stroh der Firma Süd-Chemie in München und Straubing (Bayern)
- Grüne Bioraffinerie auf Basis Grassilage der Firma Biowert in Brensbach (Hessen)
- Grüne Bioraffinerie auf Basis Gras der Firma biopos in Selbelang (Brandenburg)
- Synthesegas-Bioraffinerie auf Basis Stroh des KIT in Karlsruhe (Baden-Württemberg)

Eine SWOT-Analyse (siehe Langfassung) zeigt, dass Deutschland auch im Hinblick auf das Thema Bioraffinerien im europäischen und internationalen Rahmen gut aufgestellt ist und eine hervorragende Ausgangsposition für die weiteren Entwicklungen hat.

Während in einzelnen EU-Mitgliedstaaten (z. B. Deutschland, Frankreich, Niederlande) bereits seit etwa zehn Jahren Entwicklungen zum Aufbau von Bioraffinerien im Gange sind, steht das Thema auf EU-Ebene erst seit etwa drei Jahren im Fokus. Die hier vorgesehenen finanziellen Mittel sind vergleichsweise gering. Im aktuellen 7. EU-Forschungsrahmenprogramm (FP7) werden erstmals explizit integrierte Bioraffinerie-Konzepte umfassend mit einem Gesamtvolumen von über 70 Millionen Euro gefördert. Die Inhalte der integrativen Bioraffinerie-Projekte sind sehr unterschiedlich und umfassen meistens die Entwicklung neuer Bioraffinerieprozesse und -produkte, die Optimierung und den Ausbau bestehender Konversionsprozesse und die Demonstration von Forschungsergebnissen im industriellen Maßstab. Darüber hinaus wurde mit „Star-COLIBRI – Strategic Targets for 2020 – Collaboration Initiative on Biorefineries“ auch ein umfangreiches Projekt im Bereich „Forschungskoordination“ gefördert. Das Ziel von Star-COLIBRI war, die Zusammenarbeit zwischen sich ergänzenden Forschungsprojekten auf europäischer Ebene anzuregen, um den Fortschritt auf diesem Gebiet voranzutreiben und der Fragmentierung von Forschungsaktivitäten und -ergebnissen entgegenzuwirken. Im Verlauf dieses Projektes wurden zudem eine „Bioraffinerie-Forschungsagenda 2020“ und ein „Bioraffinerie-Vision-Dokument 2030“ angefertigt, die der europäischen Entwicklung des Bioraffineriebereiches einen Rahmen geben.

Was ist eine Bioraffinerie-Plattform, welche ausgesuchten Plattformen werden in der Roadmap genauer untersucht?

Als Bioraffinerie-Plattform bezeichnet man die bei der Primärraffination entstehenden Zwischenprodukte, die wiederum Ausgangsstoffe für die nachfolgende Sekundärraffination sind. Unter den Bioraffineriekonzepten haben sich folgende Pfade herauskristallisiert, die sich im Wesentlichen durch ihre Plattform und damit auch durch die Art der Sekundärraffination unterscheiden:

1. Zucker-Bioraffinerie bzw. Stärke-Bioraffinerie
2. Pflanzenöl-Bioraffinerie bzw. Algenlipid-Bioraffinerie
3. Lignocellulose (Cellulose, Hemicellulose und Lignin)-Bioraffinerie bzw. Grüne Bioraffinerie
4. Synthesegas-Bioraffinerie
5. Biogas-Bioraffinerie

Im Rahmen der Roadmap wurden diese Konzepte anhand von Anlagenbeispielen daher näher untersucht. Im Zuge der Arbeiten stellte sich heraus, dass für die Biogas-Bioraffinerie noch keine konkreten Bioraffineriepfade im Detail technologisch ausgelegt werden können. Für eine direkte stoffliche Nutzung des Biomethans im Sinne eines integrierten, lokalen Bioraffinerie-Konzeptes gibt es derzeit keine wirtschaftlichen Nutzungsoptionen, die bis 2030 (Zeithorizont der Roadmap) voraussichtlich realisierbar wären.

Wie sind ausgewählte Bioraffinerie-Konzepte zu bewerten?

Die folgenden Aussagen und Analysen beschränken sich auf die o. a. Konzepte 1–4. Auch hierfür ist allerdings zu bemerken, dass vollständige und valide Datengrundlagen für eine Einordnung bzw. einen Vergleich der Analyseergebnisse teilweise heute noch nicht zur Verfügung stehen. Somit sind bislang für viele Bioraffineriekonzepte nur eingeschränkte Bewertungsaussagen möglich. Hierbei ist insbesondere auch die Verfügbarkeit nachhaltig erzeugter Biomasse zu berücksichtigen.

1. Zucker-Bioraffinerie bzw. Stärke-Bioraffinerie

a) Zucker-Bioraffinerie

Als Rohstoffbasis für die Zuckergewinnung (Primärraffination) können z. B. Zuckerrüben oder Zuckerrohr dienen. In der Weiterverarbeitung wird neben der Produktion von Haushaltszucker, Fermentationsrohstoffe, Kristallzucker als Ausgangsstoff für chemische Zwischen- oder Fertigprodukte (Tenside), organische Säuren, Vitamine oder anorganische Salze eingesetzt. Die chemischen Zwischenprodukte bzw. die Fermentationsprodukte (z. B. Aminosäuren,

Milchsäure, Zitronensäure, Gluconsäure und die Ester und Salze dieser organischen Säuren) sind dann entweder wiederum chemische Zwischenprodukte oder werden zu Fertigprodukten weiterverarbeitet.

b) Stärke-Bioraffinerie

Als Rohstoffbasis für die Stärkegewinnung können verschiedene Pflanzen dienen. In Deutschland sind dies im Wesentlichen Kartoffeln und Getreide (Weizen und Mais). Produkte sind neben nativer Stärke auch Stärkemodifikate und Stärkeverzuckerungsprodukte. Die entstehenden Stärkemodifikate (bspw. Stärke-ester, Stärkeether, Dextrine) und Stärkemischungen

werden dann weiterverarbeitet zum Einsatz als Verdickungsmittel im Lebensmittelbereich, als Additiv in der Papierherstellung sowie als Zwischenprodukt in der kosmetischen Industrie. Darüber hinaus können verschiedene Fermentationsprodukte (vgl. hierzu 1a) erzeugt und weiterverarbeitet werden.

Hinsichtlich des Investitionsbedarfs für eine Anlage in der Größenordnung von 200.000 t/a Weizen wäre von etwa 120 Millionen Euro auszugehen. Eine treffsichere ökonomische Einordnung einer solchen Anlage bedarf weiterer detaillierter Studien. Das gilt auch für die ökologische Bewertung.

Tabelle: SWOT-Analyse der Zucker- und Stärke-Bioraffinerie

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> → es wird auf bereits bestehende Strukturen der Zucker- und Stärkeindustrie aufgebaut → bereits europäisch aufgestellte deutsche Zucker- und Stärkeindustrie → starker deutscher Maschinen- und Anlagenbau in relevanten Bereichen, der bereits global orientiert ist → starke Forschung und Entwicklung in biotechnologischer Konversion von Kohlenhydraten in Deutschland → Rohstoffe in Deutschland, Europa und global verfügbar → Erzeugung von Überschüssen in Deutschland bei den Rohstoffen Zuckerrübe und Weizen ist möglich → technologisch weit entwickelte Primärraffination zu den Plattformen Saccharose und Stärke → Erfahrungen zur chemischen und biotechnologischen Konversion von Kohlenhydraten sind vorhanden, wobei die Palette an Zwischenprodukten aus der Sekundärraffination erweitert werden muss 	<ul style="list-style-type: none"> → Produktdiversifizierung noch nicht ausreichend; Veredlung von Zwischenprodukten zu neuen Produkten ist zu verbessern → integrierte Produktion von biobasierten Produkten und Bioenergie ist ausbaufähig → Verknüpfung der Zucker-/Stärkeindustrie mit der chemischen Industrie ist unterentwickelt
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> → Weiterentwicklung bestehender Standorte der Zucker-/Stärkeindustrie über ein <i>Bottom-up</i>-Entwicklungsszenario zu integrierten Bioraffineriestandorten → Zusätzliche Wertschöpfung durch die Integration weiterer chemischer und biotechnologischer Prozesse und Produkte → Realisierung von Synergieeffekten durch gekoppelte Prozesse Exportmöglichkeiten von deutschen Technologien und Anlagen basierend auf Zucker und Stärke zur Errichtung von Zucker- und Stärke-Bioraffinerien im Ausland 	<ul style="list-style-type: none"> → deutsche Zucker- und Stärkeindustrie global in relevanten Standorten (Brasilien, USA, Südostasien) schwach positioniert → Rohstoffverknappung durch zunehmenden Bedarf an Zucker und Stärke für den Nahrungsmittelbereich

2. Pflanzenöl-Bioraffinerie bzw. Algenlipid-Bioraffinerie

a) Pflanzenöl-Bioraffinerie

Ausgangsstoffe sind Ölsaaten und -früchte. Für die Weiterverarbeitung steht als Rohprodukt aus der Primärraffination natives Pflanzenöl (Fette und fette Öle) zur Verfügung. Neben z. B. der Verwendung als Kraftstoff ist Pflanzenöl ein wertvoller Rohstoff für die Oleochemie bzw. für die Bioschmierstoffherstellung. Hier kann Pflanzenöl direkt verwendet werden (z. B. als Lösungsmittel), oder durch Spaltung werden Fettsäuren und Glycerin gewonnen. Fettsäuren wiederum sind Ausgangsstoffe für eine ganze Palette an chemischen Erzeugnissen und finden sich nach Veredelung bspw. in Kosmetika, Tensiden, Lacken und Farben wieder. Glycerin hat ebenfalls vielfältige Anwendungen. Die Weiterverarbeitung ergibt

Pharmaglycerin oder, über nachfolgende Konversionen und chemische Reaktionen, weitere chemische Zwischenprodukte und Erzeugnisse. Glycerin kann auch als Fermentationsrohstoff eingesetzt werden. Die Fermentationsprodukte sind entweder wiederum chemische Zwischenprodukte oder werden zu Fertigprodukten weiterverarbeitet. Anfallendes Extraktionsschrot oder Presskuchen werden i. d. R. als Futtermittel genutzt.

Die betrachteten Beispielanlagen (400.000 t/a Palmkerne bzw. 530.000 t/a Rapssaat) erfordern Investitionen in Höhe von ca. 100 Millionen Euro. Auch hier gilt, dass eine gesicherte Aussage über die ökologische und ökonomische Einordnung einer solchen Anlage heute noch nicht getroffen werden kann.

Tabelle: SWOT-Analyse der Pflanzenöl-Bioraffinerie

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> → es wird auf bereits bestehende Strukturen der Pflanzenölproduktion und -verarbeitung aufgebaut → bereits global aufgestellte deutsche Pflanzenöl-industrie bzw. global agierende Unternehmen sind in Deutschland engagiert → starker deutscher Maschinen- und Anlagenbau in relevanten Bereichen, der bereits global orientiert ist → forschungsintensive KMU zur stofflichen Veredelung von Pflanzenölen vorhanden → starke Forschung und Entwicklung zur Konversion von Pflanzenölen in Deutschland etabliert → Rohstoffe für langkettige Fettsäuren in Deutschland, Europa und global verfügbar → technologisch weit entwickelte Primärraffination zur Plattform Pflanzenöl → Erfahrungen zur chemischen und biotechnologischen Konversion von Pflanzenölen vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> → Rohstoffe für kurzkettige Fettsäuren in Deutschland und Europa nicht verfügbar, sondern nur in tropischen und subtropischen Ländern → wirtschaftliche Herstellung von Folgeprodukten aus Glycerin im Gegensatz zu denen aus Fettsäuren eher unterentwickelt → Primärraffination und Sekundärraffination oft noch nicht an einem Standort integriert → integrierte Produktion von biobasierten Produkten zusätzlich zu Bioenergie unterentwickelt
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> → Weiterentwicklung bestehender Standorte der Pflanzenölverarbeitung (bspw. Ölmühle) über ein <i>Bottom-up</i>-Entwicklungsszenario zu integrierten Bioraffineriestandorten → Zusätzliche Wertschöpfung durch die Integration chemischer und biotechnologischer Prozesse und Produkte auf Basis Glycerin und Fettsäuren → Exportmöglichkeiten von deutschen Technologien und Anlagen sowie Prozesschemikalien für die Verarbeitung von Pflanzenölen 	<ul style="list-style-type: none"> → Verlagerung der Herstellung von oleochemischen Zwischenprodukten in außereuropäische, rohstoff-nahe Länder; Bioraffinerien mit kurzkettigen Fettsäuren als Plattform entwickeln sich in den Herkunftsländern der Rohstoffe → Rohstoffverknappung durch zunehmenden Bedarf an Pflanzenölen für den Nahrungsmittelbereich und die Bioenergiebereitstellung; alternative Rohstoffquellen (bspw. Algenlipide, mikrobielle Lipide) noch nicht marktreif

b) Algenlipid-Bioraffinerie

Ausgangsstoffe zur Herstellung von Algenlipiden (Algenöl) sind Mikroalgen. Das Algenrohöl enthält neben Triglyceriden und polaren Membranlipiden weitere lipophile Algeninhaltsstoffe wie Carotinoide, Chlorophyll und Phytosterine, die in der Sekundärrefinerie selektiv extrahiert und modifiziert werden können. Die Triglyceride können entweder im Nahrungsmittelbereich oder im technischen Bereich verwendet werden. Triglyceride sind ein potenzieller Rohstoff für die Chemie. Im chemisch-technischen Bereich können Triglyceride direkt verwendet oder durch Spaltung Fettsäuren und Glycerin gewonnen werden. Fettsäuren wiederum sind Ausgangsstoffe für eine ganze Palette an chemischen Erzeugnissen und finden sich nach Veredelung bspw. in Kosmetika, Lacken, Farben und Tensiden wieder. Aus der entölten Algenbiomasse kann nach Trocknung proteinreiches Futtermittel hergestellt werden, oder die Algenrestbiomasse kann als Kosubstrat durch anaerobe Vergärung zu Biogas umgesetzt werden.

Die Nutzung von Mikroalgen als Rohstoff in Bioraffinerien erscheint im Vergleich mit der Nutzung traditioneller Anbaubiomasse vielversprechend, weil deren Photosyntheseleistung einen wesentlich höheren Wirkungsgrad erzielen kann und weil praktisch keine Nutzungs- bzw. Flächenkonkurrenzen auftreten. Für viele Teilprozesse einer Algenlipid-Bioraffinerie sind jedoch noch keine belastbaren Daten und Kennzahlen, sondern nur Labor- und Technikumsdaten verfügbar, auf deren Basis derzeit keine wirtschaftlich tragbare technologische Auslegung seriös machbar ist. Hier besteht noch großer Forschungsbedarf.

3. Lignocellulose-Bioraffinerie bzw. Grüne Bioraffinerie

a) Lignocellulose-Bioraffinerie

Als Rohstoffe sind für Deutschland aus Gründen der qualitativen und quantitativen Verfügbarkeit derzeit vor allem agrarische Reststoffe (Getreide- und Maisstroh) und Holz (Waldholz, Kurzumtriebsholz) von Bedeutung; zukünftig können jedoch auch

Tabelle: SWOT-Analyse der Algenlipid-Bioraffinerie

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> → starke Forschung und Entwicklung zu Mikroalgen in Deutschland → forschungsintensive KMU im Bereich der Kultivierung und Nutzung von Mikroalgen einschließlich der Technologieentwicklung (bspw. Photobioreaktoren, Aufarbeitungstechnik) → starker deutscher Anlagenbau in relevanten Bereichen 	<ul style="list-style-type: none"> → klimatische Voraussetzungen für die Kultivierung von Mikroalgen in Deutschland nicht optimal → Kreislaufführung und Rückführung der Nährstoffe ist noch nicht befriedigend gelöst → ungenügende Lösungsansätze für das Problem, dass eine hohe Produktivität von Mikroalgen einer geringen Konzentration gegenüber steht → Produktentwicklung und -veredelung unterentwickelt, insbesondere für Produkte, mit denen sich eine hohe Wertschöpfung erzielen lässt → nur geschlossene Photobioreaktoren in Deutschland anwendbar; Aufwand für die Biomasseproduktion und Aufarbeitung ist hoch und kostenintensiv
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> → Erschließung einer neuen Biomassequelle, die unabhängig von Ackerflächen erzeugt werden kann → hohe Photosyntheseeffizienz ermöglicht eine zu Landpflanzen vergleichsweise hohe Biomasseproduktion in Mikroalgen → Wertschöpfung durch neue Produkte mit neuen Funktionalitäten und Nutzungsoptionen → Vermarktung von Produkten mit hoher Wertschöpfung → Exportmöglichkeiten von deutschen Technologien und Anlagen für die Kultivierung, Auf- und Weiterverarbeitung von Mikroalgenbiomasse 	<ul style="list-style-type: none"> → Deutschland ist geografisch gegenüber anderen globalen Standorten für die Mikroalgenkultivierung benachteiligt → starke, kompetitive Forschung und Entwicklung außerhalb von Deutschland

ein- und mehrjährige Gräser eine Rolle spielen. Für die Weiterverarbeitung stehen nach Abschluss der Primärraffination als Rohprodukte Cellulose, Hemicellulosen und Lignin oder Mischungen davon zur Verfügung. Grundsätzlich gibt es zwei Wege der Sekundärraffination: (a) die direkte Herstellung von fermentierbaren Kohlenhydraten für weitere biotechnologische Umsetzungen und (b) die weitere iso-

lierte Verarbeitung der einzelnen Fraktionen sowie Kombinationen von beiden Nutzungswegen. Bei der Herstellung von fermentierbaren Kohlenhydraten werden meistens die Cellulose- und Hemicellulose-Fraktion genutzt. Die enzymatische Umsetzung zu den entsprechenden monomeren Kohlenhydraten (bspw. Glucose, Xylose) ergibt einen Stoffstrom von fermentierbaren Zuckern und einen Stoffstrom für

Tabelle: SWOT-Analyse der Lignocellulose-Bioraffinerie

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> → innovative Chemie- und Biotechnologieunternehmen sind etabliert; es kann auf bereits bestehende Strukturen der Fermentationsindustrie aufgebaut werden → gut entwickelte deutsche Zellstoffindustrie → starker deutscher Maschinen- und Anlagenbau in relevanten Bereichen, der bereits global orientiert ist → starke Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der chemischen und biotechnologischen Konversion von Kohlenhydraten und deren Weiterveredlung in Deutschland vorhanden → lignocellulosische Rohstoffe in Deutschland, Europa und global prinzipiell verfügbar; nicht genutztes Potenzial land- und forstwirtschaftlicher lignocellulosischer Reststoffe vorhanden → keine unmittelbare Rohstoffkonkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion bei Nutzung von lignocellulosischen Rohstoffen aus Agrarreststoffen und Waldholz → Erfahrungen zu Aufschlussverfahren von Lignocellulose zur chemischen und biotechnologischen Konversion von Kohlenhydraten sind vorhanden → erste Pilot- und Demonstrationsanlagen von Lignocellulose-Bioraffinerien sind in Deutschland in Betrieb oder im Aufbau 	<ul style="list-style-type: none"> → Konkurrenzsituation bei der Nutzung von einheimischem Waldholz unter Berücksichtigung der multifunktionalen Ansprüche an den Wald können das Rohstoffangebot einschränken → Synthesegas- und Lignocellulose-Bioraffinerie greifen auf die gleiche Rohstoffbasis zu → Ligninverwertung ist im Hinblick auf Produkte mit hoher Wertschöpfung noch unterentwickelt → Verwertung der Pentosen aus den Hemicellulosen bislang technologisch nicht ausgereift → Aktivitäten zu Bioraffineriekonzepten für die deutsche Zellstoffindustrie unterdurchschnittlich entwickelt → Integration der einzelnen Elemente der Lignocellulose-Bioraffinerie und deren Validierung im Zusammenwirken noch unausgereift → Demonstration der Technologien im Einsatz in einem Industriemaßstab steht noch aus → Verknüpfung mit der Wertschöpfungskette der chemischen Industrie unterentwickelt
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> → Entwicklung neuer Wachstumsmärkte über ein <i>Top-down</i>-Entwicklungsszenario (Konzept fermentierbare Kohlenhydrate) → Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit und Weiterentwicklung bestehender Standorte der Zellstoffindustrie durch Diversifizierung und neue Produkte über ein <i>Bottom-up</i>-Entwicklungsszenario (Konzept Zellstoff) → Exportmöglichkeiten von deutschen Technologien und Anlagen basierend auf Lignocellulose zur Errichtung von Lignocellulose-Bioraffinerien im Ausland → Erschließung einer neuen Quelle für fermentierbare Kohlenhydrate 	<ul style="list-style-type: none"> → konkurrierende Nutzungsoptionen für lignocellulosische Biomasse → starke, kompetitive Forschung und Entwicklung außerhalb von Deutschland (u. a. USA, Skandinavien)

Lignin. Die fermentierbaren Zucker können direkt in die biotechnologische Produktion gehen. Bei der isolierten Verarbeitung werden die Fraktionen Cellulose, Hemicellulose und Lignin getrennt weiterverarbeitet. Die beim Aufschluss anfallende Cellulose kann z. B. zu Glucose als Fermentations- oder Chemierohstoff weiterverarbeitet werden. Die abgetrennte Hemicellulose-Fraktion enthält mehr oder weniger abgebaute Kohlenhydrate und diverse monomere C6- und C5-Kohlenhydrate. Hieraus können monomere Kohlenhydrate (bspw. Xylose) abgetrennt werden und dann beispielsweise durch Fermentation oder chemische Verfahren weiter veredelt werden. Die abgetrennte Hemicellulose-Fraktion enthält auch verschiedene andere Wertstoffe (z. B. Essigsäure, Furfural), die gewonnen und im chemisch-technischen Bereich weiterverarbeitet werden können. Lignin aus den Aufschlusswegen (a) oder (b) kann zwar prinzipiell als Einsatzstoff direkt genutzt werden, aber aktuelle Anwendungen sind momentan noch begrenzt und meistens von geringer Wertschöpfung.

Eine Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis Stroh wird ab 2012 im Demonstrationsmaßstab erprobt (4.500 t Stroh/1.000 t Ethanol). Als mögliche industrielle Kapazität wird mit 280.000 t/a Stroh gerechnet. Bei angenommenen Bereitstellungskosten für Stroh in Höhe von 75 €/t und einem Investitionsbedarf in Höhe von 70 Millionen Euro entsprechen die Produktionskosten ca. 680 €/t (ca. 54 €/ct/l) Ethanol. Damit liegen die Preise für Bioethanol derzeit in der gleichen Größenordnung wie Handelspreise für Ottokraftstoff (Spotmarkt Rotterdam, Mai 2012). Entscheidender Faktor ist hier der Preis des Rohstoffs. Unter bestimmten Voraussetzungen würde sich eine rechnerische Einsparung von 98 % der Treibhausgase gegenüber dem fossilen Referenzsystem ergeben. Dennoch kann nicht von einer generellen ökologischen Vorteilhaftigkeit gesprochen werden, da eine ökologische Bewertung auf Grund fehlender Daten derzeit erst unvollständig erfolgen kann.

Derzeit wird die Pilotanlage für eine Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis Holz am Standort Leuna errichtet. Die Größenordnung einer möglichen industriellen Realisierung wird bei einer Verarbeitung von ca. 300.000 bis 500.000 Tonnen Holz (atro) pro Jahr gesehen. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Neben der Einbindung in einen bestehenden Industriekomplex und der Bereitstellung des Rohstoffs steht die Validierung der Annahmen und die Realisierung der bislang im Labor- und Technikumsmaßstab erzielten Ausbeuten auch im industriellen Maßstab sowie die hochwertige stoffliche Nutzung der drei Produkt-

fraktionen, Glucose, (Oligo)pentosen, insb. Xylose, und vor allem des Lignins im Vordergrund. Weitere besonders relevante Kostenpositionen sind die Bereitstellung von Energie und Lösungsmittel sowie Enzyme. Werden die technischen Bedingungen erfüllt und wird eine hochwertige stoffliche Verwertung des Lignins erreicht, was heute noch nicht der Fall ist, erscheint die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens möglich.

Eine ökologische Bewertung der Kette vom Rohstoff bis zum Fabrikausgangstor wurde für die Produkte Glucose und Xylose (fermentierbare Zucker) sowie Lignin durchgeführt. Der Vergleich zu Referenzprozessen (Herstellung von Zuckerrohsaft aus Zuckerrüben und Phenol aus Cumol über den Hock-Prozess) zeigte in allen drei betrachteten Wirkungskategorien deutliche Vorteile des Verfahrens (insgesamt ca. 40 % weniger CO₂-Äquivalente, ca. 55 % weniger SO₂-Äquivalente, ca. 65 % weniger PO₄-Äquivalente). Für allgemeine Aussagen zur ökologischen Vorteilhaftigkeit sind jedoch auch hier weitere Untersuchungen notwendig.

b) Grüne Bioraffinerie

In einer grünen Bioraffinerie werden feuchte Biomassen in grüner oder silierter Form, wie z. B. ein- oder mehrjährige Gräser, als Rohstoff verwendet. Nach der Primärraffination stehen als Rohprodukte Presssaft und cellulosische Faser zur Verfügung. Eine Grüne Bioraffinerie wird üblicherweise mit einer Biogasanlage gekoppelt, weil immer ein Teil der einen oder beider Fraktionen (Grassaft bzw. Grasfaser) dort aus verfahrenstechnischen Gründen als Kosubstrat verwertet wird. Der Grassaft geht entweder direkt in die Biogasanlage oder seine Inhaltsstoffe (bspw. Milchsäure, Essigsäure, Proteine, Aminosäuren) werden abgetrennt. Die Grasfaser kann direkt zu Futtermitteln verarbeitet werden oder als Rohmaterial für z. B. Dämmstoffe, Cellulosefasern oder faserverstärkte Kunststoffe dienen.

Die vorliegenden Berechnungen zur Ökonomie und Ökologie gehen von einer Anlage mit einer Kapazität von 91.000 t/a (20 % Trockensubstanzgehalt) Grünschnitt und Silage auf der Grundlage von experimentellen Ergebnissen aus. Eine solche Bioraffinerie würde zur Rohstoffversorgung ca. 2.300 Hektar Grünland benötigen. Bei einer Realisierung dieser Anlage ist mit Investitionen von ca. 15 Millionen Euro zu rechnen. Für die Bewertung spielt insbesondere das breite mögliche Produktspektrum aus weißen Proteinen, Futtermitteln, Lysinlactat und Fermentationsmedien eine große Rolle. Für solche Produkte sind hochpreisige Ab-

Tabelle: SWOT-Analyse der Grünen Bioraffinerie

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> → weltweit führende Forschung im Bereich Biogas-erzeugung → starker deutscher Maschinen- und Anlagenbau in relevanten Bereichen, der bereits global orientiert ist → Erhalt von Kulturlandschaft 	<ul style="list-style-type: none"> → nur in Regionen realisierbar, die über entsprechen des Grünlandpotenzial verfügen → als Konzept nur mit einer Biogasanlage wirtschaftlich umsetzbar → Qualitätsniveau der Produkte oft nicht ausreichend oder nur aufwendig erreichbar, Wertschöpfung aus den Produkten bisher nicht ausreichend → Konzepte auf Basis frischer grüner Biomasse sind – in gemäßigten Breiten – nur saisonal zu betreiben
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> → Weiterentwicklung bestehender Standorte von Biogasanlagen durch Diversifizierung über ein <i>Bottom-up</i>-Entwicklungsszenario → Möglichkeiten zum Technologieexport 	<ul style="list-style-type: none"> → alternative biogene Zugangsmöglichkeiten zu den Produkten (bspw. Fasern, Milchsäure, Proteine) bestehen → Exportmöglichkeiten auf Länder mit entsprechendem Grünlandpotenzial beschränkt

satzmöglichkeiten denkbar, es gibt aber sowohl im Hinblick auf Marktgrößen als auch die erzielbaren Erlöse hohe Unsicherheiten. Für weitergehende Aussagen und einen Vergleich mit existierenden Referenzsystemen sowohl hinsichtlich der Kosten als auch hinsichtlich der Umweltwirkungen wären weitergehende Ausarbeitungen des technischen Konzepts, der Definition von Referenzprodukten sowie detailliertere Bewertungsstudien notwendig.

4. Synthesegas-Bioraffinerie

Als Rohstoffe sind für Deutschland vor allem agrarische Reststoffe (Getreidestroh) und Holz (Waldholz, Kurzumtriebsholz) von Bedeutung. Als Besonderheit einer Synthesegas-Bioraffinerie werden die einzelnen Komponenten in der Primärraffination nicht getrennt, sondern sämtliche organische Bestandteile und Komponenten der Biomasse werden abgebaut, so dass als Rohprodukt Synthesegas entsteht. Der Vorteil von Synthesegas liegt in dessen Flexibilität für die Produktherstellung, die entweder zu Kraftstoffen, Methanol, höheren Alkoholen oder Chemikalien und selbst Kunststoffen erfolgen kann. Nach der Aufbereitung und Reinigung des Gases erfolgt der Syntheseschritt, bei dem Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff aus dem Synthesegas durch chemische Prozesse weiterverarbeitet werden, entweder direkt zu chemischen Zwischenprodukten (z. B. Methanol oder Dimethylether (DME)) oder zu Kraftstoffen (bspw. sog. Biomass-to-Liquid-Kraftstoffe), zu biobasiertem Wasserstoff oder zu chemischen

Produkten. Es ist auch eine direkte energetische Nutzung über einen stationären Motor (zur Erzeugung von Strom und Wärme) oder als Motorenkraftstoff im mobilen Einsatz möglich.

Synthesegas-Bioraffinerien zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL)-Kraftstoffen und Chemikalien sind derzeit noch nicht im kommerziellen Maßstab am Markt vertreten. Da die Herstellung von BtL-Kraftstoffen und Chemikalien komplexe und kostenintensive Technologien erfordert, wird die Produktion in großen Anlagen erfolgen müssen, um Größendegressionseffekte zu nutzen und insgesamt wirtschaftlich darstellbar zu sein. Die Kapazität der Anlagen wird in erster Linie durch die Transportwürdigkeit der eingesetzten Biomassearten begrenzt sein. Diskutiert wird – je nach Variante – über Größenordnungen von 500.000 bis 2.000.000 Tonnen Biomasseinsatz pro Jahr. Die Investitionen für Anlagen in dieser Größenordnung bewegen sich zwischen 250 und 1.000 Millionen Euro. Um Vorteile kleinerer Anlagen bzgl. geringerer Transportkosten mit Vorteilen größerer Anlagen hinsichtlich der Größendegression zu kombinieren, wird eine Entkopplung und Dezentralisierung mehrerer kleinerer Anlagen für die Biomassevorbereitung diskutiert.

Auch hier ist darauf hinzuweisen, dass tiefer gehende ökonomische und ökologische Einordnungen (s. Langfassung) erste Abschätzungen und damit mit entsprechenden Datenunsicherheiten behaftet sind.

Tabelle: SWOT-Analyse der Synthesegas-Plattform

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> → starke Forschung und Entwicklung in Deutschland zur Biomassevergasung → Erfahrungen zur Kohlevergasung und deren Scale-up sind vorhanden und können einbezogen werden → starker deutscher Maschinen- und Anlagenbau in relevanten Bereichen, der bereits global orientiert ist → Rohstoffe zur Vergasung in Deutschland, Europa und global prinzipiell verfügbar → lignocellulosische Rohstoffe in Deutschland, Europa und global prinzipiell verfügbar; nicht genutztes Potenzial land- und forstwirtschaftlicher lignocelluloseischer Reststoffe vorhanden → keine unmittelbare Rohstoffkonkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion bei Nutzung von lignocelluloseischen Rohstoffen aus Agrarreststoffen und Waldholz → Erfahrungen zur chemischen Konversion von Synthesegas sind vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> → hoher Rohstoffbedarf in Folge des Erfordernisses großer Anlagen → Konkurrenzsituation bei der Nutzung von heimischem Waldholz unter Berücksichtigung der multifunktionalen Ansprüche an den Wald können das Rohstoffangebot einschränken → Synthesegas- und Lignocellulose-Bioraffinerie greifen auf die gleiche Rohstoffbasis zu → Bau der Anlagen sehr kapitalintensiv → Integration der einzelnen Elemente der Synthesegas-Bioraffinerie und deren Validierung im Zusammenwirken noch nicht ausgreift → Demonstration der Technologien im Industriemaßstab steht noch aus → Potenzielle Produktvielfalt bislang noch nicht ausgeschöpft → biotechnologische Konversion von Synthesegas ist bisher unterentwickelt
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> → Konzept erlaubt inhärent die nahezu vollständige Nutzung der Biomasse → mögliche Produktvielfalt auf Basis von Synthesegas ist hoch → Entwicklung neuer Industrien über ein <i>Top-down</i>-Entwicklungsszenario → Exportmöglichkeiten von deutschen Technologien und Anlagen zur Errichtung von Synthesegas-Bioraffinerien im Ausland → einfacher und globaler Zugang zur Wertschöpfungskette der chemischen Industrie möglich → Synthesegas als alternative Kohlenstoffquelle für Fermentationen 	<ul style="list-style-type: none"> → konkurrierende Nutzungsoptionen für lignocelluloseische Biomasse → starke, kompetitive Forschung und Entwicklung außerhalb von Deutschland (u. a. USA, Österreich)

Fazit, weiteres Vorgehen und Ausblick

Die „Roadmap Bioraffinerien“ zeigt belastbar auf, dass Bioraffinerien große Chancen für Klimaschutz, Wertschöpfung und Ressourceneffizienz versprechen. Dies ist in erster Linie der Möglichkeit der vollständigen Ausnutzung der Biomasse geschuldet. Das bedeutet jedoch nicht, dass klassische Biomasse-nutzungen verdrängt werden sollen. Im Gegenteil: Allein schon wegen verschiedener Vorteile einer dezentralen Ausrichtung werden z. B. Biogasanlagen weiterhin ihre hohe Bedeutung behalten.

Die Bewertung der einzelnen Bioraffineriekonzepte hat jedoch auch deutlich gezeigt, dass vor einer kommerziellen Praxiseinführung noch erheblicher Forschungsbedarf abzudecken ist. Besonders hervorzuheben sind dabei die Integration verschiedener Verfahren zu kohärenten technischen Konzepten, die Hochskalierung vom Versuchs- zum Industriemaßstab, die Rohstoffversorgung, die Optimierung der Verfahren und Produkte der Primär- und Sekundärraffination sowie die Konzeption praxistauglicher Nachhaltigkeitssysteme. Im Rahmen der Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 hat die Bundesregierung ab 2010 eine Gesamt-

fördersumme von 2,4 Milliarden Euro (Projektförderung und institutionelle Förderung) für sechs Jahre vorgesehen. Die Förderaktivitäten umfassen u. a. die Nutzung von Biomasse für stofflich-industrielle und energetische Zwecke. Die Förderung von Bioraffineriekonzepten ist hier eingeschlossen. Die im Rahmen des BMELV-Förderprogramms „Nachwachsende Rohstoffe“ geförderten Projekte zur Konversion und stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse können zur Hälfte als Vorhaben zur Unterstützung bzw. zur Technologieentwicklung für Bioraffinerien angesehen werden. Hinzu kommen noch Aktivitäten, die aus verschiedenen anderen Förderprogrammen, insbesondere des BMBF, aber auch des BMU und BMWi, gefördert werden. Mit dem Ende 2010 verabschiedeten Gesetz zur Errichtung eines Sondervermögens „Energie- und Klimafonds“ stellt die Bundesregierung weitere Mittel u. a. für Forschung und Entwicklung zur Verfügung.

Wie oben aufgeführt, wird dem Thema Bioraffinerie in den europäischen Programmen eine wachsende Bedeutung beigemessen. Es ist anzustreben, hier wie auch in anderen Programmen EU-Mittel für Vorhaben zur Weiterentwicklung von Bioraffinerien in Deutschland zu sichern.

Der ökonomischen und ökologischen Einordnung von Bioraffineriekonzepten kommt eine Schlüsselrolle zu, sowohl hinsichtlich der Vergleichbarkeit einzelner Plattformen untereinander als auch hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit anderen Biomasse-Nutzungspfaden. Die Roadmap zeigt deutlich auf, dass hier noch erhebliche Wissens- und Datenlücken bestehen. Eine solche Einordnung ist jedoch als Entscheidungshilfe für zukünftige Forschung und Forschungsförderungen u. a. über Pilot- und Demonstrationsanlagen dringend erforderlich, um knappe private und öffentliche Forschungsbudgets zielführend fokussieren zu können: Während die Konzentration auf ökologisch vorteilhafte Konzepte ein Gebot des Umwelt- und Klimaschutzes ist, sind die ökonomischen Chancen ausschlaggebend dafür, ob ein Konzept zur kommerziellen Anlage und Praxiseinführung weiter entwickelt wird. Daher ist es in näherer Zukunft erforderlich, auch Vorhaben durchzuführen, die die vertiefende ökonomische und ökologische Bewertung von Bioraffineriekonzepten sowohl untereinander als auch im Vergleich zu anderen Biomasse-Nutzungspfaden zum Gegenstand haben.

Insgesamt sollte die Bundesregierung auch zukünftig Forschung und Entwicklung zum Thema Bioraffinerien über die gesamte Entwicklungskette hinweg

deutlich erkennbar und im notwendigen Umfang fördern und so entsprechende Anstrengungen der Wirtschaft unterstützen und begleiten. Der Weg bis zu einer Realisierung im Industriemaßstab ist jedoch noch lang und erfordert einen langfristigen Zeithorizont. Das Zeitfenster vom konkreten Konzept über die Pilotanlage bis zur Großproduktion beträgt über zehn Jahre. Dazu sind erhebliche Anstrengungen der Industrie einschließlich des notwendigen Einsatzes von Risikokapital erforderlich.

Bei der Betrachtung einzelner Plattformkonzepte hat sich herauskristallisiert, dass in jedem Fall die langfristige Sicherung der benötigten Biomasse (ob importiert oder einheimisch erzeugt) zu auskömmlichen Preisen ein entscheidender Faktor für die Tragfähigkeit der Konzepte ist. Eine zentrale Herausforderung ist die Steigerung der effizienten und nachhaltigen Erzeugung und Bereitstellung von biogenen Rohstoffen. Auch hier sollte die Bundesregierung entsprechende Forschung und Entwicklung weiterhin fördern. Dabei sind auch neue Landnutzungsformen wie etwa Kurzumtriebsplantagen von Interesse. Analog zur Steigerung der Rohstoffherzeugung müssen zudem weitere Rohstoffquellen erschlossen werden. Neben der Verwertung von Reststoffen und z. B. Einfuhrerleichterungen können (analog zum fossilen und mineralischen Bereich) insbesondere auch Rohstoffpartnerschaften mit wichtigen Biomasse-Erzeugerländern zukünftig eine stärkere Rolle spielen. Zudem müssen auch die stofflich genutzten biogenen Rohstoffe Nachhaltigkeitsanforderungen genügen. Dieses Ziel wurde auch im Koalitionsvertrag formuliert und vom BMELV mit der Vorstellung der Charta für Landwirtschaft bekräftigt. Die Bundesregierung fördert daher verschiedene Projekte, an deren Ende eine freiwillige Bereitschaft der Industriebeteiligten zum ausschließlichen Einsatz nachhaltig erzeugter Rohstoffe auch für die stoffliche Nutzung stehen soll.

Zudem hat sich gezeigt, dass es noch erheblicher technologischer Weiterentwicklung und Innovationen bedarf, um die hier vorgestellten Bioraffinerie-Konzepte im Industriemaßstab und wirtschaftlich zu betreiben. Sowohl Art als auch Umfang der benötigten Entwicklungen unterscheiden sich zwar im Detail zwischen den Konzepten, generell zeigt sich aber übergreifend ein Bedarf bei der Integration verschiedener Prozessschritte und Teilkonzepte in kohärente Gesamtkonzepte sowie bei der Produktentwicklung und Produktveredelung. Beides sind Schlüsselbereiche, um Bioraffinerien ökonomisch tragfähig zu machen und etablieren zu können. Eine Herausforderung für die Umsetzung aller Konzepte

stellt zudem das Hochskalieren aus dem bisherigen Entwicklungsstadium in den industriellen Maßstab dar. Zur Beantwortung vieler mit diesen Themen verbundener Fragestellungen werden neben einer Vielzahl von Forschungsvorhaben zu Einzelaspekten von Bioraffinerien auch Versuchsanlagen notwendig sein. Erste solche Anlagen befinden sich bereits, auch mit Unterstützung der Bundesregierung, im Aufbau. Zu nennen wären hier zum Beispiel die Anlage der Süd-Chemie in Straubing, das Chemisch-Biologische Prozesszentrum der Fraunhofer-Gesellschaft in Leuna und die Versuchsanlage zum Bioliq-Verfahren am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Die Roadmap zeigt insgesamt, dass Bioraffinerien einen aussichtsreichen Ansatz für eine effiziente Nutzung nachwachsender Rohstoffe darstellen. Bioraffinerien werden nicht nur eine stärkere Substitution fossiler Kohlenstoffquellen für die Herstellung einer Reihe bekannter Chemikalien und Energieträger, sondern auch neue Produkte als Teil neuer Wertschöpfungsketten ermöglichen. Zugleich ist das Interesse der Industrie an diesen Technologien hoch. Allerdings zeigt sich auch, dass viele Fragen mit dem heutigen Erkenntnisstand noch nicht zu beantworten

sind. Hier ist noch erhebliche Forschungsarbeit zu leisten. Die Roadmap sollte im Zeitraum bis 2020 aktualisiert werden. Dabei sollten dann technische Entwicklungen und der bis dahin erreichte Kenntnisstand evaluiert werden, um ggf. weitere Maßnahmen zu identifizieren, die geeignet sind, eine Praxis-einführung der aussichtsreichsten Plattformen zu beschleunigen.



1 Motivation

Die großen Herausforderungen der Zukunft sind eng verknüpft mit einer weiter wachsenden Weltbevölkerung und deren Recht, ihre grundlegenden Bedürfnisse wie beispielsweise nach Ernährung, Wohnen, Energie und Mobilität zu befriedigen. Die sich daraus ergebenden Anforderungen werden weiter dadurch verstärkt, dass immer mehr Menschen diese Bedürfnisse entsprechend dem Standard der heutigen Industriestaaten befriedigen wollen. Hinzu kommt die Erkenntnis, dass die fossilen Ressourcen der Erde endlich sind und ihr Verbrauch aus Gründen des Klima- und Ressourcenschutzes insgesamt reduziert werden muss. Die dadurch wachsende Rolle erneuerbarer Kohlenstoffquellen für die Energie- und Stoffproduktion wird noch verstärkt durch die im Ergebnis der Reaktorkatastrophe in Fukushima erfolgte Abkehr von der Kernenergie, zumindest in Deutschland.

Als Ergebnis nimmt die Bedeutung der Biomasse-nutzung für die Ernährung und auch für die Energie- und Rohstoffversorgung zu. Während im Bereich der Energie für die Bereitstellung von Strom und Wärme auch andere erneuerbare Energieträger zur Verfügung stehen, stellt die Biomasse im Bereich der industriellen Erzeugung von Stoffen und Produkten einschließlich Kraftstoffen, sowohl in der chemischen Industrie als auch in anderen Branchen, neben CO₂ die einzige nicht-fossile Kohlenstoff-Quelle dar.

Biomasse ist erneuerbar, aber aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit entsprechender Anbauflächen dennoch limitiert. Dieser Aspekt und darüber hinaus die Konkurrenz mit anderen Flächennutzungen, wie der Nahrungsmittel-, Futtermittel- und Industrieproduktion, der Energiebereitstellung, dem Naturschutz und andere Flächennutzungen erfordern neben nachhaltigen Ertragssteigerungen eine hoch-

effiziente Nutzung der knappen Ressource Biomasse. Diese Ressourceneffizienz ist der Schlüssel für die Realisierung der beschriebenen Chancen, wobei jedoch immer gleichzeitig die Prinzipien nachhaltigen Wirtschaftens berücksichtigt werden müssen. Die mit einer verstärkten Nutzung von Biomasse erzielbare Wertschöpfung in Verbindung mit der Schaffung und Sicherung von Arbeitsplätzen gilt es mit möglichst geringer Umweltbelastung zu maximieren. Damit eröffnen sich Chancen für die nachhaltige Weiterentwicklung auch ländlicher Räume sowohl in Deutschland als auch global.

Bioraffinerien versprechen diese hohe Ressourceneffizienz bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Ökonomie und Ökologie, indem sie einen integrativen Ansatz verschiedener Prozesse verfolgen, der eine weitestgehend abfallfreie und nachhaltige Verwertung von erneuerbaren Ressourcen gewährleistet. Wichtige Rollen werden der Land- und Forstwirtschaft bei der Biomasseproduktion sowie der chemischen Industrie mit Blick auf neue Produkte, aber auch auf die Entwicklung neuer Konversionsprozesse ebenso wie dem Apparate- und Anlagenbau mit Blick auf die Exportfähigkeit von Technologien in rohstoffreiche Länder zukommen.

Die vorliegende Roadmap soll dazu dienen, neben der systematischen Erfassung des Status Quo die Stärken und Schwächen sowie die Chancen und Risiken der verschiedenen zukünftigen Bioraffinerie-Konzepte zu analysieren, Fragen der ökonomischen und ökologischen Bewertbarkeit nachzugehen und konkrete Handlungsempfehlungen für notwendige FuE-Anstrengungen zu geben, um bis 2030 möglichst effiziente, bedarfsgerechte und ökologisch vorteilhafte Bioraffinerien zu entwickeln und betreiben zu können.



2 Bioraffinerien im Kontext der Biomassenutzung

2.1 Bioraffinerien im politischen Kontext

Die mit einer verstärkten Biomassenutzung bei gleichzeitig limitierter Verfügbarkeit von Biomasse einhergehenden Herausforderungen können nur gemeinsam mit allen gesellschaftlichen Akteuren aus der Wirtschaft, der Wissenschaft, der Politik und den Verbrauchern gemeistert werden.

Die Bundesregierung hat ein klares Bekenntnis zum Ausbau der erneuerbaren Energien einschließlich der Bioenergie und auch der industriellen Nutzung nachwachsender Rohstoffe abgegeben. Die Ziele ergeben sich im Wesentlichen aus dem Maßnahmenpaket der EU zum Themenkomplex Klimawandel und Energie, der Leitmarktinitiative für biobasierte Produkte der EU, der europäischen Strategie für eine Bioökonomie für Europa, der nationalen Forschungsstrategie zum Aufbau einer wissenschaftsbasierten Bioökonomie der Bundesregierung, dem Energiekonzept der Bundesregierung, der Klimaschutzinitiative der Bundesregierung sowie den Aktionsplänen zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe der Bundesregierung.

Die bestehende Technologieführerschaft Deutschlands bei der Nutzung von Biomasse für die Produktion von Chemikalien, Werkstoffen und Energie inkl. Biokraftstoffen gilt es weiterzuentwickeln. Vor dem Hintergrund aktueller internationaler und europäischer Entwicklungen sind hierzu jedoch verstärkte Anstrengungen erforderlich. Mit dem „Nationalen Biomasseaktionsplan für Deutschland – Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung“¹, dem „Aktionsplan der Bundesregierung zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe“², mit der „Hightech-Strategie 2020 für Deutschland – Zukunftsprojekt: Nachwachsende Rohstoffe als Alternative zum Öl und mit der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“³ sowie der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie⁴ und den dort enthaltenen Managementregeln hat die Bundesregierung wichtige Weichen gestellt. Die „Roadmap Bioraffinerien“ ist ein weiteres Element in der Strategie der Bundesregierung zur Nutzung von Biomasse und zur Entwicklung einer Bioökonomie, in der Deutschland eine gewichtige Position einnehmen kann. Diese Strategie steht auf mehreren Säulen. Sie beruht auf einer breit aufgestellten, interdiszi-

plinären Forschungslandschaft, zu der insbesondere auch die biotechnologische Forschung als wichtiger Innovationsmotor gehört. Auf der wirtschaftlichen Seite umfasst die Bioökonomie neben der Land- und Forstwirtschaft auch Sektoren der verarbeitenden und zuliefernden Industrie wie beispielsweise Chemieindustrie, Kunststoffindustrie, Pharma- und Kosmetikindustrie, Automobilindustrie, energie- und kraftstofferzeugende Industrie, Nahrungs- und Futtermittelindustrie, Holzverarbeitende Industrie, Zucker- und Stärkeindustrie, Ölsaaten- und Naturfaserverarbeitende Industrie, Zellstoff- und Papierindustrie, Maschinen- und Anlagenbau sowie Teile des Dienstleistungsbereiches.

Ziel und Inhalt der „Roadmap Bioraffinerien“

Die „Roadmap Bioraffinerien“ ist eine übergreifende, integrierte Roadmap für den Zeitraum bis 2030. Zweck der Roadmap ist es, eine wesentliche Grundlage zur Formulierung einer Strategie zur Entwicklung und Umsetzung von Bioraffinerien zu schaffen. Dabei werden – auch unter Berücksichtigung von bereits angelaufenen Entwicklungen – zukünftige Entwicklungswege aufgezeigt, die sowohl die Marktnachfrage als auch den Technologiedruck einbeziehen, wobei die Nachhaltigkeit als Leitbild fungiert. Die Zielsetzung der „Roadmap Bioraffinerien“ besteht in der Analyse und vorausschauenden Bewertung zukünftiger Entwicklungen im Handlungsfeld Bioraffinerien.

Rohstoffe, Produkte, Technologien und Märkte werden in dieser Roadmap in einen größeren Gesamtzusammenhang gestellt, wozu auch die Relation von Bioraffinerien zu anderen Biomassenutzungspfaden (Kapitel 2.2) gehört. Auf Grundlage einer systematischen Erfassung der verschiedenen Konzepte (Kapitel 3), einer technologischen (Kapitel 4) sowie ökonomischen und ökologischen Analyse (Kapitel 5) wird dann eine SWOT-Analyse erstellt (Kapitel 6) und der kurz-, mittel- und langfristige Handlungsbedarf für Bioraffinerien abgeleitet (Kapitel 7). Die Erarbeitung der „Roadmap Bioraffinerien“ erfolgte unter Einbindung von Vertretern der Wirtschaft, der Forschung und von Verbänden. Damit wird ein breiter gesellschaftlicher Konsens deutlich.

2.2 Bioraffinerien im Kontext anderer Biomassenutzungspfade

Die Bezeichnung Bioraffinerie wird derzeit für viele Konzepte, Prozesse und Ansätze im Zusammenhang mit der Nutzung von Biomasse verwendet. Oft wird unter dem Begriff Bioraffinerie jegliche Verarbeitungsanlage für Biomasse verstanden, die nicht dem Nahrungsmittel- und Futtermittelbereich zuzuordnen ist. Der Begriff Bioraffinerie kann jedoch weder hierfür noch auf einzelne Umwandlungsprozesse von Biomasse angewendet werden.

Eine Bioraffinerie zeichnet sich vielmehr durch ein explizit integratives, multifunktionelles Gesamtkonzept aus, das Biomasse als vielfältige Rohstoffquelle für die nachhaltige, simultane Erzeugung eines Spektrums unterschiedlicher Zwischenprodukte und Produkte (Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie inkl. Biokraftstoffe) unter möglichst vollständiger Verwendung aller Rohstoffkomponenten nutzt; als Koppelprodukte können ggf. zusätzlich auch Nahrungs- und/oder Futtermittel anfallen. Dabei sind Ressourcenverluste durch Schließung von Stoffkreisläufen, Kaskadennutzung und Recycling zu vermeiden. Entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Bioraffinerie sind alle Prozesse zur Verarbeitung und Konversion von Biomasse ressourceneffizient hinsichtlich des Material- und Energieeinsatzes sowie des Verbrauchs von Medien (bspw. Wasser) und Hilfs-

stoffen zu gestalten und negative Umweltwirkungen zu vermeiden. Aus Sicht der Ressourceneffizienz sind zudem langlebige Güter und Produkte von besonderem Wert.

Bioraffineriekonzepte sind durch eine Vielzahl integrativer und multifunktionaler Merkmale gekennzeichnet, die auf Rohstoff-, Prozess-, Produkt- und Industrieebene zu realisieren sind (Tabelle 1).

Bioraffinerien sind ein weiterer Baustein in der Nutzung von Biomasse und bereichern die Vielfalt der Biomassenutzungsoptionen (Abbildung 1) um einen weiteren Nutzungspfad.

Die vorhandenen Ansätze zur Nutzung von Biomasse werden durch zukünftige Bioraffinerien ergänzt und nicht ersetzt. Alle Nutzungspfade von Biomasse, sowohl etablierte als auch neue innovative Ansätze der Konversion von Biomasse, haben ihre Bedeutung und werden zukünftig verstärkt in den Fokus von Forschung und Entwicklung rücken müssen. Bioraffineriekonzepte besitzen das Potenzial, durch Nutzung aller Rohstoffkomponenten insgesamt einen höheren ökonomischen und ökologischen Nutzen als das Vergleichssystem zu haben. Dies gilt sowohl im Vergleich mit einem fossilen Referenzsystem als auch mit anderen Konzepten der Biomassenutzung, die die entkoppelte Nutzung von Biomasse bzw. Biomassekomponenten ohne die simultane Erzeugung von mehreren stofflichen bzw. energetischen Produkten verfolgen.

Tabelle 1: Integrations- und Multifunktionalitätsebenen, die in Bioraffinerien realisiert sind

Ebene	Integrations- und Multifunktionalitätsmerkmale
Rohstoff	<ul style="list-style-type: none"> → Verwertung aller Komponenten der Biomasse → Verarbeitung der verschiedenen Rohstoffkomponenten in parallelen (ggf. verknüpften) Prozessen → möglichst flexibler Rohstoffeinsatz in der Primärraffination
Prozess	<ul style="list-style-type: none"> → Verknüpfung von Primär- und Sekundärraffination → Aufeinanderfolgende Verfahrensschritte entlang der Wertschöpfungskette(n) → verknüpfte Produktstammbäume
Produkt	<ul style="list-style-type: none"> → simultane Produktion von Chemikalien, Werkstoffen und Energie sowie ggf. Nahrungs- und Futtermitteln als Koppelprodukt → gleichzeitige Produktion von verschiedenen Materialien und/oder gleichzeitige Produktion von verschiedenen Energieträgern → Verknüpfung von Konversion und Veredelung
Industrie	<ul style="list-style-type: none"> → Einbindung in bestehende Wertschöpfungsketten → Standortwahl nach Biomasseaufkommen und -verfügbarkeit, ggf. unter <ul style="list-style-type: none"> - Einbindung in bestehende Biomasseverarbeitungsstandorte - Einbindung in bestehende Chemieparcs bzw. Verbundstandorte

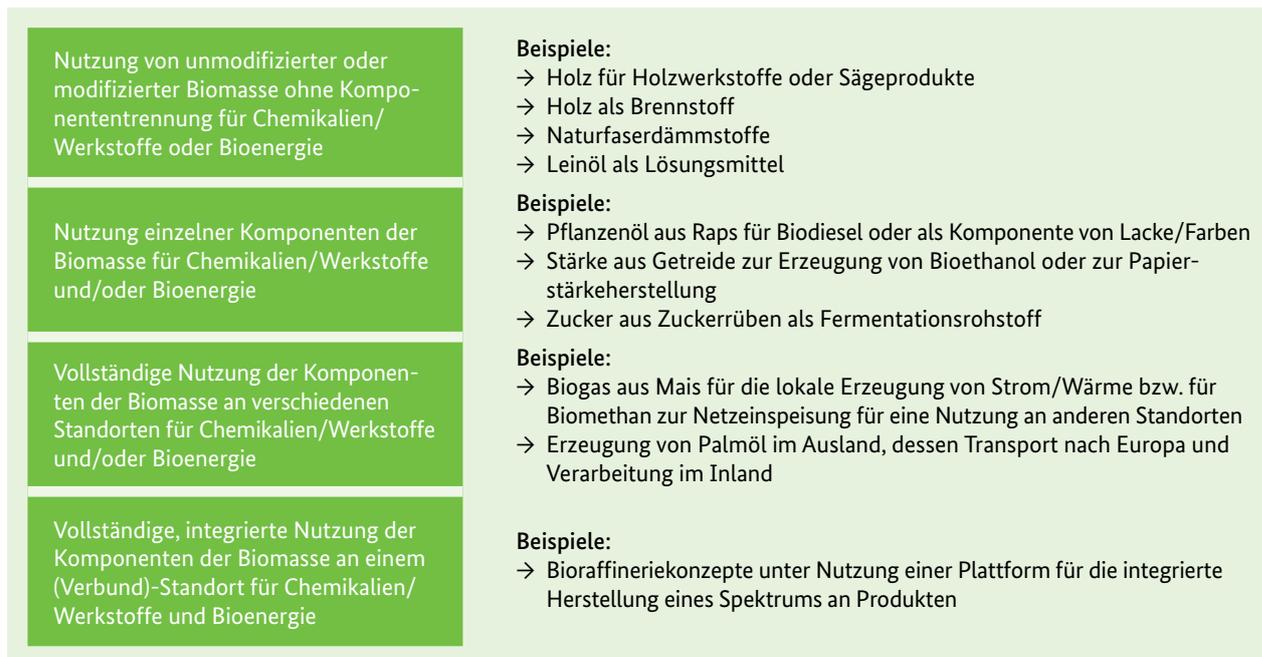


Abbildung 1: Nutzungspfade von Biomasse

Bei steigendem Bedarf von Biomasse für konkurrierende Nutzungen sind bei der Auslegung und dem Design von Bioraffineriekonzepten einerseits das begrenzte inländische Biomassepotenzial und andererseits Konsequenzen von Biomasseimporten bzw. aus der Biomasseproduktion in den Ursprungsländern zu berücksichtigen. Einen weiteren wichtigen Aspekt stellt die Exportfähigkeit einer solchen Hochtechnologie dar, da Bioraffinerien als Gesamtanlagen oder Anlagenkomponenten in Länder mit dem entsprechenden Biomasseaufkommen ausgeführt werden können und somit auch dort einen signifikanten Beitrag zu einer nachhaltigen Produktion von Materialien und Energie inkl. Biokraftstoffen leisten können.

Die integrierte Verarbeitung von Biomasse in einer Bioraffinerie mit der gekoppelten Produktion von Materialien und Energie an einem Standort bietet große Chancen für Synergien. In diesem Zusammenhang sind die Möglichkeit der Kopplung und Vernetzung von Verarbeitungs- und Produktstambäumen, die Energie- und Wärmekopplung, ein gemeinsames Wasser-, Abwasser- und Abfallmanagement, die Fixkostenreduktion und Skalen- und Größenvorteile zu erwähnen. Dem gegenüber stehen jedoch die Herausforderungen, die sich aus dem Anfall der Biomasse in der Fläche und der dezentralen und ggf. saisonalen Rohstoffbereitstellung ergeben. In diesem Zusammenhang sind auch Erfordernisse der Rohstofflogistik und ggf. Rohstoffkonditionierung zu nennen. Ferner ist eine langfristige nachhaltige Rohstoffversorgung in geeigneter Qualität und Quantität sowie zu vertretbaren Kosten nötig. Ein charakteristisches Merkmal einer Bioraffinerie ist die Koppel-

produktion. Diese bedeutet den aus natürlichen oder technischen Gründen zwangsläufig miteinander verbundenen Anfall von mehreren Produkten⁵ in einem einzigen gemeinsamen Produktionsprozess. Hierbei gilt es, Energie und vermarktungsfähige und ökologisch vorteilhafte Produkte aus allen Biomassekomponenten zu konkurrenzfähigen Kosten zu erzeugen. Ein weiteres Merkmal einer Bioraffinerie ist die Verbundproduktion von mehreren einzelnen Produktions- und Veredelungsprozessen. Im Gegensatz zur oftmals sehr selektiven biotechnologischen Umwandlung erfolgt bei chemischen Prozessen oft eine interne Rückführung nichtumgesetzter Ausgangsstoffe. Durch die erläuterten Vernetzungen entsteht eine komplexe vertikale und horizontale Integration sowohl innerhalb des einzelnen Produktionsprozesses als auch der einzelnen Produktionsprozesse im Verbund untereinander. Ein integriertes, vernetztes System verlangt ein effektives Management und hat einen hohen Koordinierungs- und Abstimmungsbedarf. Hierbei sind auch mögliche Probleme, die beim Wegfall oder bei Störung eines Teilsystems des integrierten Gesamtsystems auftreten können, hinsichtlich der Verfahrenssicherheit und Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen.

In dem beschriebenen, komplexen Spannungsfeld müssen sich Bioraffinerien einordnen. Erst unter Berücksichtigung aller genannten Faktoren und Herausforderungen zeigt sich, ob und wann sowie an welchen Standorten eine integrierte, gekoppelte oder eine entkoppelte Produktion von Chemikalien, Werkstoffen und Biokraftstoffen bzw. anderen Bioenergieformen sinnvoll und nachhaltig ist.

3 Definition und Systematik von Bioraffinerien, Stand der Technik und Ausgangslage

3.1 Begriffsbestimmung und Abgrenzung

Die Verfahrenskette der Bioraffinerie besteht im Wesentlichen aus Anlagenkomponenten zur Vorbehandlung und Aufbereitung der Biomasse sowie zur Auftrennung der Biomassekomponenten (Primärraffination) und nachfolgenden Konversions- und Veredelungsschritten (Sekundärraffination). Die Verfahrenskette der Bioraffinerie zeigt das nachfolgende Schema (Abbildung 2):

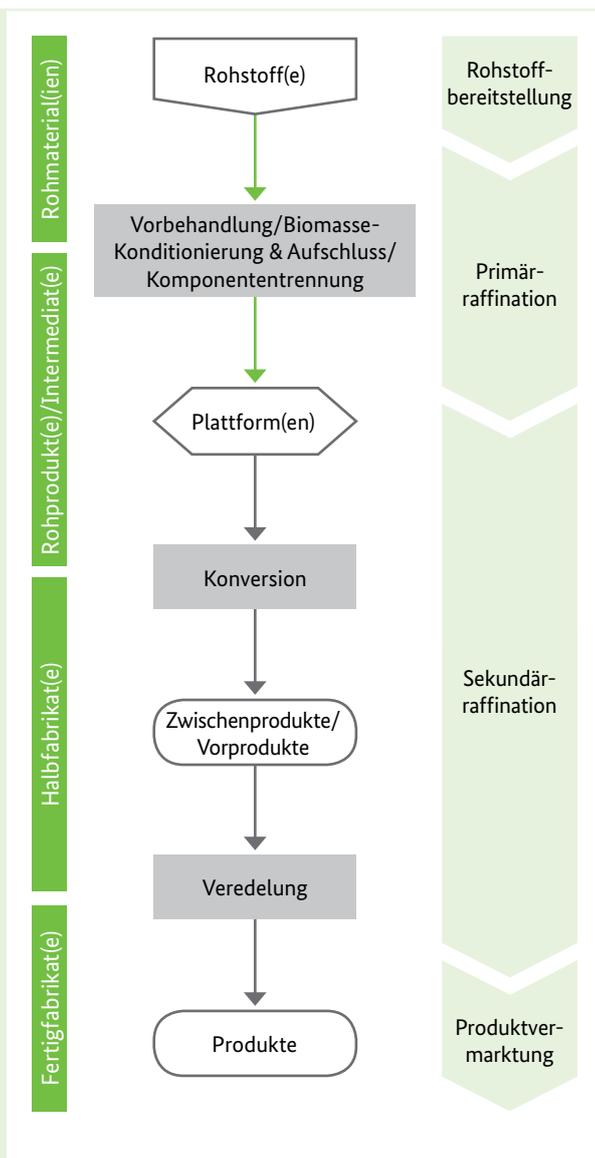


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Verfahrenskette der Bioraffinerie

In der **Primärraffination** erfolgt in einer Bioraffinerie die Auftrennung der Biomassekomponenten zu Intermediaten (bspw. Cellulose, Stärke, Zucker, Pflanzenöl, Lignin, Pflanzenfasern, Biogas, Synthesegas), üblicherweise unter Vorbehandlung und Konditionierung der Biomasse. Während die Komponententrennung zentral am Standort der Bioraffinerie stattfindet, können ein oder mehrere Prozesse der Vorbehandlung/Konditionierung auch dezentral erfolgen.

In der **Sekundärraffination** wird in einer Bioraffinerie aus den Intermediaten über weitere Konversions- und Veredelungsschritte eine größere Zahl an Produkten hergestellt. Die Intermediate werden dabei als Rohprodukt in einem ersten Konversionsschritt ganz oder teilweise zu Vorprodukten bzw. Zwischenprodukten weiterverarbeitet, die dann ebenfalls ganz oder teilweise in einer weiteren Wertschöpfung am Standort der Bioraffinerie zu Produkten veredelt werden. Produkte der Bioraffinerie können sowohl Halb- als auch Fertigfabrikate sein.

Bei der Primärraffination und/oder Sekundärraffination entstehende Koppelprodukte⁶ werden zur Bereitstellung von Prozessenergie oder ggf. bei Eignung und Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben zu Nahrungs- oder Futtermitteln weiterverarbeitet.

Nicht als Bioraffinerien werden Anlagen bezeichnet, die folgende Merkmale haben:

- Anlagen zur Konversion von Biomasse, an deren Standort lokal oder regional entweder **keine Primärraffination** existiert oder überhaupt **keine Sekundärraffination** stattfindet.
Beispiele: Eine einzelne Fermentationsanlage oder eine Papierfabrik ohne ein vorgeschaltetes Zellstoffwerk (keine Primärraffination) bzw. eine einfache Stärkefabrik ohne angeschlossene Veredelungsanlagen oder eine Ölmühle zur Ölsaatenverarbeitung (keine Sekundärraffination).
- Anlagen zur Konversion von Biomasse, bei denen **keine Komponententrennung** stattfindet, sondern die Biomasse unverändert oder nur leicht modifiziert verarbeitet bzw. verwendet wird.
Beispiele: Ein holzverarbeitendes Sägewerk oder eine Anlage zur Herstellung von Naturfaserdämmstoffen.

→ Anlagen zur Konversion von Biomasse, die nach der Primärraffination durch eine direkte Konversion **nur ein einziges Hauptprodukt⁶** erzeugen oder wo das Hauptprodukt quantitativ deutlich überwiegt.

Beispiele: Biodieselherstellung (Hauptprodukt: Biodiesel) oder eine landwirtschaftliche Biogasanlage (Hauptprodukte: Strom & Wärme).

Diese Anlagen sind für sich betrachtet keine Bioraffinerie, können aber Komponenten oder Teilanlagen eines Bioraffineriekonzeptes sein.

Die Merkmale und Charakteristika von Bioraffinerien werden in der VDI-Richtlinie „Gütekriterien für Bioraffinerien“⁷, die derzeit erarbeitet wird, beschrieben und erläutert.

Begriffsbestimmung der Bioraffinerie

Eine Bioraffinerie zeichnet sich durch ein explizit integratives, multifunktionelles Gesamtkonzept aus, das Biomasse als vielfältige Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung eines Spektrums unterschiedlicher Zwischenprodukte und Produkte (Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie inkl. Biokraftstoffe) unter möglichst vollständiger Verwendung aller Rohstoffkomponenten nutzt; als Koppelprodukte können ggf. zusätzlich auch Nahrungs- und/oder Futtermittel anfallen. Hierfür erfolgt die Integration unterschiedlicher Verfahren und Technologien.

Die Verfahrenskette der Bioraffinerie besteht im Wesentlichen aus der Vorbehandlung und Aufbereitung der Biomasse sowie der Auftrennung der Biomassekomponenten (Primärraffination) und nachfolgenden Konversions- und Veredelungsschritten (Sekundärraffination).

3.2 Nachhaltige Biomasse für Bioraffinerien

Biomasse ist auch für Bioraffinerien nachhaltig bereitzustellen und zu nutzen.^{2,3,8} Dies betrifft die Erzeugung unabhängig von der geografischen Herkunft, den Handel, die Verarbeitung und die Verwendung. Dabei kommt der Treibhausgas-Minderung und der Einsparung fossiler Rohstoffe besondere Bedeutung zu; gleichzeitig muss die erforderliche Wirtschaftlichkeit durch Produkte mit hoher Wertschöpfungsintensität gegeben sein. Hinzu kommen weitere Bewertungsaspekte, auf die in Kapitel 5 ausführlich eingegangen wird.

Inwieweit Biomasse fossile Rohstoffe ersetzen kann, hängt u. a. stark von ihrer Verfügbarkeit und konkurrierenden Nutzungen ab. Für den Ausbau der Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Bioraffinerien in Deutschland müssen qualitativ und quantitativ ausreichende und nachhaltig produzierte Rohstoffmengen wettbewerbsfähig bereitgestellt werden. Eine sichere Nahrungsmittelerzeugung genießt dabei eindeutig Vorrang.

Die Nutzung pflanzlicher und tierischer Biomasse für industrielle Zwecke steht teilweise im Wettbewerb mit der Energiebereitstellung. Ferner gibt es mitunter eine Konkurrenz mit der Verwendung von Biomasse als Nahrungs- und Futtermittel und mit dem Umwelt- und Naturschutz. In vielen Fällen bestehen allerdings auch Synergien zwischen den verschiedenen Biomassenutzungspfaden, z. B. wenn als Koppelprodukte Futtermittel anfallen (z. B. bei pflanzlichen Ölen) oder wenn ein Reststoff der Nahrungs- und Futtermittelerzeugung stofflich genutzt wird (z. B. Stroh). Insbesondere Bioraffinerien und die verstärkte Kaskadennutzung können dazu beitragen, die mögliche Konkurrenz insbesondere zwischen stofflicher und energetischer Verwertung zu entschärfen. Für die Nutzung der Biomasse sind darüber hinaus alle Ansätze, die zur ökologisch verträglichen Verbreiterung der Rohstoffbasis beitragen, auszuschöpfen. Große Potenziale liegen dabei in einer effizienteren Nutzung bestehender Flächen. Neben den beiden Hauptquellen für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Anbaubiomasse von landwirtschaftlichen Flächen und Waldholz, sind verstärkt land- und forstwirtschaftliche Reststoffe und biogene Abfallstoffe unter Wahrung der Nährstoffnachhaltigkeit zu mobilisieren. Zukünftig können auch Aquakulturen, wie z. B. Algen, als Rohstofflieferanten dienen.

Ein besonderer Fokus liegt auf der Bereitstellung nachhaltig produzierter Rohstoffe aus heimischer Erzeugung. In Deutschland besteht noch Potenzial für eine weitere Ausweitung der nachhaltigen Erzeugung nachwachsender Rohstoffe. Dahinter stehen im Pflanzenbau insbesondere die Erwartung weiterer Ertragssteigerungen und eine stagnierende heimische Nahrungsmittelnachfrage; weltweit wird dagegen eine Zunahme der Nachfrage nach Nahrungsmitteln erwartet. Letztlich werden jedoch die Landwirte mit ihren Anbauentscheidungen, die insbesondere von den Wettbewerbsverhältnissen der einzelnen Kulturarten bestimmt sind, über den tatsächlichen Anbauumfang entscheiden. Potenziale für die Nutzung zusätzlicher Biomasse scheinen auch im Bereich der Forstwirtschaft gegeben zu



sein, wobei sich jedoch nach Holzart und Sortiment sowie Region und Standort (bspw. Bodentyp) ein differenziertes Bild ergibt. Für die Erschließung und Mobilisierung noch ungenutzter Vorräte sind aber geeignete Maßnahmen im Rahmen nachhaltiger und ordnungsgemäßer Waldbewirtschaftung notwendig.

Heimische Biomasse weist – abhängig vom Biomassensortiment – gegenüber importierten Rohstoffen teilweise Kostennachteile auf. Im Zuge der fortschreitenden Liberalisierung der Agrarmärkte und vor dem Hintergrund zunehmend globalisierter Märkte haben sich jedoch die Rohstoffpreise auf dem Binnenmarkt und auf dem Weltmarkt immer weiter angenähert, so vor allem bei Getreide, aber auch bei Zucker. Ob der Bedarf der Industrie an diesen Rohstoffen künftig vermehrt durch Importe gedeckt wird, ist von mehreren Faktoren abhängig, von denen die Produktionskosten, das Wechselkursverhältnis, die Transport-/Frachtkosten, die Transportwürdigkeit/-fähigkeit, die erforderliche Rohstoffqualität/-quantität und die Versorgungssicherheit die wichtigsten sind. Bei einigen Rohstoffen sind nicht alle Qualitäten aus einheimischen Quellen verfügbar (bspw. Pflanzenöle mit kurzkettigen Fettsäuren), so dass in diesen Fällen auf Importe zurückgegriffen werden muss.

Für die heimische landwirtschaftliche Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen gelten die gleichen Regeln der guten fachlichen Praxis und gesetzlichen Regelungen wie für den Anbau von Nahrungs- und Futterpflanzen. Bei der Erzeugung von Holz bestehen in Deutschland im Bundeswaldgesetz und in den Landeswaldgesetzen gesetzliche Regelungen, die eine nachhaltige Waldbewirtschaftung gewährleisten. Zusätzlich kommen weltweit für den Wald internationale Nachhaltigkeitsstandards nach den Zerti-

fizierungssystemen FSC und PEFC zur Anwendung. Bei Einhaltung dieser Regeln kann unabhängig von der Verwertung davon ausgegangen werden, dass die Anforderungen des Umweltschutzes berücksichtigt sind. Für die Erzeugung von Rohstoffen in Drittländern ist dies teilweise nicht gesichert. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass z. B. beim Anbau von tropischen Pflanzen sowohl nachteilige Umweltwirkungen insbesondere im Hinblick auf CO₂-Ausstoß, Biodiversität sowie Boden und Wasser als auch negative Auswirkungen auf die lokale Bevölkerung und die Ernährungssicherheit eintreten.

Ökobilanzen sind von zentraler Bedeutung für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten bzw. Zwischenprodukten und Energie aus Biomasse. Viele vorhandene Ökobilanzen weisen unterschiedliche Bezugsgrößen auf, nutzen verschiedene methodische Ansätze oder sind nach unterschiedlichen Prinzipien aufgebaut; dies betrifft insbesondere die Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen, die dem Anbau der Produkte vorausgegangen sind. Die Ausdehnung der land- und forstwirtschaftlichen Erzeugung einschließlich des verstärkten Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen kann ggf. zu unerwünschten direkten und indirekten Landnutzungsänderungen führen, z. B. durch die Abholzung tropischer Regenwälder zur Gewinnung zusätzlicher Anbauflächen. Dies kann zu einer starken Erhöhung der CO₂-Emissionen, einem Rückgang der biologischen Vielfalt und zur Zerstörung von Ökosystemen beitragen. Zur Vermeidung solcher negativen Folgewirkungen sind entsprechende Vorkehrungen zu treffen.

Die Bewertung von Produkten aus Biomasse wird durch regional unterschiedlich zu gewichtende Umweltauswirkungen des Biomassenanbaus erschwert. Derzeit mangelt es an regional-spezifischen Daten, die für die Bewertung des Biomassenanbaus in einer bestimmten Region/in einem bestimmten Land verwendet werden können. Weitere methodische Herausforderungen für die Bewertung sind die Berücksichtigung der zeitlichen Komponente sowie des Ressourcenbedarfs, z. B. Wasser und Phosphor.

Für viele biobasierte Produkte und für Bioraffineriekonzepte mangelt es an international vergleichbaren Ökobilanzen. Standards für Bewertungen müssen auf internationaler Basis festgelegt werden. Mittel- und langfristig sind geeignete Instrumente zur Unterstützung positiver Klima- und Umweltwirkungen zu entwickeln. Für einen sinnvollen Einsatz von Produkten und Energie aus nachwachsenden Rohstoffen muss der Kenntnisstand über ihre Wirkungen verbessert

werden. Chancen und Risiken einer verstärkten Biomassenutzung sind an Hand nachvollziehbarer und objektiver Kriterien und Kennzahlen abzuwägen. Dies gilt auch für die Bewertung von Bioraffineriekonzepten. Erste Ansätze gibt es hierzu bereits.⁹ Die Akzeptanz von biobasierten Produkten und Bioenergie im Allgemeinen und Bioraffinerien im Besonderen ist gefährdet, wenn die Nachhaltigkeit nicht gewährleistet ist. Dies bedeutet auch, dass die Bereitstellung von Biomasse für Bioraffinerien, deren gekoppelte, simultane Produktion von Chemikalien, Werkstoffen und Bioenergie sowie die eingeschlossenen heutigen und zukünftigen Verfahren und Konversionstechniken die größtmögliche Kosten- und Ressourceneffizienz aufweisen sollten.

3.3 Klassifizierung

Unter dem Begriff der Bioraffinerie wird eine Vielzahl unterschiedlichster Konzepte zusammen-

gefasst. Es gibt verschiedene Ansätze, Bioraffineriekonzepte zu systematisieren. Für die Klassifizierung von Bioraffinerien gab es bisher kein einheitliches Vorgehen. Je nach Betrachtungsweise wurde bei der Bezeichnung von verschiedenen Bioraffinerie-Typen mehr oder weniger systematisch auf unterschiedliche Aspekte fokussiert. Dabei wurden entweder

- der **Rohstoff** (bspw. Getreide-Bioraffinerie, Gras-Bioraffinerie, Stroh-Bioraffinerie, Holz-Bioraffinerie, waldbasierte Bioraffinerie, Ganzpflanzen-Bioraffinerie, Algen-Bioraffinerie),
 - die **Intermediate** (bspw. Synthesegas-Bioraffinerie, Lignocellulose-Bioraffinerie, Pflanzenöl-Bioraffinerie, Zwei-Plattform-Bioraffinerie),
 - der **Prozess** (bspw. thermochemische Bioraffinerie, biotechnologische Bioraffinerie) oder
 - das/die **Produkt/e** (bspw. Bioethanol-Bioraffinerie, Kraftstoffbioraffinerie)
- in den Mittelpunkt gestellt.

Tabelle 2: Elemente der Klassifizierung von Bioraffinerien¹²

Rohstoffe	Anbaubiomasse → Ölpflanzen → Stärkepflanzen → Zuckerpflanzen → Gräser → Holz → Holzartige Biomasse	Aquatische Biomasse → Algen	Biogene Rest- & Abfallstoffe → Land- und forstwirtschaftliche Reststoffe (bspw. Stroh, Gülle, Waldrestholz, Fruchtschalen) → Biogene Reststoffe aus der Verarbeitung (bspw. Molke, Schlempe, Trester, Treber) → Biogene Abfallstoffe (bspw. Altspisefett, Altholz)
Plattform	→ Niedermolekulare Kohlenhydrate (bspw. Lactose, Saccharose) → Polymere Kohlenhydrate (bspw. Stärke, Inulin, Pektin) → Lignocellulose-Komponenten (Lignin, Cellulose, Hemicellulose) → Proteine → Pflanzenfasern → Pflanzenöle, Lipide → Pyrolyseöl → Presssaft → Biogas → Syngas		
Produkte	Materialien → Chemikalien → Werkstoffe → Futtermittel* → Nahrungsmittel*	Bioenergie → Feste, flüssige, gasförmige Bioenergieträger → Elektrizität → Wärme	
Prozesse	→ Physikalische einschl. mechanische Verfahren → Thermochemische Verfahren → Chemische Verfahren → Biotechnologische Verfahren		

* als Koppelprodukt

Im Rahmen der IEA Task 42¹⁰ wurden erstmals die Grundlagen für ein Klassifizierungssystem für Bio-raffinerien mit einer Systematik und mit einem kontrollierten Vokabular entwickelt.¹¹ Dieses Klassifizierungssystem stellt die Intermediate als Plattform der Bioraffinerie in den Mittelpunkt und orientiert sich damit an der Wertschöpfungskette der chemischen Industrie. Dies erlaubt eine Flexibilisierung bei der Zuordnung der Rohstoffe und Produkte und führt zu einer überschaubaren Anzahl von Plattformen.

Die Systematisierung erfolgt nach vier Strukturelementen: Rohstoff, Plattform, Produkte und Prozesse. Zentrales Element der Systematik sind der/die Intermediat(e), die in der Primärraffination entstehen und als **Plattform** der Bioraffinerie für die Sekundärraffination fungieren. Dieser Plattform werden dann die **Rohstoffe** und **Produkte** zugeordnet. Verbindendes Element sind die **Prozesse**. Es handelt sich dabei um ein polyhierarchisches Klassifizierungsschema, das in der nachstehenden Abbildung 2 in modifizierter Form¹² dargestellt ist. Die Untergruppen der vier Strukturelemente sind noch nicht abschließend fixiert; hier ist erst in Zukunft eine abschließende Einteilung zu erwarten. Tabelle 2 gibt

einen Überblick über die theoretischen Möglichkeiten, ohne auf die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit abzustellen.

Die grafische Umsetzung der Klassifizierung ergibt dann die in der Abbildung 3 gezeigte schematische Darstellung.

Bei dieser Klassifizierung von Bioraffinerieanlagen werden zu deren Bezeichnung die Plattform und der Rohstoff angeführt, ggf. noch die Hauptproduktgruppe genannt, wenn entweder stoffliche oder energetische Produkte überwiegen. Diese ist in Abbildung 4 beispielhaft erläutert und schematisch dargestellt.

Die vier Hauptelemente (Rohstoff, Plattform, Produkte und Prozesse), die dem Klassifizierungsschema für Bioraffinerien zu Grunde liegen, sollen nachfolgend näher erläutert und beschrieben werden. Die nachfolgenden Darstellungen für die Strukturelemente Rohstoffe, Produkte und Prozesse sind keine Besonderheit von Bioraffinerien, sondern gelten vollständig oder teilweise für andere Biomassekonversionspfade ebenso.

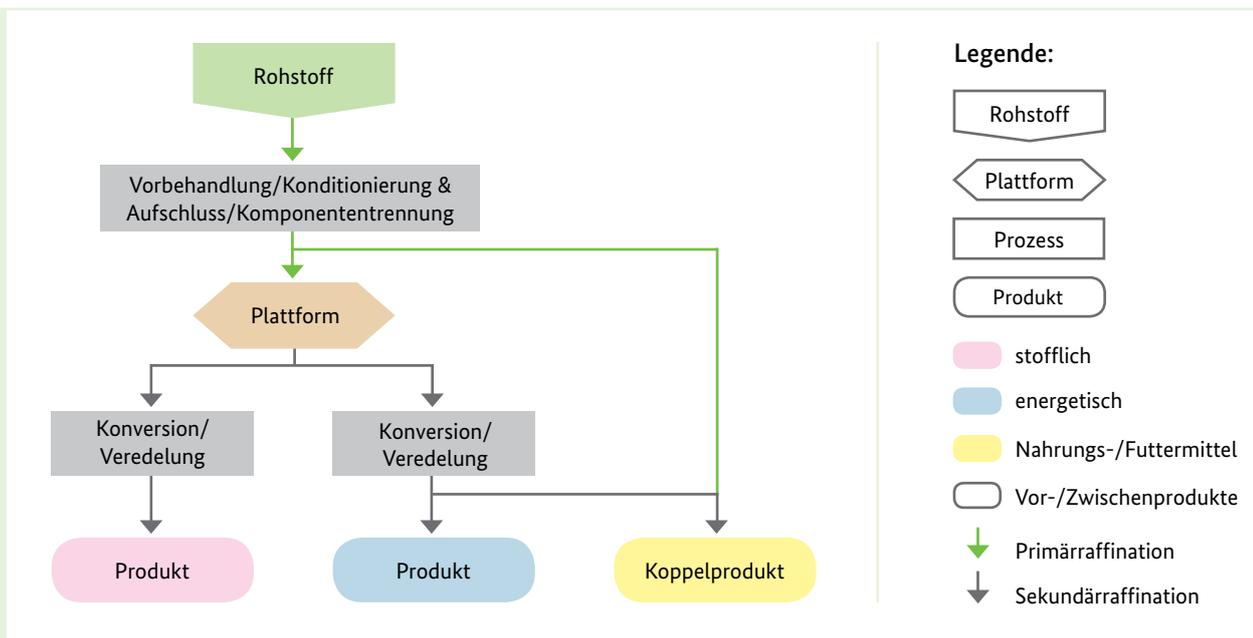


Abbildung 3: Schematische grafische Darstellung einer Bioraffinerie

Plattform (obligatorisches Kriterium)	Rohstoff (obligatorisches Kriterium)	Hauptproduktgruppe (optionales Kriterium)
→ Synthesegas-Bioraffinerie → Stärke-Bioraffinerie	→ auf Basis von Stroh → auf Basis von Getreide	→ für Biokraftstoffe und Chemikalien → für Chemikalien und Werkstoffe

Abbildung 4: Elemente der Bezeichnung von Bioraffinerien

3.3.1 Bioraffinerie-Plattformen

Als Bioraffinerie-Plattform bezeichnet man die bei der Primärraffination entstehenden Intermediate, die Rohprodukt für die nachfolgende Sekundärraffination sind. Die Bioraffinerie-Plattform hat damit eine zentrale Stellung und ist somit das Hauptelement der Klassifizierung von Bioraffinerien. Das/ die Intermediat(e) entsteht/entstehen durch direkte Umwandlung aus der Biomasse. Dabei erfolgt eine Trennung der Komponenten der Biomasse. In einigen Fällen entstehen diese Komponenten jedoch nur in-situ und werden im selben Prozessschritt zu niedermolekularen Verbindungen abgebaut, die dann als Intermediate für weitere Konversionen im Rahmen der Sekundärraffination zur Verfügung stehen. Hier werden die Intermediate weiter modifiziert und/oder konvertiert. Dabei kann als erster Schritt auch die Konversion in ein oder mehrere Zwischenprodukte (bspw. Glucose, Fructose, Fettsäuren, Glycerin, Aminosäuren, Wasserstoff) erfolgen, die dann Vorprodukte für eine weitere nachfolgende Weiterveredelung sind. Im Ergebnis einer oder mehrerer Sekundärraffinationsschritte ergeben sich dann Halb- oder Fertigfabrikate als Produkte zur Vermarktung.

Rohprodukte, die prinzipiell als Intermediate aus der Primärraffination erhalten werden und eine Bioraffinerie-Plattform bilden können, sind in Tabelle 2 aufgelistet. Jedoch sind aus technologischen und wirtschaftlichen Gründen sowie standörtlichen Gegebenheiten nicht immer alle Intermediate als Bioraffinerie-Plattform im Rahmen einer integrierten Verbundproduktion von Primär- und Sekundärraffination geeignet.

3.3.2 Rohstoffe für Bioraffinerien

Rohmaterialien für Bioraffinerien sind biogene Rohstoffe, die auf Biomasse basieren. Unter dem Term Biomasse werden alle durch Lebewesen rezent¹³ anfallenden bzw. erzeugten organischen Stoffe zusammengefasst. Biomasse verbleibt entweder im Ökosystem oder wird durch den Menschen als Rohstoff für die Ernährung bzw. die stoffwandelnde Industrie oder die Energieerzeugung genutzt.

Durch photosynthetische Fixierung von Kohlenstoffdioxid gebildete pflanzliche Biomasse macht die Hauptmenge der terrestrischen Primärproduktion der Biomasse aus. In aquatischen Systemen übernehmen Algen und andere Primärproduzenten diese Aufgabe. Die durch die Primärproduzenten gebildete Biomasse wird dann durch Konsumenten weiter – vor allem in tierische Biomasse – umgesetzt. Mengenmäßig betrachtet ist terrestrische, pflanzliche Biomasse der bedeutendste biogene Rohstoff.

Biomasse ist chemisch gesehen ein sehr komplexes Gemisch aus überwiegend organischen Verbindungen. Neben dem reichlich vorhandenen organischen Kohlenstoff ist Biomasse verhältnismäßig reich an Sauerstoff, aber relativ arm an Wasserstoff. Darüber hinaus sind auch Stickstoff, Schwefel und andere Elemente in geringem Umfang vorhanden. Neben organischen Verbindungen sind auch geringe Mengen anorganischer Verbindungen (bspw. Salze, Mineralien, Spurenelemente) enthalten. Wasser ist hier eine Ausnahme, da es in Biomasse in größerer Menge enthalten sein kann.

Obwohl Biomasse sehr komplex ist, so lassen sich jedoch vier Verbindungsklassen ableiten, die die Hauptmenge der organischen Bestandteile ausmachen:

- Kohlenhydrate
- Lipide
- Proteine
- Lignine

Je nach Herkunft der Biomasse können diese Hauptbestandteile variieren und ggf. auch fehlen. Daneben finden sich noch viele weitere organische Verbindungen in Biomasse. In ihren organischen Komponenten besteht pflanzliche Biomasse hauptsächlich aus Kohlenhydraten, Fetten und Lignin, tierische Biomasse aus Proteinen und Fetten.

Aufgrund der Bedeutung von pflanzlicher Biomasse sollen deren Hauptkomponenten näher betrachtet werden. Kohlenhydrate sind der Hauptbestandteil der pflanzlichen Biomasse und finden sich dort insbesondere als Gerüst- und Speicherkohlenhydrate aber auch als Transportkohlenhydrate sowie in Glykokonjugaten wieder. Die mengenmäßig wichtigsten natürlichen Kohlenhydrate sind Cellulose, Hemicellulosen und Stärke sowie in geringerem Ausmaß Pektine, Inuline und Saccharose. Cellulose ist der am häufigsten vorkommende Naturstoff. Bei diesen natürlichen Kohlenhydraten handelt es sich überwiegend um polymere und oligomere Verbindungen. Glucose ist dabei das wichtigste Monomer und damit die am häufigsten vorkommende organische Verbindung auf der Erde. Kohlenhydratreiche Pflanzenteile sind bspw. Zuckerrüben, Zuckerrohr und Getreidekörner.

Fette sind pflanzliche Speichersubstanzen, die sich vorrangig in Samen oder Früchten finden. Fettreiche Pflanzenteile sind beispielsweise Raps- und Sonnenblumenkörner sowie Palmfruchtfleisch.

Lignine sind Stoffe, die in die pflanzliche Zellwand als Gerüstsubstanzen eingelagert werden. Lignine sind dreidimensionale, polymere Netzwerke aus aroma-

tischen Grundbausteinen, die in vielfältiger Form miteinander verknüpft sind. Zudem kommen viele phenolische Gruppen vor. Lignine sind nach der Cellulose der zweithäufigste Naturstoff. Ligninreich sind beispielsweise alle verholzten Pflanzenteile.

Neben der chemischen Zusammensetzung der Biomasse sind noch weitere Charakteristika von Bedeutung. Hierzu gehören physikalische Rohstoffeigenschaften wie bspw. Dichte, Wassergehalt, Aschegehalt, Gehalt an Spurenelementen, Partikelgröße, Heizwert und weitere Eigenschaften. Hinzu kommen noch solche Charakteristika wie bspw. Menge, Ertrag, Verfügbarkeit, Erntezeitpunkt, Reinheit, Transportfähigkeit, Lagerfähigkeit, Lagerstabilität und Langzeitqualität.

Biogene Rohstoffe sind vielfältig. Sie werden speziell als Industrie- oder Energiepflanzen angebaut oder sie fallen entweder als pflanzliche und tierische Rückstände und Koppelprodukte bei der Primärproduktion bzw. bei industriellen Verarbeitungsschritten der Sekundärraffination oder als Abfälle nach der Gebrauchsphase der Fertigprodukte an (Abbildung 5).

Man kann sie grob in die folgenden Gruppen einteilen:

1. **Nachwachsende Rohstoffe**, d. h. land- und forstwirtschaftlich erzeugte Biomasse, die nicht als Nahrungs- oder Futtermittel Verwendung findet. Neben Anbaubiomasse zählt hierzu auch aquatische Biomasse.
2. **Land- und forstwirtschaftliche biogene Reststoffe**, d. h. die bei der land- und forstwirtschaftlichen Produktion anfallenden Rückstände (bspw. Stroh, Rübenblatt, Waldrestholz, Gülle) bzw. die bei der Primärraffination anfallenden biogenen Reststoffe (bspw. Rübenpressschnitzel, Rapspresskuchen, Kartoffelpülpe, Maisspindeln, tierische Nebenzerzeugnisse, Schwarzlauge, Algenrestbiomasse).
3. **Industrielle biogene Reststoffe**, d. h. Verarbeitungs- und Produktionsrückstände, die bei der industriellen Verarbeitung anfallen, wie Restbiomasse aus der Fermentation (bspw. Schlempe, Gärreste) oder biogene Reststoffe der Lebensmittelproduktion (bspw. Molke, Treber, Fruchtschalen).
4. **Biogene Abfallstoffe**, die nach der Gebrauchsphase der Fertigprodukte anfallen (bspw. Speisealtfette, Abfälle des Lebensmittelkonsums, biobasierte Altöle, biobasierte Verpackungskunststoffe, Gebrauchtholz).

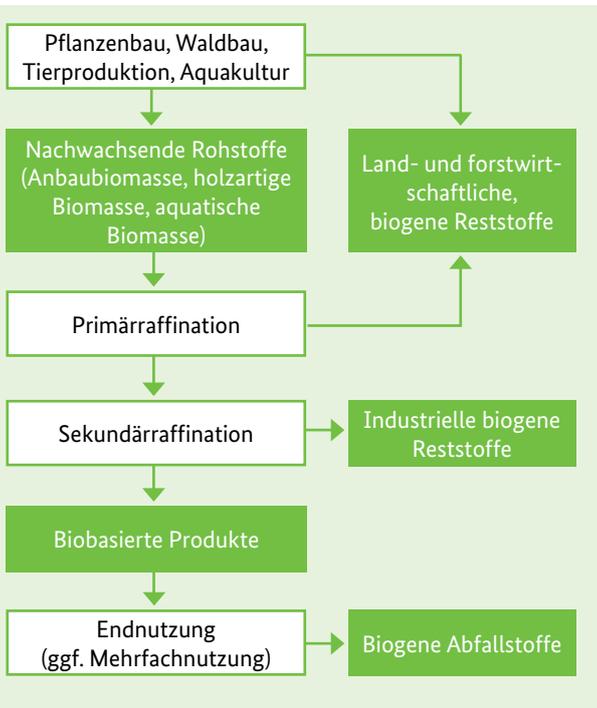


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Quellen biobasierter Rohstoffe

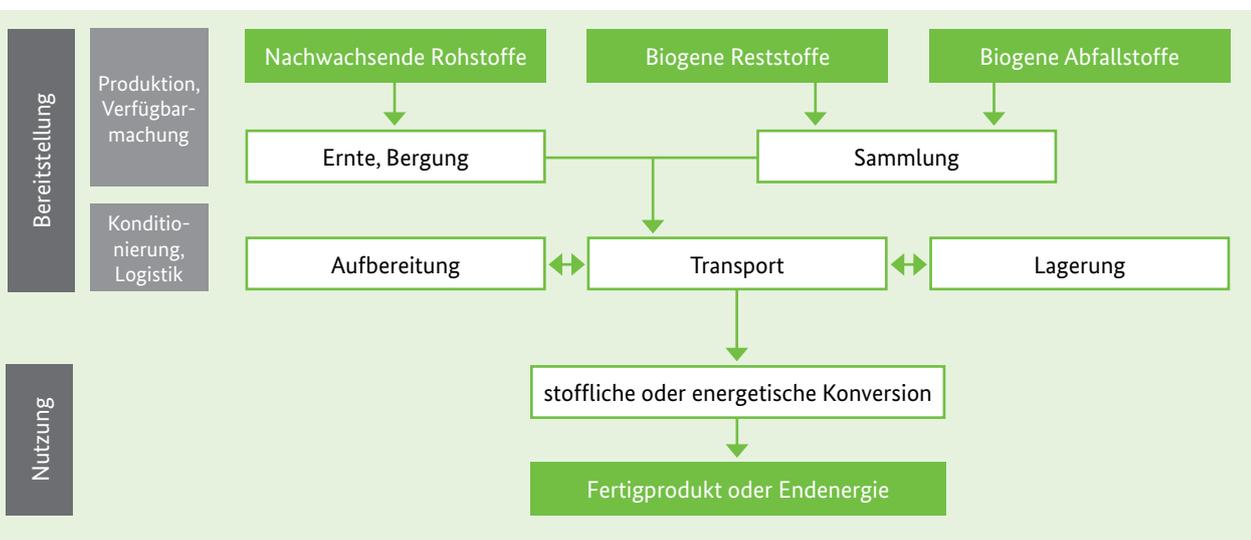


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Verfahrenskette zur Bereitstellung von Biomasse

Die nachhaltige, gesicherte und kostengünstige Produktion und Bereitstellung der Biomasse in erforderlicher Qualität und Menge ist ein entscheidender Faktor für den Betrieb einer Bioraffinerie. Die Bereitstellung von Biomasse gliedert sich in mehrere Phasen (Abbildung 6).¹⁴

Der Anbau zusammen mit der Ernte und Bergung sowie die Sammlung von biogenen Rest- und Abfallstoffen bilden die Produktions- oder Verfügbarmachungsphase. Für die Erträge und Qualität der Biomasse spielen acker- und pflanzenbauliche Faktoren, die Standortverhältnisse sowie betriebs- und marktwirtschaftliche Aspekte eine Rolle. Die Menge und Qualität biogener Rest- oder Abfallstoffe ist auch abhängig vom Produktions-, Bergungs- bzw. Sammlungsverfahren. Die Konditionierungs- und Logistikphase folgt auf die Produktions- oder Verfügbarmachungsphase. In ihr werden die Zeitspanne und die Entfernung zwischen dem Anfall der Biomasse und der Verwertung überbrückt. In dieser Nacherntephase finden Transport-, Lagerungs- und Aufbereitungsprozesse statt. Derartige Verfahrensschritte können grundsätzlich im Verlauf der gesamten Bereitstellungskette und damit auch am Ort der stofflichen und energetischen Umwandlung stattfinden; sie können somit zu unterschiedlichen Zeitpunkten auch mehrmals durchlaufen werden (bspw. Transportprozesse). Einige solcher Lagerungs-, Transport- und Beschickungsprozesse werden – da sie am Standort der Konversionsanlage stattfinden – oft auch als innerbetrieblicher Teil der Konversionsanlage angesehen, da sie u. a. auf die jeweilige Anlagentechnik abgestimmt sein müssen.¹⁴

Bei der Produktion und Bereitstellung von biobasierten Rohstoffen werden neben der Menge auch deren Eigenschaften und damit auch die gelieferte Qualität festgelegt. In der Anbauphase betrifft dies hauptsächlich die chemische Zusammensetzung und die stofflichen Merkmale (bspw. Art und Menge der Inhaltsstoffe, Struktur der Biomasse), während in der anschließenden Bereitstellungsphase vor allem die physikalischen Eigenschaften ausgeprägt werden. Dies resultiert in einer Bandbreite unterschiedlicher Eigenschaften und ermöglicht es, den entsprechenden biobasierten Rohstoff in bestimmtem Rahmen für den jeweilig angestrebten Prozess zu optimieren; ggf. ist aber auch der Prozess an den biobasierten Rohstoff anzupassen.

Die Bezugsmöglichkeiten für biogene Rohstoffe sind vielfältig. Allein für die Anbaubiomasse oder die aus dem Wald gewonnene holzartige Biomasse lässt sich eine Vielfalt von Bereitstellungsketten bis

zum Ort der Nutzung beschreiben. Hinzu kommen dann noch zahlreiche mögliche Bereitstellungsketten für biogene Reststoffe und biogene Abfallstoffe.

Für Bioraffinerien kommen vor allem biogene Rohstoffe in Frage, die in ausreichend gleichbleibender Qualität und Quantität zur Verfügung stehen und einen ganzjährigen Betrieb erlauben, da eine Bioraffinerie sonst kaum wirtschaftlich zu betreiben ist.

3.3.3 Produkte aus Bioraffinerien und deren Markt

Produkte

Bioraffinerien zeichnen sich dadurch aus, dass sie ein breites Spektrum an Produkten in Form von Halb- und Fertigfabrikaten liefern, die in der Sekundärraffination in parallelen und/oder in nacheinander folgenden Konversions- und Veredelungsschritten hergestellt werden. Diese Produkte sind Vor- und Zwischenprodukte für andere Produktionsprozesse oder Fertigprodukte für die Endnutzung. Dabei kann man auch in Bioraffinerien zwei große Nutzungsgruppen unterscheiden: biobasierte Chemikalien und Werkstoffe als Produkte zur stofflichen Nutzung und Sekundärenergieträger zur energetischen Nutzung. Die wichtigsten Produktgruppen sind nachfolgend aufgelistet:

- Biobasierte Chemikalien und Werkstoffe
 - Grundchemikalien und chemische Zwischenprodukte
 - Fein- und Spezialchemikalien (bspw. Pflanzenschutzmittel, Pharmagrundstoffe, Farbstoffe)
 - Biobasierte Polymere, Werkstoffe und Verbundwerkstoffe
 - Biobasierte Chemiefasern, Naturfasern
 - Naturfaser- und holzfaserverstärkte Werkstoffe und Verbundwerkstoffe
 - Klebstoffe, Lacke und Farben
 - Wasch- und Körperpflegemittel
 - Düngemittel
- Bioenergieträger
 - Strom
 - Wärme
 - Biokraftstoffe (bspw. Ethanol, Biodiesel, BtL-Kraftstoffe, Biomethan, Wasserstoff)

Es erfolgt in Bioraffinerien jedoch immer eine Kopplung von verschiedenen stofflichen und energetischen Nutzungspfaden. Allerdings hat die Praxis gezeigt, dass eine Bioraffinerie aus wirtschaftlichen Gründen entweder stofflich oder energetisch orientiert ist, d. h. dass entweder die Bioraffinerie hauptsächlich auf die Produktion von biobasierten technischen Produkten oder hauptsächlich auf die

Erzeugung von biobasierten Sekundärenergieträgern ausgerichtet ist.¹⁵

Zusätzlich zu den biobasierten, technischen Produkten und biobasierten Sekundärenergieträgern kann eine Bioraffinerie in bestimmten Fällen auch noch biogene Koppelprodukte generieren, die bei Eignung und Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben zu Nahrungs- und Futtermitteln weiterverarbeitet werden können. Bei der Entwicklung von Bioraffineriekonzepten sind hierbei allerdings auch Risiken hinsichtlich der Verwendung bestimmter Neben-erzeugnisse für andere Zwecke zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für die Gewährleistung der Sicherheit bei einer Verwendung als Lebens- oder Futtermittel. Die Option der Verwendung von Nebenerzeugnissen als Nahrungs- und Futtermittel kommt nur in Frage, wenn die Koppelprodukte direkt aus dem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen oder biogenen Reststoffen (definiert im Sinne der Einteilung in Kapitel 3.3.1) als Rohstoff resultieren. Wenn biogene Abfallstoffe als Rohstoff verwendet werden, ist eine Nutzung der anfallenden Koppelprodukte nur im technischen Bereich möglich. Als Nahrungs- oder Futtermittel verwendete Koppelprodukte entstehen in einer Bioraffinerie nur als Nebenprodukt.^{6,16} Darüber hinaus erfolgt vor der Weiterverarbeitung der Koppelprodukte eine Trennung der Produktionsströme, die gewährleistet, dass Nahrungs- oder Futtermittel nicht in Anlagen hergestellt werden, die gleichzeitig Stoffe für technische Zwecke produzieren.

Produktausrichtung von Bioraffinerien

Stofflich getriebene Bioraffinerie: Die Bioraffinerie zielt hinsichtlich der Produkte mengenmäßig und/oder wertschöpfungsmäßig hauptsächlich auf die Herstellung eines Spektrums an Chemikalien und Werkstoffen ab. Koppelprodukte und Reststoffe werden zur Erzeugung von Bioenergie und Nahrungs-/Futtermitteln genutzt.

Energetisch getriebene Bioraffinerie: Die Bioraffinerie zielt hinsichtlich der Produkte mengenmäßig und/oder wertschöpfungsmäßig hauptsächlich auf die Herstellung eines oder ggf. mehrerer Bioenergieträger ab. Chemikalien und Werkstoffe werden im Verhältnis dazu nur in geringer Menge generiert. Koppelprodukte und Reststoffe werden zur Produktion von Chemikalien, Werkstoffen und Nahrungs-/Futtermitteln genutzt.

Markt

Biobasierte Chemikalien und Werkstoffe sowie Bioenergie sind derzeit mengenmäßig im Vergleich zu fossil-basierten Produkten und Energien noch in der Minderheit.

In Deutschland wurden im Jahre 2008 rund 4 % der gesamten fossilen Rohstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle) und etwa 14 % des Erdöls in der chemischen Industrie stofflich genutzt, während jeweils der Rest zur Energiebereitstellung (Strom, Wärme, Kraftstoffe) verwendet wurde (Abbildung 7).

Verwendung fossiler Rohstoffe in Deutschland

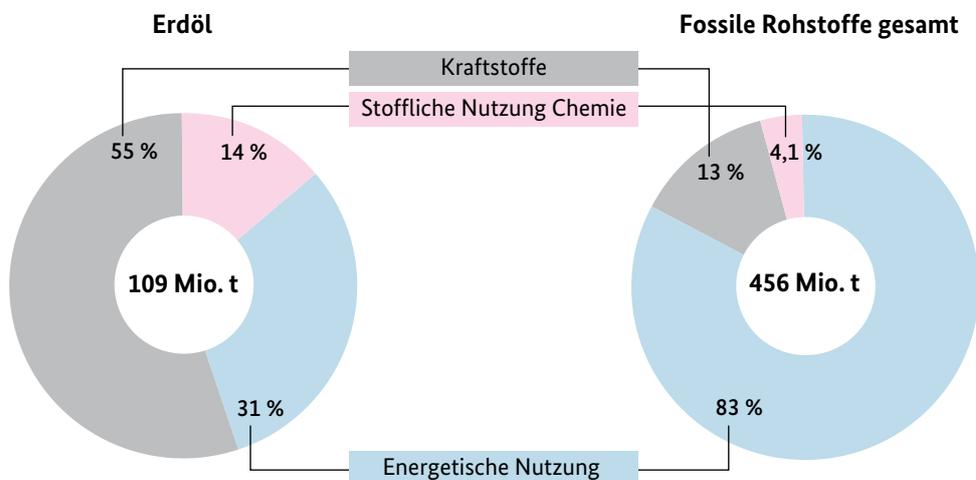


Abbildung 7: Anteile der stofflichen Nutzung in der chemischen Industrie und der energetischen Verwendung an der Nutzung fossiler Rohstoffe in Deutschland im Jahre 2008¹⁷

Biogene Rohstoffe werden im Vergleich zu fossilen Rohstoffen bislang in deutlich geringerem Umfang eingesetzt.

Biobasierte Chemikalien und Werkstoffe. Im Jahr 2008 wurden ca. 3,6 Millionen Tonnen nachwachsende Rohstoffe (ohne Holzrohstoffe) stofflich zur Herstellung von biobasierten Chemikalien, biobasierten Werkstoffen und anderen biobasierten Produkten genutzt.¹⁸ In die chemische Industrie flossen davon rund 2,7 Millionen Tonnen, d. h. ca. 13 % der organischen Rohstoffe sind hier nachwachsend und wurden zu biobasierten Produkten verarbeitet. Rund 0,9 Millionen Tonnen wurden außerhalb des chemischen-pharmazeutischen Bereichs, insbesondere in Papierstärke- und Naturfaser-verarbeitenden Industrien verbraucht. Hinzu kommen noch importierte chemische Zwischenprodukte/Halbwaren und Fertigwaren auf Basis nachwachsender Agrarrohstoffe. Darüber hinaus benötigte auch die Holzverarbeitende Industrie in 2008 mit rund 72 Millionen Kubikmetern (etwa 36 Millionen Tonnen¹⁹) beträchtliche Mengen an Holzrohstoffen. Hinzu kommen noch Altpapier und importierte Holzhalbwaren und Holzfertigwaren.

Für 2009 und 2010 liegen erst vorläufige Daten vor, aber es ist insgesamt von einer ähnlichen Größenordnung auszugehen.

Bioenergie. Im Jahre 2010 betrug nach Angaben des BMU der Endenergieverbrauch von Bioenergie rund 196 TWh und entspricht damit etwa 7,9 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland von 2.496 TWh.²⁰ Bioenergie hatte damit den größten Anteil an den erneuerbaren Energien. Insgesamt rund 71 % aller erneuerbaren Energien wurden aus Biomasse erzeugt, wobei in den einzelnen Teilbereichen der erneuerbaren Energien folgende Anteile erzielt wurden: 33 % im Strombereich, 92 % im Wärmebereich und 100 % im Kraftstoffbereich.

Bei den Märkten für stoffliche Produkte handelt es sich um offene, ungeschützte Märkte. Der Marktzugang wird im Wesentlichen durch technische Eignung und Preis bestimmt. Die Lage auf den Märkten für energetische Produkte ist differenziert zu betrachten. Der Markt für Bioenergie (als Teil der erneuerbaren Energien) wird insgesamt stärker durch politische Vorgaben und Subventionen auf nationaler und europäischer Ebene geprägt. So operiert Strom als energetisches Produkt partiell in einem geschützten, subventionierten Markt. Die Rahmenbedingungen für Biokraftstoffe waren in den letzten Jahren nicht stabil und erschweren dadurch eine



langfristige Planung und Marktdurchdringung. Die Wärmenutzung erfordert einen Wärmeabnehmer, der bei der gekoppelten Produktion von Strom und Wärme nicht immer vorhanden ist.

Die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie ist im Vergleich zur energetischen Nutzung mengenmäßig geringer. Jedoch ist der prozentuale Anteil nachwachsender Rohstoffe am Gesamtverbrauch organischer Rohstoffe der chemischen Industrie deutlich größer als der Anteil von biogenen Rohstoffen am Gesamtenergierohstoffverbrauch (ein Vergleich für 2008 ergibt einen Anteil von 13 % Biomasse an den organischen Rohstoffen der deutschen Chemieindustrie und von 6,4 % Bioenergie am gesamten deutschen Endenergieverbrauch).

Die Europäische Kommission sieht den Markt für biobasierte Produkte als einen von sechs besonders aussichtsreichen Zukunftsmärkten an. Die EU-Kommission rechnet damit, dass die Umsätze in den sechs Zukunftsmärkten bis zum Jahre 2020 stark anwachsen und bis dahin zahlreiche Arbeitsplätze in der EU entstehen könnten. Die Bundesregierung wirkt an der Umsetzung der Leitmarktinitiative der EU mit. Auch diese Initiative verfolgt das Ziel, die Wirtschaft beim Aufbau einer nachhaltigen, biobasierten Ökonomie zu unterstützen.

3.3.4 Prozesse und Technologien für Bioraffinerien

Sowohl für die Primärraffination und die Sekundärraffination als auch für die vorausgehende Biomassebereitstellung ist ein breites Spektrum an Technologien und Verfahren erforderlich. Dabei gibt es im Grunde keine für Bioraffinerien spezifischen Entwicklungen, sondern es geht um die innovative Adaption der prinzipiell bekannten Produktions-

techniken an die spezifischen Biomasseeigenschaften. Dies wiederum erfordert jedoch die Entwicklung neuer und spezifischer Prozesse und Methoden sowie intelligenter technischer Lösungen zur Bereitstellung, Konditionierung und Konversion von Biomasse. Man kann vier Hauptgruppen unterscheiden, denen – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – folgende Prozesse zugeordnet werden können:

- Physikalische, einschließlich mechanische Verfahren
 - Grundoperation zur Änderung der Stoffeigenschaften (bspw. Zerkleinern, Trocknen, Erwärmen, Kühlen, Verdichten)
 - Reinigungs- und Trennverfahren (bspw. Filtration, Destillation, Extraktion, Kristallisation, Adsorption, Sieben)
 - Förderverfahren
- Thermochemische Verfahren
 - Verbrennung
 - Vergasung
 - Pyrolyse
 - Thermolyse
 - Hydrothermale Verfahren

- Chemische Verfahren
 - Grundoperationen zur Stoffumwandlung (bspw. Oxidation, Hydrierung, Veresterung, Veretherung, Isomerisierung, Hydrolyse, Polymerisation)
 - Chemisch katalysierte Umwandlungen
- Biotechnologische Verfahren
 - Enzymatisch katalysierte Umwandlungen
 - Fermentations- und Vergärungsprozesse

Diese Prozesse können auch als integrierte Verfahren betrieben werden, bspw. in der Kombination von Trenn- und Reaktionstechnik oder als Verknüpfung von chemischen und biotechnologischen Verfahren.

Ein Prozess hat nicht nur Produkte und Edukte. Alle Prozesse erfordern zusätzlich Hilfsstoffe/Medien und Energie, die bei der Prozessentwicklung und Bilanzierung für Bioraffinerien zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus sind Abfall, Abwasser und Emissionen weitere Faktoren, die bei der Prozessentwicklung und Bilanzierung zu beachten sind. Bei der Nutzung von Biomasse sind weitere Faktoren (wie bspw. Nähr-

Wertschöpfungskette	Bioraffinerie (Plattform: feste bzw. flüssige Intermediate) ^a	Petrochemisch
Rohstoffe	<ul style="list-style-type: none"> → Biomasse: sehr komplexes Gemisch aus organischen Verbindungen → Kohlenstoff und Heteroatome (arm an Wasserstoff, reich an Sauerstoff) → enthält anorganische Verbindungen → wasserhaltig 	<ul style="list-style-type: none"> → Erdöl, Erdgas: Gemisch aus Kohlenwasserstoffen → Kohlenstoff und Wasserstoff (kaum Heteroatome, sauerstoffarm) → enthält kaum anorganische Verbindungen → wasserfrei
Primärraffination	<ul style="list-style-type: none"> → Mechanischer, chemischer und biochemischer Aufschluss zu komplexen Molekülen 	<ul style="list-style-type: none"> → Destillation und thermische und thermokatalytische Spaltung zu einfachen Molekülen
Sekundärraffination	<ul style="list-style-type: none"> → Umwandlung und Abbau komplexer Moleküle (<i>Top-down</i>-Prinzip) → Nutzung der Syntheseverleistung 	<ul style="list-style-type: none"> → Aufbau komplexer Moleküle aus einfachen Vorstufen (<i>Bottom-up</i>-Prinzip)
Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> → Thermochemische und chemo-katalytische Verfahren → Biotechnologische Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> → Thermochemische, thermo-katalytische und chemo-katalytische Verfahren
Produktklassen	<ul style="list-style-type: none"> → Chemikalien und Werkstoffe → Brenn- und Kraftstoffe → Nahrungs- und Futtermittel 	<ul style="list-style-type: none"> → Chemikalien und Werkstoffe → Brenn- und Kraftstoffe

^a Beispiele: Plattform Stärke, Plattform Pflanzenöl, Plattform Lignocellulose (Cellulose, Hemicellulosen, Lignin)

stoffkreisläufe und konkurrierende Nutzungen der Biomasse) zu berücksichtigen. Erst eine vollständige Stoff- und Energiebilanz der Bioraffinerie in Kombination mit allgemeinen und spezifischen Standortfaktoren sowie einer Nachhaltigkeitsbetrachtung erlaubt die Beurteilung eines Prozesses, einer technologischen Entwicklung und eines Nutzungspfades.

3.4 Bioraffinerie-Wertschöpfungskette versus petrochemische Wertschöpfungskette

Ein Vergleich zwischen der Bioraffinerie-Wertschöpfungskette und der petrochemischen Wertschöpfungskette zeigt auf den ersten Blick Ähnlichkeiten. Auf den zweiten Blick erkennt man jedoch, dass es zwar übergeordnete Gemeinsamkeiten gibt, aber auch eine große Anzahl signifikanter Unterschiede existieren.

Beiden Wertschöpfungsketten sind das Prinzip der Komponententrennung, das Prinzip der Primär- und Sekundärraffination sowie ein breites Spektrum an Produkten in Form von Produktstammbäumen gemeinsam. Die Unterschiede ergeben sich aus

- der Art der Rohstoffkomponenten, der Rohstoffzusammensetzung und der Rohstoffkomplexität;
- der Art und den Verfahren der Primärraffination;
- den Prinzipien und Grundprozessen der Sekundärraffination;
- dem Produktspektrum hinsichtlich der Koppelproduktion von Nahrungs- und Futtermitteln.

Im Detail veranschaulicht die nachfolgende Übersicht (Tabelle 3) die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Wertschöpfungsketten. Hierbei wird deutlich, dass bei einer Bioraffinerie-Wertschöpfungskette mit der Plattform Synthesegas bzw. Biogas mehr Gemeinsamkeiten bestehen als bei einer Bioraffinerie-Wertschöpfungskette mit der Plattform feste bzw. flüssige Intermediate.

Tabelle 3: Vergleich von Bioraffinerie-Wertschöpfungskette (links – Plattform: feste bzw. flüssige Intermediate, rechts – Plattform: gasförmige Intermediate) und petrochemischer Wertschöpfungskette

Wertschöpfungskette	Bioraffinerie (Plattform: gasförmige Intermediate) ^b	Petrochemisch
Rohstoffe	<ul style="list-style-type: none"> → Biomasse: sehr komplexes Gemisch aus organischen Verbindungen → Kohlenstoff und Heteroatome (arm an Wasserstoff, reich an Sauerstoff) → enthält anorganische Verbindungen → wasserhaltig 	<ul style="list-style-type: none"> → Erdöl, Erdgas: Gemisch aus Kohlenwasserstoffen → Kohlenstoff und Wasserstoff (kaum Heteroatome, sauerstoffarm) → enthält kaum anorganische Verbindungen → wasserfrei
Primärraffination	<ul style="list-style-type: none"> → Thermische und thermo-katalytische (Syngas) bzw. biochemische (Biogas) Spaltung zu einfachen Molekülen 	<ul style="list-style-type: none"> → Destillation und thermische und thermo-katalytische Spaltung zu einfachen Molekülen
Sekundärraffination	<ul style="list-style-type: none"> → Aufbau komplexer Moleküle aus einfachen Vorstufen (<i>Bottom-up</i>-Prinzip) 	
Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> → Thermochemische, thermo-katalytische und chemo-katalytische Verfahren 	
Produktklassen	<ul style="list-style-type: none"> → Chemikalien und Werkstoffe → Brenn- und Kraftstoffe 	

^b Beispiele: Plattform Synthesegas, Plattform Biogas

Die fundamentalen Unterschiede in der Zusammensetzung zwischen fossilen und biogenen Rohstoffen werden am Beispiel des Vergleichs des wichtigen fossilen Rohstoffs Naphtha mit den biogenen Rohstoffen Cellulose, Hemicellulosen und Lignin deutlich (Abbildung 8).

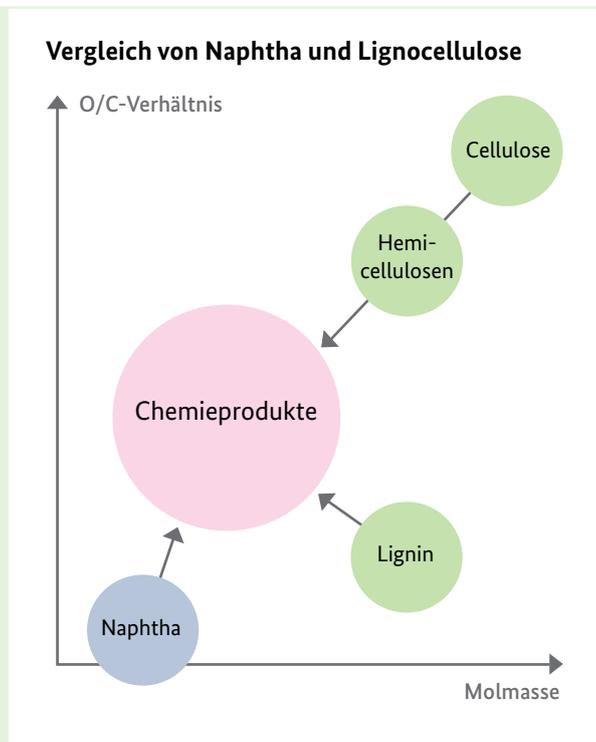


Abbildung 8: Vergleich des fossilen Rohstoffs Naphtha mit den biogenen Rohstoffen Cellulose, Hemicellulosen und Lignin hinsichtlich Molmasse und Sauerstoff/Kohlenstoff-Verhältnis

3.5 Bioraffinerie-Konzepte

Das in Kapitel 3.3 erläuterte Klassifizierungsschema weist neben den Hauptelementen zahlreiche Unter-elemente auf und eröffnet aufgrund dessen eine Vielzahl von Optionen für Bioraffinerieplattformen und darauf aufbauende Bioraffineriekonzepte. Dennoch haben sich unter den Bioraffineriekonzepten einige besonders aussichtsreiche Bioraffineriepfade herauskristallisiert:

1. Zucker-Bioraffinerie bzw. Stärke-Bioraffinerie
2. Pflanzenöl-Bioraffinerie bzw. Algenlipid-Bioraffinerie
3. Lignocellulose (Cellulose, Hemicellulose und Lignin)-Bioraffinerie²¹ bzw. Grüne Bioraffinerie²²
4. Synthesegas-Bioraffinerie
5. Biogas-Bioraffinerie

Diese Bioraffineriepfade unterscheiden sich durch die Plattform, d. h. das/die bei der Komponententrennung gebildete(n) Intermediat(e). Die Plattformen unterscheiden sich somit zunächst durch die

Art der Primärraffination. Das Spektrum der Produkte ist jedoch breit und diversifiziert, so dass hier keine weitere Unterteilung sinnvoll ist. Die o. g. Bioraffineriepfade werden innerhalb dieser Roadmap im Kapitel 4 und 5 im Detail analysiert und bewertet.

3.6 Entwicklungsansätze

Eine weitere Frage, die sich stellt: Wie wird eine Bioraffinerie entwickelt? Zur Umsetzung eines Bioraffineriekonzepts werden im Prinzip zwei grundlegende Ansätze verfolgt: *Bottom-up* und *Top-down* (Abbildung 9).

Bottom-up-Ansatz

Handelt es sich um die Erweiterung einer bereits vorhandenen Biomasseverarbeitungsanlage (bspw. Zucker-, Stärke-, Zellstoffwerk, Ölmühle, Ethanolanlage), spricht man vom *Bottom-up*-Ansatz. Ziel ist es in dem Fall, durch Anknüpfung zusätzlicher Prozesse und Technologien in einer integrierten Primär- und Sekundärraffination eine erweiterte Produktpalette und/oder eine Ausweitung der einsetzbaren Biomassefraktionen zu erreichen.

Ein Beispiel für eine entsprechende Anlage ist die Stärke-Bioraffinerie basierend auf Getreide in Les-trem (Frankreich).²³ Ursprünglich handelte es sich bei der Anlage um eine einfache Stärkefabrik, die später um eine Mais- und Weizenstärkeproduktion ergänzt wurde. Es folgte eine sukzessive Erweiterung des Produktspektrums (Stärkederivate und Stärke-modifikate, Chemikalien, Fermentationsprodukte).

Top-down-Ansatz

Im Gegensatz zum *Bottom-up*-Ansatz spricht man vom *Top-down*-Ansatz, wenn es sich um neu konzipierte, hoch integrierte Anlagen handelt, die für die Nutzung verschiedenster Biomassefraktionen und zur (abfallfreien) Erzeugung einer Vielfalt von Produkten für unterschiedliche Märkte ausgelegt sind. Dabei wird nicht an bestehende Prozesse der Konversion von Biomasse angeknüpft, sondern die Anlagen für Primär- und Sekundärraffination werden eigens auf Basis einer Bioraffinerieplattform zur Erzeugung unterschiedlicher Produkte entwickelt und errichtet.

Beispielhaft für diesen Ansatz ist die Synthesegas-Bioraffinerie auf Basis Holz in Güssing (Österreich).²⁴ Es handelt sich dabei um eine Demonstrationsanlage, die einerseits kommerziell Strom und Wärme liefert und in der andererseits verschiedene Nutzungen von Synthesegas (bspw. Fischer-Tropsch-Synthese, Bio-SNG²⁵-Synthese, Synthese von Alkoholen, Herstellung von Wasserstoff) erprobt werden.

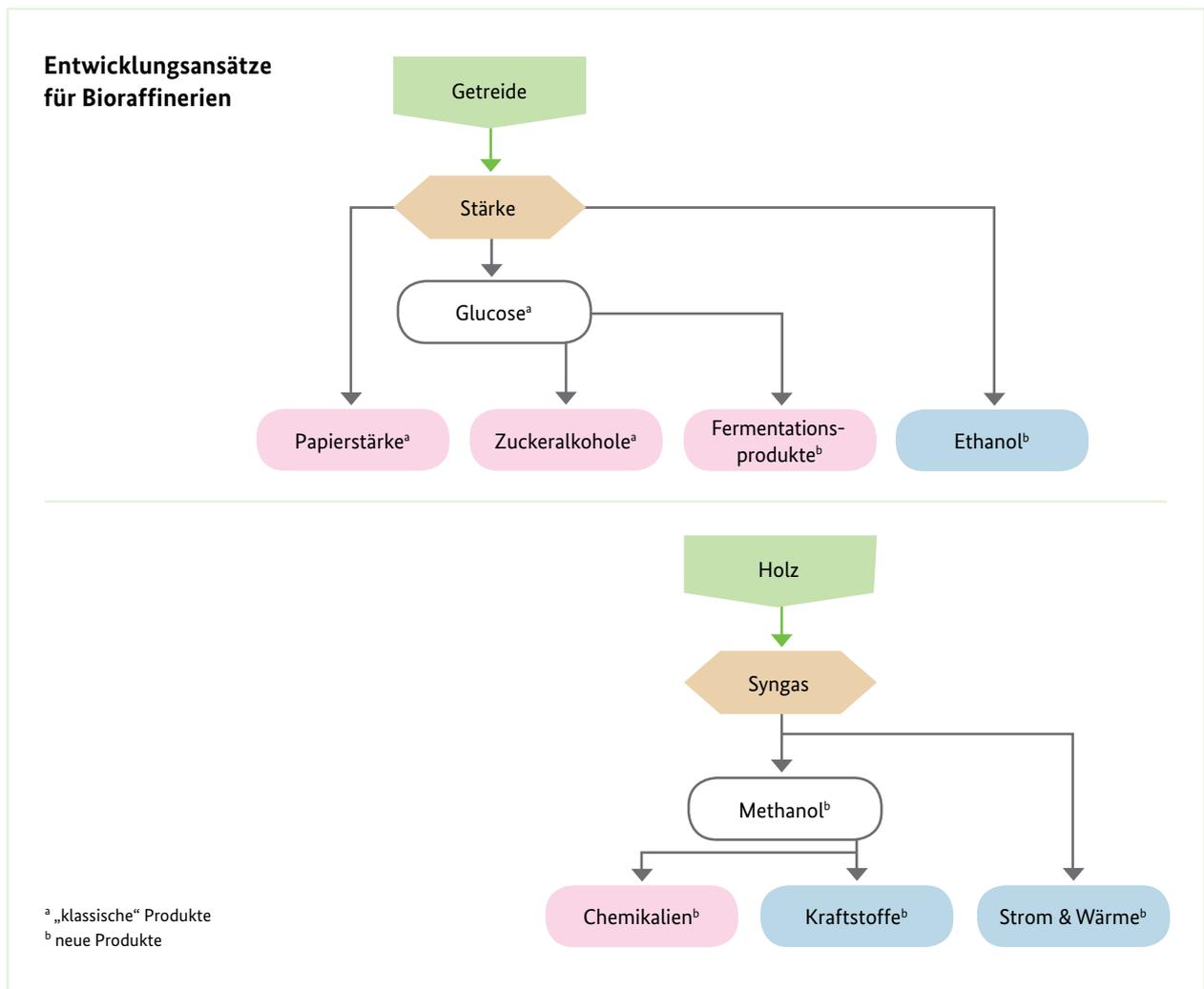


Abbildung 9: Beispiele für Entwicklungsansätze von Bioraffinerien: oben – Bottom-up, unten – Top-down

Sowohl der *Bottom-up* als auch der *Top-down* Entwicklungsansatz können zentralisiert an einem neuen Standort („green field“) oder an einem bereits bestehenden Industriestandort („brown field“) umgesetzt werden. Im letzteren Fall vorzugsweise durch Integration in einen bestehenden Industrie- oder Chemiapark bzw. als Weiterentwicklung bestehender Biomassekonversionsanlagen. Es ist aber auch denkbar, dass Komponenten der Primärraffination (bspw. die Biomassekonditionierung) dezentral organisiert sind, so dass eine gemischte Struktur entsteht.

Wie bereits in Kapitel 3.3 erläutert, erfolgt in Bioraffinerien eine Kopplung von verschiedenen energetischen und stofflichen Nutzungspfaden. Die Entwicklung einer Bioraffinerie wird jedoch i. d. R. entweder stofflich oder energetisch getrieben, d. h. dass entweder die Bioraffinerie hauptsächlich auf die Produktion von biobasierten, technischen Produkten oder hauptsächlich auf die Erzeugung von biobasierten Sekundärenergieträgern ausgerichtet ist. Darüber hinaus erfolgt der Auf- und Ausbau in der Regel schrittweise. Oft wird neben der Primär-

Entwicklungsansätze von Bioraffinerien

Bottom-up-Bioraffinerieansatz: Erweiterung vorhandener Biomasseverarbeitungsanlagen (bspw. Zucker-, Stärke-, Zellstoffwerke, Ölmühlen, Ethanolanlage), die derzeit nur ein oder wenige Produkte erzeugen, zu einer Bioraffinerie mit dem Ziel der Erweiterung in Bezug auf die einsetzbaren Biomassefraktionen und/oder die erzeugten Produkte.

Top-down-Bioraffinerieansatz: Neukonzeption von hoch integrierten Anlagen als Bioraffinerie zur (abfallfreien) Erzeugung einer großen Vielfalt unterschiedlichster Produkte für verschiedenartige Märkte aus den unterschiedlichsten Biomassefraktionen, wobei üblicherweise eine Ganzpflanzennutzung (bspw. Holz-Lignocellulose, Korn und Stroh von Getreide, Grüngräser) angestrebt wird.

raffination erst einmal die Sekundärraffination zu nur einem einzigen oder quantitativ deutlich überwiegenden Hauptprodukt implementiert und erst zeitlich nachfolgend erfolgt dann der Ausbau zu einer Bioraffinerie über die Integration weiterer Konversionsschritte innerhalb der Sekundärraffination (beispielhaft wird dies in der nachfolgenden Box an einem Szenario für die Entwicklung einer Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis Stroh erläutert).

Entwicklung einer Energie-getriebenen Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis Stroh (Beispiel)

Top-down-Entwicklungsszenario für eine Energie-getriebene Bioraffinerie am Beispiel des Aufbaus einer Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis Stroh:

- 1a. Aufschluss von Stroh zur Komponententrennung in Cellulose/Hemicellulose und Lignin (Primärraffination) und Hydrolyse der Cellulose/Hemicellulose zu fermentierbaren Zuckern und deren Umsetzung zu Ethanol (Sekundärraffination). Vermarktung von Ethanol als Kraftstoffkomponente oder als Chemieprodukt.
- 1b. Energetische Nutzung von Lignin zur Gewinnung von Wärme und Strom als Prozessenergie.
- 1c. Herstellung von Futtermitteln und Kohlenstoffdioxid aus den Nebenprodukten der Ethanolfermentation.
2. Konversion von Ethanol zu chemischen Folgeprodukten und Vermarktung dieser Chemikalien.
3. Stoffliche Nutzung von Lignin als Quelle für Aromaten, die dann vermarktet werden.

Wie ist der Entwicklungsstand von Bioraffineriekonzepten? Die Umsetzung von Bioraffineriekonzepten wurde nur für *Bottom-up*-Ansätze im industriellen Maßstab realisiert – wenn auch erst in wenigen Anlagenkomplexen. Beispiele sind die Stärke-Bioraffinerie auf Basis Getreide in Lestrem (Frankreich) und die Stärke-Bioraffinerie auf Basis Mais in Decatur, Illinois (USA) sowie die Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis Holz in Lenzing (Österreich) bzw. in Sarpsborg (Norwegen). Aber auch hier gibt es noch viel Forschungsbedarf. Bioraffineriekonzepte nach dem *Top-down*-Ansatz wurden noch nicht vollständig umgesetzt und befinden sich allesamt noch im Stadium von Forschung, Entwicklung und Demonstration. Erste Pilot- und Demonstrationsanlagen wurden und werden in Europa (einschließlich Deutschland), den USA sowie in anderen Ländern errichtet.

3.7 Entwicklung von Bioraffinerien in Deutschland – Einordnung in den internationalen Kontext

In Europa, den USA und einigen anderen Industrieländern erfolgt – überwiegend Technologie-getrieben – seit etwa zehn bis fünfzehn Jahren eine stetige Entwicklung zur Nutzung von Biomasse und in den letzten fünf Jahren zusätzlich auch zur Entwicklung von Bioraffinerien. Die nachfolgend beschriebenen Analysen beziehen sich auf Bioraffinerien im Sinne der in Kapitel 3.1 erläuterten explizit integrativen, multifunktionalen Konzepte für die nachhaltige, gekoppelte Erzeugung eines Spektrums unterschiedlicher Produkte (Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie, Nahrungs-/Futtermittel) aus Biomasse.

In **Europa** hat die Entwicklung von Bioraffinerien in den letzten fünf Jahren Fahrt aufgenommen. Während in einzelnen Ländern (bspw. Deutschland, Frankreich, Niederlande, Skandinavien) bereits seit einer Dekade Entwicklungen im Gange sind, ist man auf EU-Ebene erst seit etwa drei Jahren ernsthaft an der Thematik Bioraffinerien interessiert. Die hier vorgesehenen finanziellen Mittel sind jedoch vergleichsweise bescheiden, sowohl im Vergleich zu den nationalen Aufwendungen der Mitgliedstaaten als auch zu den Finanzmitteln außereuropäischer Akteure (bspw. den USA). Während im 6. EU-Forschungsrahmenprogramm (FP6) und dessen Vorgängerprogrammen das Thema Bioraffinerie kaum eine Rolle spielte, werden im aktuellen 7. EU-Forschungsrahmenprogramm (FP7) erstmals explizit integrierte Bioraffinerie-Konzepte gemäß der unter 3.1 erläuterten Definition umfassend mit einem Gesamtvolumen von über 70 Millionen Euro gefördert.²⁶ Die Inhalte der explizit integrativen Bioraffinerie-Projekte sind sehr unterschiedlich und umfassen meistens die Entwicklung neuer Bioraffinerieprozesse und -produkte, die Optimierung und den Ausbau bestehender Konversionsprozesse und die Demonstration von Forschungsergebnissen im industriellen Maßstab. Darüber hinaus wurde mit „Star-COLIBRI – Strategic Targets for 2020 – Collaboration Initiative on Biorefineries“²⁷ auch ein umfangreiches Projekt im Bereich „Forschungskoordination“ gefördert. Das Ziel von Star-COLIBRI war, die Zusammenarbeit zwischen sich ergänzenden Forschungsprojekten auf europäischer Ebene anzuregen, um den Fortschritt auf diesem Gebiet voranzutreiben und der Fragmentierung von Forschungsaktivitäten und -ergebnissen entgegenzuwirken. Im Verlauf dieses Projektes wurden zudem

eine „Bioraffinerie-Forschungsagenda 2020“ und ein „Bioraffinerie-Vision-Dokument 2030“ angefertigt, die der europäischen Entwicklung des Bioraffineriebereiches einen Rahmen geben sollen. Aus Deutschland sind bei Star-COLIBRI die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), das Deutsche Biomasse-Forschungszentrum (DBFZ) und die Technische Universität Dresden engagiert. Über diese explizit integrativen FuE-Projekte hinaus wird auf EU-Ebene auch eine Fülle von Forschungsprojekten unterstützt, die sich mit einzelnen oder mehreren Aspekten oder potenziellen Komponenten des Themas Bioraffinerie beschäftigen bzw. die die Konversion von Biomasse zum Inhalt haben. Der Umfang wird sicher noch einmal die gleiche Größenordnung an Fördermitteln umfassen.

In den USA wird mit hohem finanziellen Mitteleinsatz von mehreren Hundert Millionen US-Dollar für Forschung, Entwicklung und Demonstration unter der Überschrift „Bioraffinerien“ die Nutzung von Biomasse unterstützt, wobei jedoch die Mehrzahl der bisherigen Projekte keine explizit integrierten Bioraffineriekonzepte gemäß der unter 3.1 erläuterten Definition waren. Die Förderung ist insbesondere auf den Bereich Cellulose-Bioethanol ausgerichtet. Mittlerweile beginnt hier in den USA die Errichtung erster Referenzanlagen im Produktionsmaßstab.

In den letzten zwei Jahren hat eine Weiterentwicklung hinsichtlich der Nutzung von Biomasse stattgefunden. Der Bereich Biokraftstoffe und hier besonders Cellulose-Bioethanol wird zwar weiterhin intensiv vorangetrieben, jedoch rücken jetzt

zusätzlich immer mehr biobasierte Chemikalien und Werkstoffe in den Mittelpunkt des Interesses. Hierfür sind im Wesentlichen zwei Gründe maßgeblich: einerseits haben sich einige Prognosen der Vergangenheit im Biokraftstoffbereich der USA als unrealistisch erwiesen, andererseits wird von Forschern und Investoren zunehmend realisiert, dass biobasierte Werkstoffe und Chemikalien ein hohes Wertschöpfungspotenzial besitzen. Letzteres gilt sowohl für die singuläre Herstellung von biobasierten Chemikalien und Werkstoffen als auch für die zusätzliche integrierte Produktion von Biokraftstoffen. Insbesondere letzterer Aspekt führt direkt zur Entwicklung von (der o. g. Definition entsprechenden) Bioraffinerien, so dass zukünftig mit verstärkten Entwicklungsanstrengungen in den USA hin zu explizit integrierten Bioraffineriekonzepten gerechnet werden darf.

In den meisten **Schwellen- und Entwicklungsländern** ist die Entwicklung zur Nutzung von Biomasse hingegen Rohstoff-getrieben und führte zur Implementierung von zahlreichen Anlagen zur Konversion von Biomasse, die sich zukünftig in einigen Fällen auch zu Bioraffinerien weiterentwickeln werden. Die relativ gute Agrarstruktur und Wettbewerbsfähigkeit von Biomasse in einigen Schwellen- und Entwicklungsländern (bspw. Brasilien, Indien, Thailand) hat dabei große Agrar-, Chemie- und Energieunternehmen aus den entwickelten Ländern angezogen. Hierbei spielen Kooperationen zwischen nationalen und internationalen Firmen eine entscheidende Rolle. Besonders nordamerikanische, britische, französische Firmen sind diesbezüglich



engagiert, während deutsche Firmen nur vereinzelt in diesen Ländern aktiv sind.

In **Deutschland** wird die Nutzung von Biomasse seit etwa fünfzehn Jahren vorangetrieben. Explizit integrierte Bioraffineriekonzepte werden schon seit einigen Jahren verfolgt. Es gibt beispielsweise verschiedene Aktivitäten zur Untersuchung und Entwicklung von diversen Bioraffineriepfaden, die sich in unterschiedlichen Realisierungsstadien befinden. Beispiele dafür sind

- Zucker/Stärke-Bioraffinerie auf Basis Getreide/Zuckerrüben der Firma Südzucker/CropEnergies in Zeitz (Sachsen-Anhalt)²⁸
- Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis Holz eines Konsortiums unter Koordination der DECHEMA als Teil des Chemisch-Biotechnologischen Prozesszentrums der Fraunhofer-Gesellschaft am Chemiestandort Leuna (Sachsen-Anhalt)²⁹
- Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis Stroh der Firma Süd-Chemie in München und Straubing (Bayern)³⁰
- Grüne Bioraffinerie auf Basis Grassilage der Firma Biowert in Brensbach (Hessen)³¹
- Grüne Bioraffinerie auf Basis Gras der Firma biopos in Selbelang (Brandenburg)³²
- Synthesegas-Bioraffinerie auf Basis Stroh des KIT in Karlsruhe (Baden-Württemberg)³³

Die Forschung und Entwicklung von Bioraffinerien ist sehr komplex. Neben Forschungsvorhaben, die sich mit integrierten Bioraffineriekonzepten beschäftigen, gibt es darüber hinaus eine Vielzahl von Forschungsprojekten, die sich mit einzelnen oder mehreren Aspekten oder potenziellen Komponenten des Themas Bioraffinerie beschäftigen bzw. die grundlagenorientierte Forschungen zum Ziel haben, die für verschiedene Nutzungspfade von Biomasse von Bedeutung sind, die aber nicht nur Bioraffinerien betreffen. Hinzu kommt, dass eine Zuordnung der Grundlagenforschung (bspw. für Pflanzen oder die nachhaltige Agrarproduktion) zu den Anwendungsbereichen im Food- oder Non-Food-Sektor nicht möglich ist.

Die im Rahmen des BMELV-Förderprogramms „Nachwachsende Rohstoffe“ geförderten Projekte zur Konversion und stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse können – bei aller Problematik der Zuordnung und Abgrenzung – zur Hälfte als Vorhaben zur Unterstützung bzw. zur Technologieentwicklung für Bioraffinerien angesehen werden. Hinzu kommen noch Aktivitäten, die aus verschiedenen anderen Förderprogrammen, insbesondere des BMBF, aber auch des BMU und BMWi, gefördert

werden. Mit dem Ende 2010 verabschiedeten Gesetz zur Errichtung eines Sondervermögens „Energie- und Klimafonds“ werden der Bundesregierung zukünftig weitere Mittel u. a. für Forschung und Entwicklung im Bioenergiebereich zur Verfügung stehen.

Im Rahmen der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“³⁴ die die Forschungsförderaktivitäten der einzelnen Ressorts zusammenfasst, die im Zusammenhang mit der Nutzung von biologischen Ressourcen stehen, ist ab 2010 eine Gesamtfördersumme von 2,4 Milliarden Euro (Projektförderung und institutionelle Förderung) für sechs Jahre vorgesehen. Die Förderaktivitäten umfassen Entwicklungen für die Ernährung (inkl. nachhaltige Agrarproduktion sowie sichere und gesunde Lebensmittel) sowie die Nutzung von Biomasse für stofflich-industrielle und energetische Zwecke. Die Förderung von Bioraffineriekonzepten ist hier eingeschlossen.

Am Chemiestandort Leuna (Sachsen-Anhalt) entsteht darüber hinaus gerade das Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse (CBP), das nach seiner Fertigstellung 2012 ein Bioraffinerie-Entwicklungszentrum sein wird, das eine Verbindung zwischen Forschung und Industrie herstellen und für ambitionierte Projekte den geeigneten Rahmen bieten soll. Das CBP Leuna wird durch den Bund (BMBF, BMELV, BMU), das Land Sachsen-Anhalt und die FhG finanziert.

Der Schwerpunkt der deutschen FuE-Aktivitäten zu integrativen Bioraffineriekonzepten liegt im Bereich der *Top-down* Entwicklungsansätze auf der Lignocellulose-Bioraffinerie (einschließlich der Grünen Bioraffinerie) und der Synthesegas-Bioraffinerie, die in mehreren Großprojekten untersucht werden. *Bottom-up* Entwicklungsansätze werden für Zucker/Stärke-Bioraffinerien und die Pflanzenöl-Bioraffinerie verfolgt, während hier die Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis bestehender Strukturen der Zellstoffindustrie in Deutschland (bspw. im Gegensatz zu den skandinavischen Ländern) bisher kaum eine Rolle spielt. Bei den *Bottom-up* Entwicklungsansätzen gibt es bisher nur in vergleichsweise wenigen Großprojekten Aktivitäten, da hier oft auf bereits bestehende Strukturen der Zucker-, Stärke- bzw. Pflanzenölindustrie aufgebaut wird. Hier dominieren daher Projekte zur Unterstützung und zu Teilaspekten von solchen Bioraffinerien bzw. zur konventionellen Konversion von Zucker, Stärke und Pflanzenölen zu biobasierten Produkten oder Bioenergie.

Die SWOT-Analyse der Entwicklung von Bioraffinerien in Deutschland hinsichtlich interner Stärken und Schwächen sowie mit Blick auf die externen internationalen Entwicklungen und die sich daraus ergebenden Chancen und Risiken sind in der nachfolgenden Tabelle 4 aggregiert. Die Analyse zeigt, dass Deutschland im europäischen und globalen

Rahmen gut aufgestellt ist und eine hervorragende Ausgangsposition hat. Jedoch dürfen keinesfalls die internationalen Entwicklungen übersehen werden.³⁴ Im Kontext der internationalen Entwicklungen gilt es, die Führungsrolle Deutschlands zu behaupten und ggf. auszubauen. Dabei kann auf eine sehr gute Basis zurückgegriffen werden.

Tabelle 4: Analyse der Entwicklung von Bioraffinerien in Deutschland

Stärken (Strengths)	Schwächen (Weaknesses)
<ul style="list-style-type: none"> → international wettbewerbsfähige Industrie und Energiewirtschaft → effektive Land- und Forstwirtschaft → hervorragende Infrastruktur und günstige geografische Lage → langjährige praktische Erfahrungen in der Konversion von Biomasse sowie den Aufbau und Betrieb von Anlagen zur Verarbeitung von Biomasse → führende Rolle bei der industriellen und energetischen Nutzung von Biomasse im europäischen und globalen Vergleich → starke natur-, ingenieur-, agrar- und forstwissenschaftliche Forschungslandschaft → starke deutsche Chemie- und Biotechnologieindustrie → leistungsfähiger Maschinen-, Apparate- und Anlagenbau → positive politische Rahmenbedingungen in Deutschland und Europa für biobasierte Produkte und erneuerbare Energien → positive öffentliche Meinung zu biobasierten Produkten und erneuerbaren Energien 	<ul style="list-style-type: none"> → Chancen des Rohstoffwandels und der Nutzung von Biomasse noch nicht in allen Teilen der Industrie ausreichend erkannt → weitere Verbesserung des nachhaltigen Biomasseanbaus und der nachhaltigen Biomassebereitstellung erforderlich → Grundlagenforschung und angewandte Forschung in Teilbereichen des Aufschlusses und der Konversion von Biomasse nicht ausreichend → Marktorientierung der öffentlichen Förderung von Biomassenutzungspfaden und Bioraffinerien nicht in allen anwendungsorientierten Förderprogrammen gegeben → wenige flexible und frei zugängliche Pilot- und Demoplanlagen → hohe Investmentkosten bei komplexen Anlagen → gesellschaftliche Akzeptanz nicht in allen Teilbereichen des Anbaus von Biomasse gegeben
Chancen (Opportunities)	Risiken (Threats)
<ul style="list-style-type: none"> → Wandel der industriellen Rohstoffbasis hin zu mehr Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz → Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie und Energiewirtschaft im Vergleich zu ausländischen Wettbewerbern → Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Land- und Forstwirtschaft sowie Verbesserung der Entwicklung des ländlichen Raumes in Deutschland im Vergleich zu ausländischen Wettbewerbern → Export von biobasierten Produkten und von Anlagen zur Verarbeitung und Konversion von Biomasse → Errichtung von Bioraffinerien im Ausland mit deutschem Know-how → Verbesserung der Agrarstruktur in Schwellen- und Entwicklungsländern eröffnet Marktchancen für deren inländische Verarbeitung und Veredelung von Biomasse sowie die Beteiligung am internationalen Biomassehandel 	<ul style="list-style-type: none"> → Wettbewerbsverzerrungen durch global unterschiedliche Nachhaltigkeitsstandards → begrenzte Verfügbarkeit von Biomasse → Verstärkung von Nutzungskonflikten möglich → starker internationaler Wettbewerb mit Industrie- und Schwellenländern

4 Technologische Beschreibung und Analyse

Die in Kapitel 3.5 genannten aussichtsreichen Bio-raffineriekonzepte werden nachfolgend hinsichtlich der vier Elemente „Plattform“, „Primärraffination“, „Sekundärraffination“, „Produkte“ allgemein erläutert und diskutiert. Darüber hinaus werden für alle dargestellten Bio-raffineriekonzepte eine oder mehrere konkrete Bio-raffinerie(n) beispielhaft im Detail ausgelegt und diskutiert. Im Einzelnen umfasst dies die in Tabelle 5 dargestellten Bio-raffineriekonzepte.

Tabelle 5: Bio-raffineriekonzepte, die in der Roadmap betrachtet werden

Gruppe	Bio-raffineriekonzept*
1	→ Zucker -Bio-raffinerie → Stärke -Bio-raffinerie
2	→ Pflanzenöl -Bio-raffinerie → Algenlipid -Bio-raffinerie
3	→ Lignocellulose (Cellulose/Hemicellulose/Lignin) ²¹ -Bio-raffinerie Typen: (a) Produktion fermentierbarer Kohlenhydrate (b) Zellstoffproduktion → Grüne (green fibre/green juice) ²² Bio-raffinerie
4	→ Synthesegas -Bio-raffinerie
5	→ Biogas -Bio-raffinerie

* Plattform(en) fett hervorgehoben

Bei der Auswahl wurden folgende Kriterien herangezogen:

- die Rohstoffbereitstellung für die Plattform ist nachhaltig möglich und sinnvoll
- eine Kopplung von Primär- und Sekundärraffination mit der Plattform als Nexus ist im Prognosehorizont technisch und wirtschaftlich realisierbar
- die Plattform bietet ausreichend technische und wirtschaftliche Möglichkeiten zur Herstellung von vermarktbareren stofflichen und energetischen Produkten
- das Bio-raffineriekonzept ist breit anwendbar und bietet auch Chancen für den Export von ressourceneffizienten Technologien für Bio-raffinerien sowie von biobasierten Produkten

Die nachfolgend ausgewählten Beispiele dienen der Veranschaulichung und Konkretisierung des jeweiligen allgemeinen Bio-raffineriekonzepts. Sie stellen aber nicht die beste, die optimale oder eine ausgereifte Lösung des jeweiligen Bio-raffineriekonzepts dar. Die Beispiele spiegeln den aktuellen Stand der Entwicklung wider, wobei in ausgewählten Fällen bereits ausreichend valide Daten für eine Detailauslegung und -evaluierung vorhanden sind.

Es gibt darüber hinaus bei allen aussichtsreichen Bio-raffineriekonzepten zahlreiche weitere Beispiele und Varianten. Ob ein konkretes Bio-raffineriekonzept technologisch, wirtschaftlich und ökologisch umsetzbar ist, muss im Einzelfall betrachtet werden. Insofern ist auch kein direkter Vergleich der nachfolgenden Beispiele möglich (siehe hierzu auch Kapitel 5).

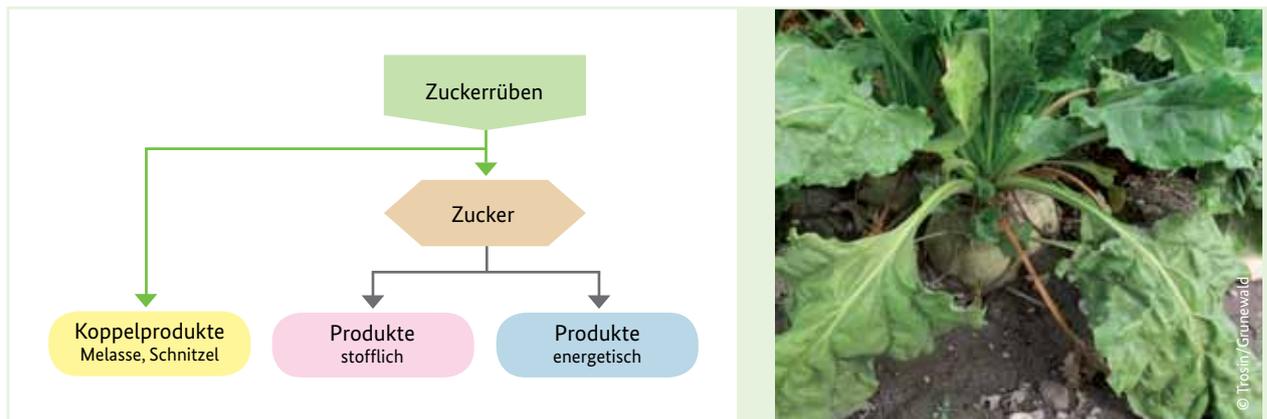
4.1 Zucker- und Stärke-Bio-raffinerie

Zucker-Bio-raffinerie

Plattform: Bei einer Zucker-Bio-raffinerie ergibt die Komponententrennung in der Primärraffination Saccharose³⁵, umgangssprachlich als Zucker bezeichnet. Saccharose bildet somit die Plattform der Zucker-Bio-raffinerie (Abbildung 10).

Rohstoffe: Als Rohstoffbasis für die Zuckergewinnung können verschiedenen Zuckerpflanzen dienen. Die beiden wichtigsten Zuckerpflanzen weltweit sind Zuckerrohr und Zuckerrüben. Zucker wird in Deutschland jedoch ausschließlich aus einheimischen Zuckerrüben gewonnen. Die Zuckerrübe bildet in der Vegetationsperiode von Frühjahr bis Ende September einen Wurzelkörper aus, der den Zucker speichert. Sie wird von September bis November gerodet. Die Anlieferung zur Zuckerfabrik erfolgt zum überwiegenden Teil per LKW. Hier werden die Rüben durch Abkippen oder mit Hilfe von Wasser entladen und sofort oder nach Zwischenlagerung verarbeitet.

Primärraffination: Die Primärraffination unterteilt sich in die Saftgewinnung, die Saftreinigung, die Saft Eindickung und die Kristallisation. Zur Saftgewinnung werden gewaschene Rüben in Schneidmaschinen zerkleinert. Die Schnitzel gelangen in eine Maische (Gefäß mit Rührwerk), in der sie auf ca. 70 °C erwärmt werden. Der Zucker wird dann in Extraktionstürmen gewonnen, in denen die Schnitzel im Gegenstromverfahren mit heißem Wasser entzuckert werden. Die

Abbildung 10: Prinzipschema einer Zucker-Bioraffinerie³⁶

extrahierten Schnitzel werden getrocknet und zur Viehfütterung verwendet. Der durch Extraktion gewonnene Rohsaft enthält neben Zucker aus den Rüben stammende Nichtzuckerstoffe. Zur Reinigung wird der Rohsaft mit Kalkmilch versetzt. Der überschüssige Kalk wird dann zusammen mit den pflanzlichen Nichtzuckerstoffen ausgefällt und als Düngekalk verwertet. Das Filtrat ist ein klarer, hellgelber, zuckerhaltiger Dünnsaft. In einer mehrstufigen Verdampfstation wird der Dünnsaft auf einen Trockensubstanzgehalt von 70–75 % eingedickt (Dicksaft). Die weitere Konzentrierung des Dicksaftes wird in dampfbeheizten Verdampfungskristallisatoren bis zur Kristallbildung fortgesetzt. In Zentrifugen erfolgt die Trennung des Sirups von den Zuckerkristallen. Der gewonnene Weißzucker wird getrocknet und nach Absiebung von Fein- und Grobanteilen in Großsilos gelagert. Der abgetrennte Sirup wird noch zwei weiteren Kristallisationsstufen (Rohzucker und Nachprodukt) unterzogen. Als Ablaufsirup der letzten Kristallisationsstufe fällt Melasse an.

Für die Weiterverarbeitung zu biobasierten Produkten und/oder zur Erzeugung von Bioenergie stehen Rohsaft, Dünnsaft oder Dicksaft sowie der hochreine Kristallzucker zur Verfügung. Die Verwertung der erwähnten Zwischenprodukte ist eng verknüpft mit Verfahrenskonzepten, mikrobiologischer Stabilität sowie Transporteigenschaften. Besonders geeignet als ganzjährig verfügbare Substrate sind Dicksaft sowie kristalliner Zucker.

Als Nebenprodukte fallen zuckerhaltige Melasse sowie die extrahierten Schnitzel an.

Sekundärraffination/Produkte: Zuckerdicksaft wird meist zu Kristallzucker weiterverarbeitet, kann aber auch als Fermentationsrohstoff (bspw. für Bioethanol, chemische Zwischenprodukte) eingesetzt werden.

Kristallzucker wird im Nahrungsmittelbereich als Haushaltszucker oder im gewerblichen Bereich ver-

wendet. Im chemisch-technischen Bereich dient er als Fermentationsrohstoff oder kann als Ausgangsstoff für chemische Zwischen- oder Fertigprodukte genutzt werden (bspw. Tenside).

Melasse wird meist als Fermentationsrohstoff (bspw. für Futterhefe, Bioethanol, Chemikalien) oder zur Herstellung von Futtermitteln eingesetzt. Melasse kann zur Gewinnung von Kristallzucker auch noch weiter entzuckert werden. Melasse enthält neben Zucker noch andere Inhaltsstoffe (organische Säuren, Betain, Vitamine, anorganische Salze), die gewonnen und weiterverarbeitet werden können.

Die chemischen Zwischenprodukte bzw. die Fermentationsprodukte (bspw. Aminosäuren, Milchsäure, Zitronensäure, Gluconsäure und die Ester und Salze dieser organischen Säuren) sind dann entweder wiederum chemische Zwischenprodukte oder werden zu Fertigprodukten weiterverarbeitet.

Die extrahierten Schnitzel werden getrocknet und dann meist pelletiert und melassiert. Melassierte Rübenschnitzel sind ein begehrtes Futtermittel.

Beispiel: Für die Zucker-Bioraffinerie wurde ein konkreter Bioraffineriepfad als Beispiel im Detail technologisch ausgelegt, welches in Abbildung 11 schematisch dargestellt ist.

Beispiel 1:

Das Konzept umfasst die Konfiguration einer Zucker-Bioraffinerie auf Basis von Zuckerrüben zur Herstellung von Ethanol, Kohlenstoffdioxid, Fuselölen, Glucose, Fructose und Gluconsäure, wobei als Koppelprodukte melassierte Zuckerrübenschnitzel und Vinasse anfallen.

Aus den geschnitzelten Zuckerrüben wird Zuckerrübendicksaft nach den bereits oben beschriebenen Verfahren gewonnen. Ein Teil des Dicksaftes wird

Beispiel 1

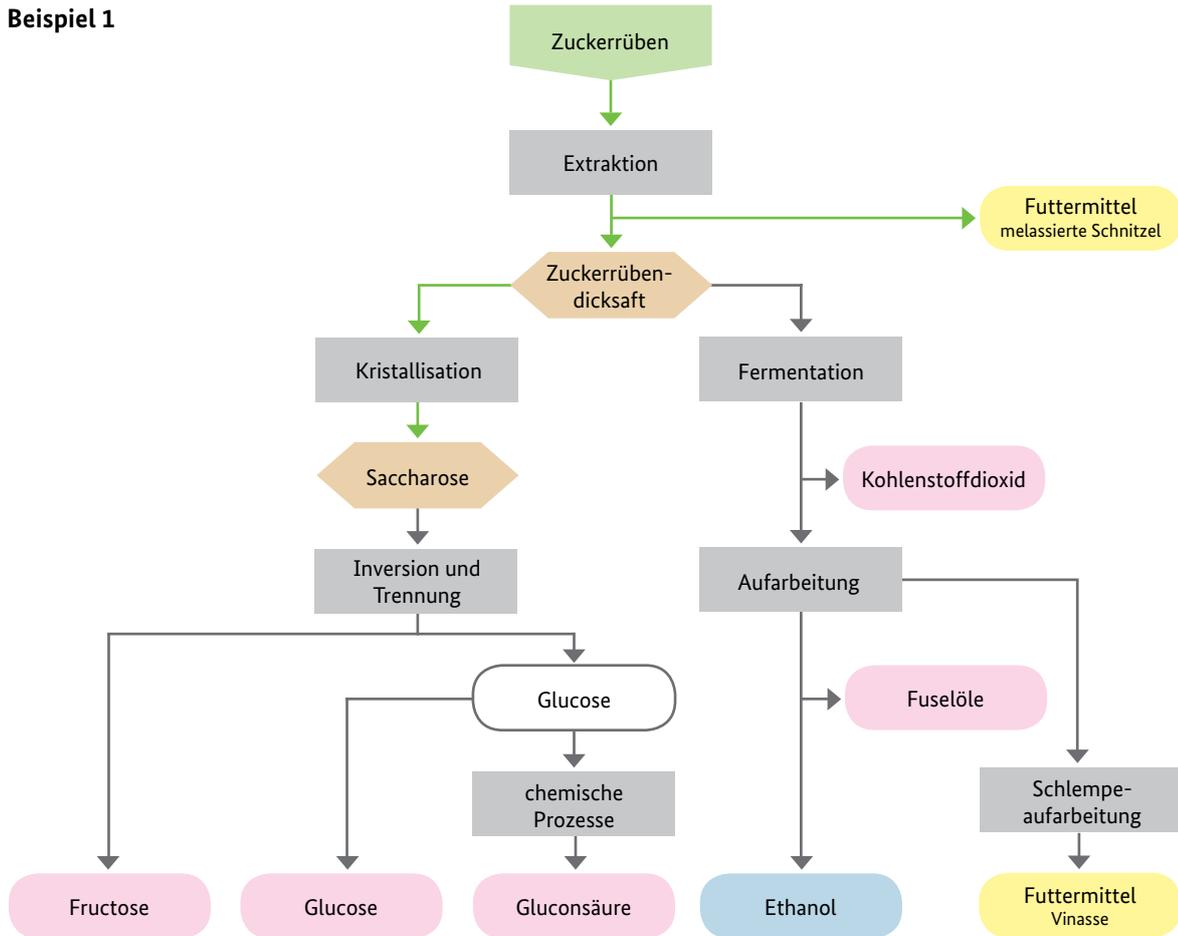


Abbildung 11: Beispiel für einen Zucker-Bioraffineriepfad

dann für die Saccharoseinversion abgetrennt, während die Hauptmenge als Fermentationsrohstoff für die Ethanolherstellung dient.

Die Saccharose im abgetrennten Dicksaft wird säurekatalytisch invertiert. Dabei entsteht durch Hydrolyse ein 1:1 Gemisch aus Glucose und Fructose. Die Trennung von Glucose und Fructose erfolgt mittels Chromatographie. Die gereinigte Glucoselösung wird in einem Rührreaktor vorgelegt, auf einen pH-Wert von 9 eingestellt und mit Sauerstoff beaufschlagt. In Gegenwart eines Gold-Katalysators findet bei 40 °C dann die selektive Oxidation zu Natrium-Gluconat statt. Um das reine Natrium-Gluconat zu erhalten, muss das Wasser abgetrennt werden. Optional kann das Natrium-Salz auch durch Ionenaustausch in die reine Gluconsäure überführt werden, wobei auch hier das Wasser anschließend abgetrennt werden muss.

Für die Ethanolfermentation wird mit Dicksaft eine geeignete Zuckerkonzentration im Fermenter eingestellt und Hefe zugegeben. Nach einigen Stunden ist

ein Teil des vergärbaren Substrats vergoren, welcher überwiegend zur Hefevermehrung dient. Wenn die Hefevermehrung nachlässt und schließlich aufhört, tritt die Maische unter starker CO_2 -Bildung in die Hauptgärung, die bei Temperaturen von 30 °C und darüber erreicht wird. Die Alkoholkonzentration in der vergorenen Maische beträgt 10–12 %. Die bei der Gärung entweichenden CO_2 -Gase werden aus dem Fermenter einer CO_2 -Waschkolonne zugeführt, ausgewaschen und danach verflüssigt.

An die Ethanolfermentation schließt sich eine Destillation an, wobei als Rückstand Schlempe anfällt. Die Schlempe wird eingedampft und es entsteht die proteinhaltige Vinsse, die als Futtermittel genutzt wird. Um die Nebenprodukte aus dem alkoholischen Destillat zu entfernen, wird eine Rektifikationskolonne nachgeschaltet. Um das Restwasser dem Alkohol zu entziehen, werden Molekularsieve verwendet. Das dehydratisierte Bioethanol hat dann eine Reinheit von 99,7 %. Die bei der Rektifikation abgetrennten Fuselöle werden als Grundstoffe für die chemische Industrie vermarktet.

Stärke-Bioraffinerie

Plattform: Bei einer Stärke-Bioraffinerie ergibt die Komponententrennung in der Primärraffination Stärke³⁷, die somit die Plattform der Stärke-Bioraffinerie bildet (Abbildung 12).

Rohstoffe: Als Rohstoffbasis für die Stärkegewinnung können verschiedene Pflanzen dienen. Die wichtigsten Stärkepflanzen weltweit sind Getreide (Mais, Weizen, Reis), Kartoffeln und Maniok. Für die Stärkeerzeugung werden in Deutschland im Wesentlichen Kartoffeln und Getreide (Weizen und Mais) genutzt. Mais und Weizen sind einjährige Kulturen und die Stärke ist im Getreidekorn enthalten. Kartoffeln sind Hackfrüchte und enthalten die Stärke in den Knollen.

Primärraffination: Erster Schritt der Verarbeitung der Getreidekörner sind das Einweichen und Quellen der Körner (ggf. nach vorangegangener Vermahlung), die Keimabtrennung, das Vermahlen und Sieben. Kartoffeln werden nach dem Reinigen eingemaischt. Die Weiterverarbeitung erfolgt dann ähnlich; die Stärke wird herausgelöst sowie die Fasern und das Protein abgetrennt. Die Stärkesuspension wird dann gereinigt und getrocknet, so dass man schließlich reine Stärke erhält. Die Gewinnung von Stärke kann sowohl aus einheimischen Getreide und Kartoffeln als auch aus importiertem Getreide erfolgen.

Für die Weiterverarbeitung zu biobasierten Produkten und/oder zur Erzeugung von Bioenergie stehen als Rohprodukte native Kartoffelstärke oder Weizenstärke bzw. Maisstärke zur Verfügung. Als Nebenprodukte fallen abgetrennte Proteine und Faserreste an.

Sekundärraffination/Produkte: Native Stärke wird im Lebensmittelbereich bzw. chemisch-technischen Bereich entweder direkt weiterverarbeitet oder wird zu Stärkemonifikaten und Stärkeverzuckerungs-

produkten umgesetzt. Die chemisch-technische Verwendung erfolgt bei der Herstellung von Papier und Pappe, durch Weiterverarbeitung zu chemischen Erzeugnissen (bspw. Klebstoffe) und bei der Herstellung von Fertigprodukten (bspw. Reifen).

Zur Herstellung von Stärkemonifikaten wird native Stärke chemisch oder physikalisch modifiziert. Die entstehenden Stärkemonifikate (bspw. Stärkeester, Stärkeether, Dextrine) und Stärkemischungen werden dann weiterverarbeitet zum Einsatz als Verdickungsmittel im Lebensmittelbereich, als Additiv in der Papierherstellung sowie als Zwischenprodukt in der kosmetischen Industrie.

Verzuckerungsprodukte der Stärke (bspw. Dextrose, Glucose) entstehen durch Abbau der polymeren Stärke zu niedermolekularen Produkten. Die Hydrolyse von Stärke liefert drei Produktgruppen, die sich im Grad der Hydrolyse³⁸ unterscheiden und als Ausgangsmaterial für die Herstellung weiterer Stärkezuckerderivate verwendet werden: Maltodextrine (Stärkehydrolysate mit einem DE-Gehalt von weniger als 20), Glucosesirup (Stärkehydrolysate mit einem DE-Gehalt von mehr als 20 und weniger als 80), Dextrosesirup (Stärkehydrolysate mit einem DE-Gehalt von mehr als 80). Diese drei Produktgruppen werden entweder direkt verwendet oder weiterverarbeitet. So wird Dextrosesirup beispielsweise zur Herstellung des Zuckeralkohols Sorbitol und zur Synthese von Tensiden (sogenannte Alkylpolyglycoside, kurz APG) verwendet. Glucose und Stärkehydrolysate können darüber hinaus als Fermentationsrohstoff verwendet werden. Die Fermentationsprodukte (bspw. Aminosäuren, Milchsäure, Zitronensäure, Glucosäure und die Ester und Salze dieser organischen Säuren) sind dann entweder wiederum chemische Zwischenprodukte oder werden zu Fertigprodukten weiterverarbeitet. Darüber hinaus ist auch die Weiterverarbeitung zu anderen chemischen Erzeugnissen denkbar.

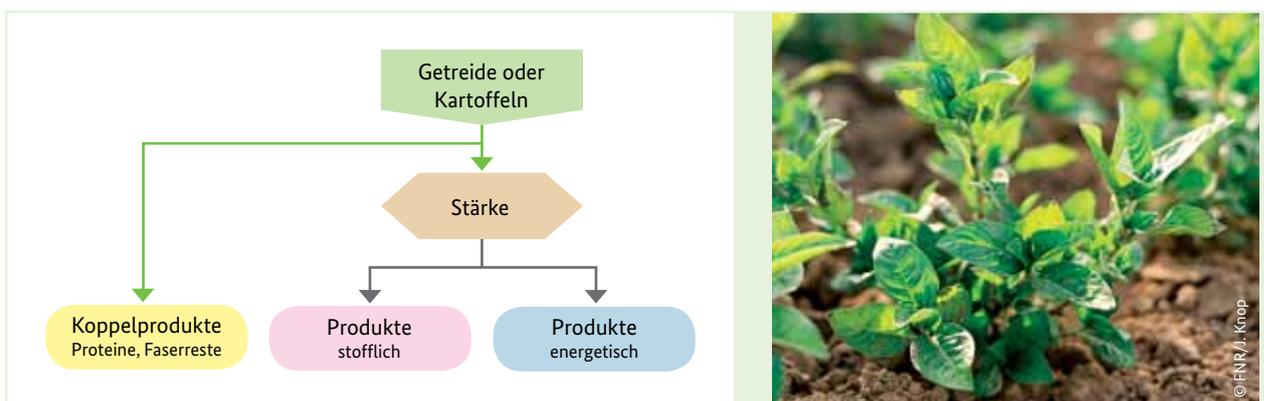


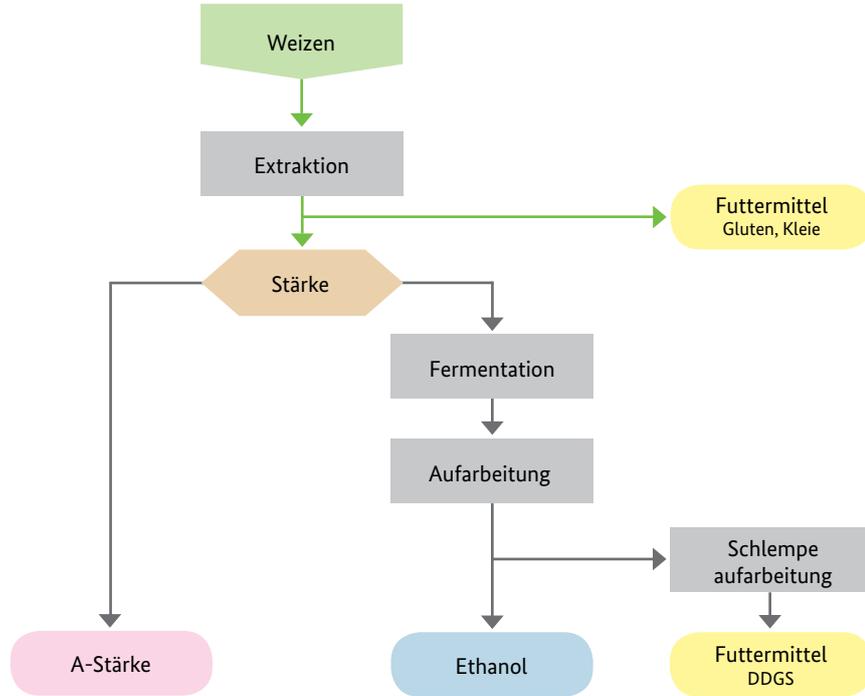
Abbildung 12: Prinzipschema einer Stärke-Bioraffinerie³⁶

Die abgetrennten Proteine können im Futtermittelbereich verwendet werden. Das Getreideprotein Gluten kann als Bindemittel und Klebstoff im Lebensmittelbereich und im chemisch-technischen Bereich Verwendung finden.

Die abgetrennten Faserreste werden üblicherweise für Futtermittel eingesetzt.

Beispiele: Für die Stärke-Bioraffinerie wurden zwei konkrete Bioraffineriepfade als Beispiel im Detail technologisch ausgelegt, die in Abbildung 13 schematisch dargestellt sind.

Beispiel 2



Beispiel 3

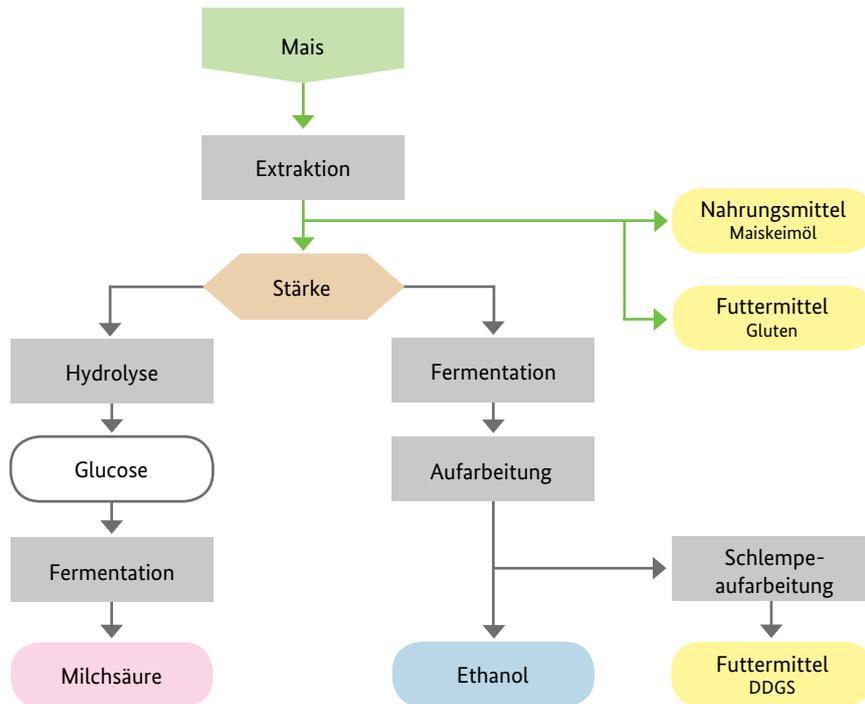


Abbildung 13: Beispiele für Stärke-Bioraffineriepfade

Beispiel 2:

Das Konzept umfasst die Konfiguration einer Stärke-Bioraffinerie auf Basis von Weizen zur Herstellung von A-Stärke, Bioethanol, wobei als Koppelprodukte Gluten, Weizenkleie und DDGS³⁹ anfallen.

Als Rohstoff wird Weizenmehl eingesetzt. Das Weizenmehl wird in kontinuierlichen Mischmaschinen durch Zugabe von warmem Wasser zu einer Suspension verarbeitet. Durch Eintrag mechanischer Energie werden die Inhaltsstoffe aus der Glutenmatrix herausgelöst und dann getrennt. Bei Verwendung des 3-Phasendekanters erfolgt die Trennung in eine schwere Phase, die vornehmlich A-Stärke und etwas Gluten enthält, eine leichte Fraktion, die die Pentosane und Schleimstoffe enthält, und eine mittlere Phase, in der sich B-Stärke, Fasern und ebenfalls Gluten befinden.⁴⁰ Das sich schnell verklumpende Gluten wird sowohl von der mittleren als auch von der schweren Phase abgetrennt. Das Gluten wird gewaschen und anschließend auf einen Trockensubstanzgehalt von ca. 40 % entwässert.

Die A-Stärke wird aus der schweren Phase abgetrennt und je nach Qualitätsanforderungen nochmals gesiebt, um kleine Faseranteile abzutrennen, anschließend mechanisch vorgetrocknet und dann im Heißluftstrom getrocknet.

Die verbleibende mittlere Phase wird mit der leichten Phase, die die Pentosane und Schleimstoffe enthält, vereinigt und der Fermentation zugeführt. Die so erhaltene Suspension der Stärkeraffination wird in der Sekundärraffination zu Ethanol weiterverarbeitet. Je nach Prozessführung werden bis zu 80 % der A-Stärke-Fraktion ebenfalls der Fermentation zugeführt. Die Stärkesuspension wird zuerst mit Verflüssigungsenzymen und dann mit Verzuckerungsenzymen versetzt. Die vorhandene Stärke wird dadurch in Glucose umwandelt. Das Produkt der Hydrolyse ist eine glucosehaltige Maische, die auch monomere Kohlenhydrate aus den Hemicellulosen und Pentosanen enthält. Die Maische wird für die Ethanolfermentation in einen Fermenter gepumpt und mit Hefe versetzt. Unter anaeroben Bedingungen setzt dann die starke Alkoholbildung ein. Die alkoholische Gärung verläuft analog wie bereits für die Zucker-Bioraffinerie beschrieben und umfasst die gleichen Verfahrensschritte. Man erhält somit auch nach Aufarbeitung dehydratisiertes Bioethanol mit einer Reinheit von 99,7 %.

Beispiel 3:

Das Konzept umfasst die Konfiguration einer Stärke-Bioraffinerie auf Basis von Mais zur Herstellung von

Ethanol und Milchsäure, wobei als Koppelprodukte Gluten, Maiskeimöl und DDGS⁴¹ anfallen.

Der gereinigte Mais wird mit Quellwasser angesetzt und 40–50 Stunden bei 50 °C gequollen. Die gequollenen Maiskörner werden mit Hilfe von Zahnscheibenmühlen vermahlen, um die Abtrennung der Maiskeimlinge zu ermöglichen. Die Abtrennung der spezifisch leichteren Keimlinge erfolgt in Hydrozyklonen. Die Keimlinge werden dann gewaschen und getrocknet, bevor sie zu Maiskeimöl weiterverarbeitet werden. Der verbliebene Mais wird fein gemahlen, um die Stärkekörner aus den Zellverbänden herauszulösen. Nachfolgend erfolgt dann die Abtrennung der Schalen und verbliebenen Zellteile. Aus der so erhaltenen Stärkerohmilch erfolgt dann noch die Glutenabtrennung in einer mehrstufigen Hydrozyklonanlage. Das Gluten wird gewaschen, entwässert und getrocknet.

Die Stärkemilch der Stärkeraffination wird in der Sekundärraffination fermentativ zu Ethanol bzw. Milchsäure weiterverarbeitet. Zur Erzeugung der fermentierbaren Kohlenhydrate wird die Stärkemilch unter Zugabe von Verflüssigungsenzymen erhitzt. Dabei kommt es zur Verflüssigung der Maische, welche anschließend mit technischen Verzuckerungsenzymen versetzt wird und dabei die vorhandene Stärke und die anderen Kohlenhydrate (Hemicellulosen und Pentosane) in monomere Kohlenhydrate umgewandelt werden.

Die Maische wird für die Ethanolfermentation in einen Fermenter gepumpt und mit Hefe versetzt. Unter anaeroben Bedingungen setzt dann die starke Alkoholbildung ein. Die alkoholische Gärung verläuft analog wie bereits für die Zucker-Bioraffinerie beschrieben und umfasst die gleichen Verfahrensschritte. Man erhält somit auch nach Aufarbeitung dehydratisiertes Bioethanol mit einer Reinheit von 99,7 %.

Die Maische wird für die homofermentative Milchsäurefermentation in einen Fermenter gepumpt und mit *Lactobacillus* sp. versetzt. Unter anaeroben Bedingungen setzt dann Milchsäurebildung ein. Mittels Calciumcarbonat wird der pH-Wert im schwach sauren Bereich gehalten. Die Zellbiomasse wird dann mittels Ultrafiltration von der Fermentationsbrühe getrennt. Milchsäure liegt als Calciumlactat in Lösung vor und wird durch Ansäuern mit Schwefelsäure freigesetzt, wobei Calciumsulfat anfällt, das abfiltriert wird. Die nach Aufarbeitung abgetrennte Milchsäure wird mit deionisiertem Wasser behandelt, entfärbt und konzentriert.

4.2 Pflanzenöl- und Algenlipid-Bioraffinerie

Pflanzenöl-Bioraffinerie

Plattform: Bei einer Pflanzenöl-Bioraffinerie ergibt die Komponententrennung in der Primärraffination Pflanzenöl⁴², das somit die Plattform der Pflanzenöl-Bioraffinerie bildet (Abbildung 14).

Rohstoffe: Ausgangsstoffe zur Herstellung von Pflanzenöl sind Ölsaaten und -früchte in denen das Öl zusammen mit anderen Lipiden vorliegt. Die wichtigsten Ölsaaten weltweit sind Rapssaat, Sojabohnen, Sonnenblumensaat, Baumwollsaamen sowie Erdnüsse. Die bedeutendsten globalen Ölfrüchte sind Ölpalmfrüchte und Ölpalmkerne, Kokosnüsse sowie Oliven. Raps ist die mit Abstand bedeutendste Ölpflanze in Deutschland. Auch Öllein und Sonnenblumen werden auf größeren Flächen angebaut. Die Rohstoffauswahl wird auch durch die angestrebten Produkte beeinflusst, weil nicht jedes Pflanzenöl für jede Anwendung geeignet ist. Für die spätere Verwendung ist insbesondere der Gehalt an kurzkettigen und langkettigen Fettsäuren von Bedeutung. Ölsaaten und -früchte, die als Quelle für kurzkettige Fettsäuren dienen, werden in Deutschland nicht angebaut.

Primärraffination: Die ölhaltigen Samen oder Früchte werden gereinigt und zerkleinert. Die Pflanzenöle werden dann durch Auspressen (kalt oder warm) bzw. durch Extrahieren (in seltenen Fällen auch durch Zentrifugieren) gewonnen. Die Gewinnung von Pflanzenölen, die als Quelle für kurzkettige Fettsäuren⁴³ dienen, erfolgt üblicherweise in den zumeist tropischen Herkunftsländern. Somit erfolgt die Primärraffination nicht in Deutschland.⁴⁴ Palmkerne könnten im Prinzip importiert werden. Die Gewinnung von Pflanzenölen, die als Quelle für langkettige Fettsäuren dienen, erfolgt

sowohl aus einheimischen Ölsaaten (Rapssaat, Sonnenblumenkerne, Leinsaat) als auch aus importierten Ölsaaten und -früchten (bspw. Sojabohnen).

Für die Weiterverarbeitung steht als Rohprodukt natives Pflanzenöl (Fette und fette Öle) zur Verfügung. Als Koppelprodukte fallen Extraktionsschrot oder Presskuchen an.

Sekundärraffination/Produkte: Das Pflanzenöl kann entweder im Nahrungsmittelbereich oder im technischen Bereich verwendet werden. Im technischen Bereich wird Pflanzenöl einerseits nativ oder nach Umesterung in Form von Biodiesel als Kraftstoff genutzt oder als natives Pflanzenöl zur Erzeugung von Strom- und Wärme, bspw. in Blockheizkraftwerken (BHKW), verwendet. Natives Pflanzenöl wird vor der Nutzung oder Weiterverarbeitung noch aufgereinigt. Andererseits ist Pflanzenöl ein wertvoller Rohstoff für die Oleochemie bzw. für die Bioschmierstoffherstellung. Hier kann Pflanzenöl direkt verwendet werden (bspw. als Lösungsmittel) oder durch Spaltung werden Fettsäuren und Glycerin gewonnen. Fettsäuren wiederum sind Ausgangsstoffe für eine ganze Palette an chemischen Erzeugnissen und finden sich nach Veredelung bspw. in Kosmetika, Tensiden, Lacken und Farben wieder. Glycerin hat ebenfalls vielfältige Anwendungen. Die Weiterverarbeitung ergibt Pharmaglycerin oder, über nachfolgende Konversionen und chemische Reaktionen, weitere chemische Zwischenprodukte und Erzeugnisse. Glycerin kann auch als Fermentationsrohstoff eingesetzt werden. Die Fermentationsprodukte sind entweder wiederum chemische Zwischenprodukte oder werden zu Fertigprodukten weiterverarbeitet.

Eine technische Nutzung oder Verbrennung der Koppelprodukte Extraktionsschrot oder Pressku-

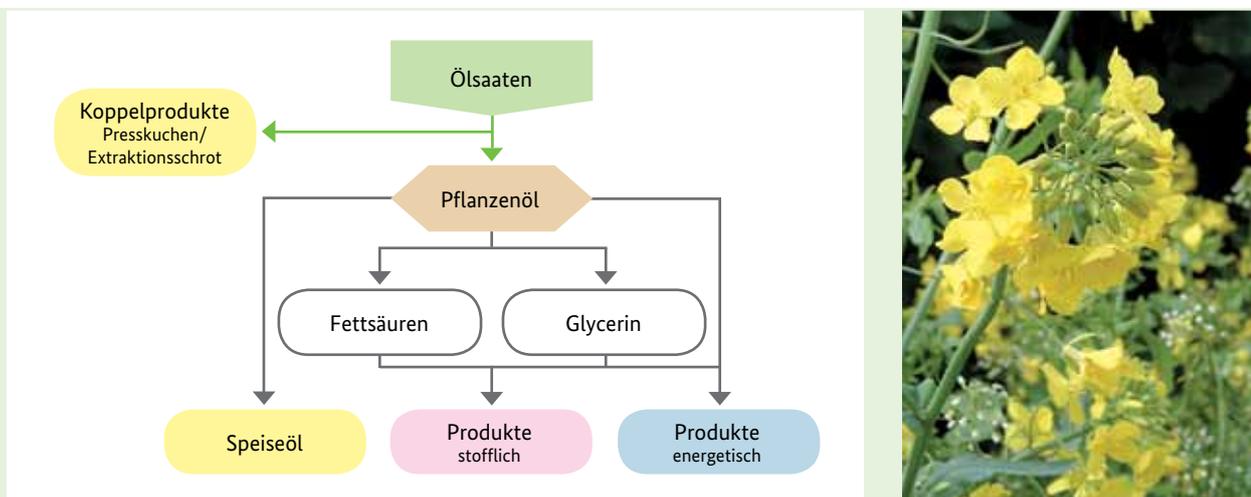


Abbildung 14: Prinzipschema einer Pflanzenöl-Bioraffinerie³⁶

chen wäre prinzipiell denkbar, aber die Futtermittelnutzung ist wertvoller und leistet über den Weg der Tierproduktion (insbesondere durch die Gülle-utzung) auch einen Beitrag zur Schließung des Nährstoffkreislaufes zum Acker.

Beispiele: Für die Pflanzenöl-Bioraffinerie wurden zwei konkrete Bioraffineriepfade als Beispiel im Detail technologisch ausgelegt, die in Abbildung 15 schematisch dargestellt sind.

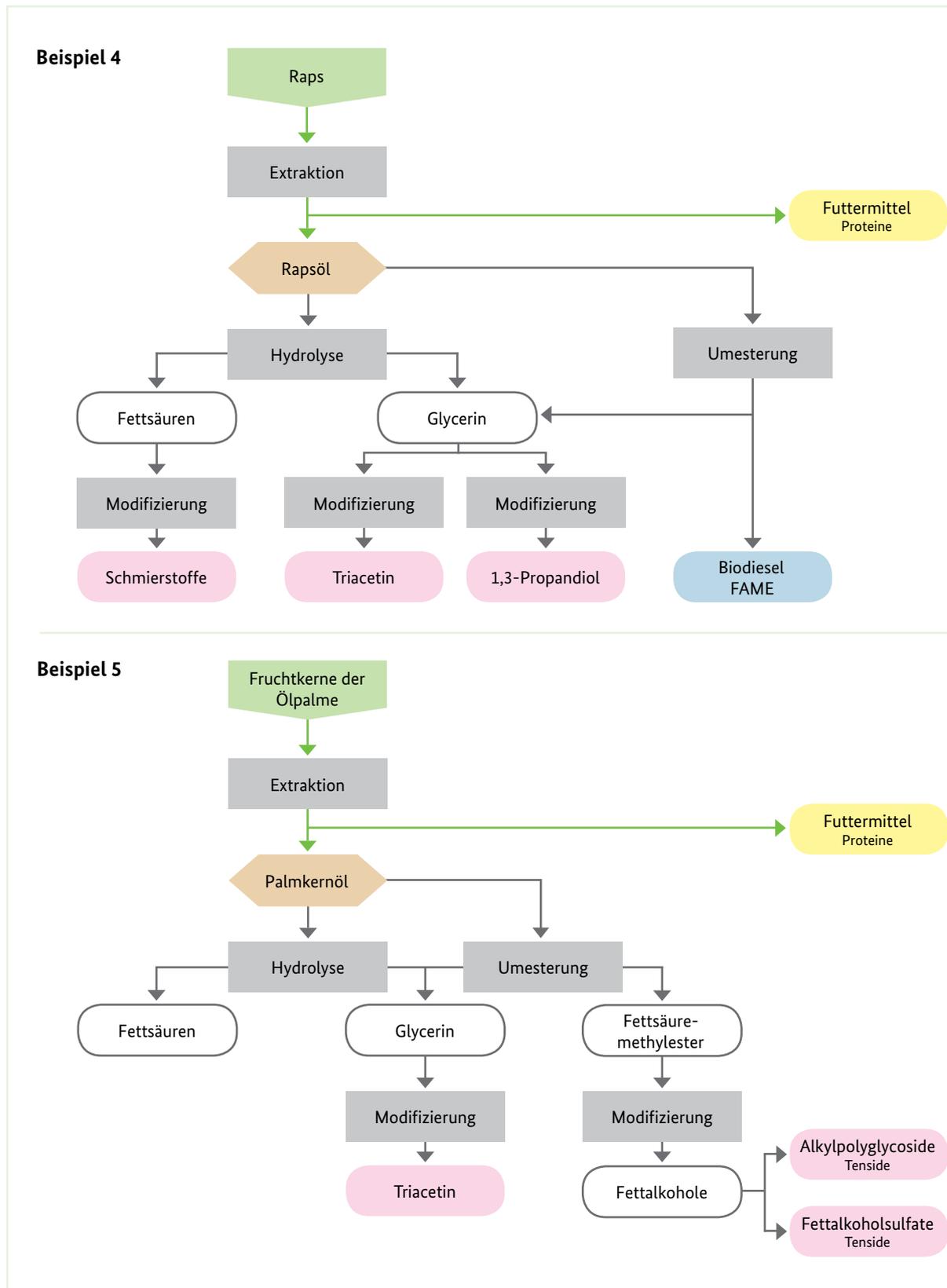


Abbildung 15: Beispiele für Pflanzenöl-Bioraffineriepfade

Beispiel 4:

Das Konzept umfasst die Konfiguration einer Pflanzenöl-Bioraffinerie mit Pflanzenölen mehrheitlich langkettiger und ungesättigter Fettsäuren auf Basis von Rapssaat zur Herstellung von Biodiesel, Schmierstoffen und Spezialchemikalien, wobei als Koppelprodukt Rapspresskuchen bzw. Rapsextraktionsschrot anfallen.

Aus der Rapssaat werden durch Pressung und Extraktion mit Hilfe eines Lösungsmittels rohes Rapsöl und Presskuchen bzw. Extraktionsschrot gewonnen. Presskuchen und Extraktionsschrot werden insbesondere wegen des hohen Proteingehaltes als Futtermittel eingesetzt. Die im rohen Rapsöl enthaltenen Begleitstoffe werden durch unterschiedliche physikalische und chemische Verfahren der sogenannten Ö raffination abgetrennt.

Aus dem raffinierten Rapsöl werden durch Hydrolyse in Spaltverfahren sogenannte Spaltfettsäuren und Glycerin hergestellt. Durch nachfolgende Destillation bzw. Fraktionierung erhält man aus dem Gemisch der Spaltfettsäuren eine Vielfalt von mehrheitlich ungesättigten und langkettigen Fettsäuren mit eng begrenzter Spezifikation, die als Basisrohstoffe zur Weiterveredelung eingesetzt werden. Durch Veresterung der Fettsäuren mit speziellen Alkoholen werden Syntheseester hergestellt, die die Basiskomponente für Schmierstoffe bilden.

Das raffinierte Rapsöl wird auch zur Herstellung von Biodiesel eingesetzt. Bei diesem Verfahren der katalytischen Umesterung wird Rapsöl mit Methanol zu Fettsäuremethylestern und Glycerin umgesetzt.

Glycerin aus der hydrolytischen Fettspaltung oder der Biodieselherstellung wird als Rohstoff für die Herstellung von Spezialchemikalien eingesetzt. In einem biotechnologischen Verfahren wird mit Hilfe von immobilisierten Mikroorganismen 1,3-Propan-diol synthetisiert, das bspw. für die Herstellung von Polyester eingesetzt wird. Durch eine katalytische Umsetzung von Glycerin mit Essigsäure und Essigsäureanhydrid wird Triacetin hergestellt, das bspw. als Weichmacher für Kunststoffe dient.

Beispiel 5:

Das Konzept umfasst die Konfiguration einer Pflanzenöl-Bioraffinerie mit Pflanzenölen mehrheitlich kurzkettiger und gesättigter Fettsäuren auf Basis von Palmkernen zur Herstellung von Fettsäuren, Tensiden und Spezialchemikalien.

Aus den Palmkernen werden durch Extraktion mit Hilfe eines Lösungsmittels rohes Palmkernöl und Extraktionsschrot gewonnen. Das Extraktionsschrot wird als Futtermittel eingesetzt. Die im rohen Palmkernöl enthaltenen Begleitstoffe werden durch unterschiedliche physikalische und chemische Verfahren abgetrennt.

Aus dem raffinierten Palmkernöl werden durch Hydrolyse in Spaltverfahren sogenannte Spaltfettsäuren und Glycerin hergestellt. Durch nachfolgende Destillation bzw. Fraktionierung erhält man aus dem Gemisch der Spaltfettsäuren eine Vielfalt von mehrheitlich gesättigten und kurzkettigen Fettsäuren mit eng begrenzter Spezifikation, die als Basisrohstoffe zur Weiterveredelung bspw. durch Veresterung mit speziellen Alkoholen zu Syntheseestern als Basiskomponente für Schmierstoffe eingesetzt werden.

Durch katalytische Umesterung von Palmkernöl mit Methanol werden Fettsäuremethylester hergestellt. Die Fettsäuremethylester werden nach Fraktionierung entsprechend der Länge der Kohlenstoffketten der Fettsäuren in Festbettreaktoren mit Wasserstoff zu Fettalkoholen hydriert. Die Fettalkohole sind Ausgangsstoffe zur Herstellung von Tensiden, für die insbesondere kurzkettige und gesättigte Fettsäuren erforderlich sind. Durch Umsetzung von Fettalkoholen bspw. mit Schwefelsäure werden Fettalkoholsulfate hergestellt, die auch zur Herstellung von Waschmitteln in der Textilindustrie und Dispergier- und Emulgiermitteln in der Kosmetik eingesetzt werden. Durch säurekatalysierte Umsetzung von Fettalkoholen mit Glucose oder Stärkehydrolysaten werden Alkylpolyglycoside hergestellt, die zur Produktion von Waschmitteln, Geschirrspülmitteln und Reinigungsmitteln eingesetzt werden.

Algenlipid-Bioraffinerie

Plattform: Bei einer Algenlipid-Bioraffinerie ergibt die Komponententrennung in der Primärraffination Algenlipide und Algenrestbiomasse, die somit die Plattform der Algenlipid-Bioraffinerie bilden (Abbildung 16).

Rohstoffe: Ausgangsstoffe zur Herstellung von Algenlipiden sind Mikroalgen. Mikroalgen sind ein- und wenigzellige Lebewesen, die zwar Photosynthese betreiben, jedoch nicht zu den eigentlichen Pflanzen gehören. Man findet sie im Salz- und Süßwasser. Von vielen Mikroalgen ist bekannt, dass bei Wachstumsstopp durch z. B. Stickstoffmangel und bei gleichzeitig ausreichendem CO₂- und Lichtangebot Lipide in Form von Öltröpfchen in den Zellen angereichert werden.

Primärraffination: Die feuchte, ölhaltige Algenbiomasse wird durch Separierung von Wasser und Algenbiomasse über Zentrifugation, Flockulierung oder Filtration auf 15–20 % Biotrockenmassegehalt aufkonzentriert. Je nach verwendetem Stamm und Extraktionsmethode muss die Algenbiomasse aufgeschlossen werden, bspw. mittels Hochdruckhomogenisator oder Rührwerkskugelmühle. Für die direkte Unterstützung der Extraktion werden ggf. Mikrowellen oder Ultraschall angewendet. Anschließend muss die aufgeschlossene, feuchte Algenbiomasse zunächst getrocknet werden. Durch Trocknung der Algenbiomasse, üblicherweise durch Sprühtrocknung, wird die Biomasse lagerfähig. Derzeit wird Algenöl aus zuvor getrockneter und aufgeschlossener Algenbiomasse mit verschiedenen Lösemitteln extrahiert, wobei mit Hexan die besten Ergebnisse erzielt werden. Der Einsatz von überkritischen Fluiden für die Extraktion hat den Vorteil, dass sowohl das Rohprodukt Algenöl, als auch die Restbiomasse keine für die Weiterverarbeitung störenden Lösemittelreste enthält. Das Lösemittel wird abgetrennt und dem Prozess wieder zugeführt.

Für die Weiterverarbeitung stehen als Rohprodukt Algenlipide (Algenöl) und die weitgehend ölfreie Algenrestbiomasse zur Verfügung.

Sekundärraffination/Produkte: Das Algenrohöl enthält neben Triglyceriden und polaren Membranlipiden weitere lipophile Algeninhaltsstoffe wie Carotinoide, Chlorophyll und Phytosterine, die in der Sekundärraffination selektiv extrahiert und modifiziert werden können. Die Triglyceride können entweder im Nahrungsmittelbereich oder im technischen Bereich verwendet werden. Im technischen Bereich können die Triglyceride einerseits nach

Umesterung in Form von Biodiesel als Kraftstoff genutzt bzw. als natives Pflanzenöl zur Erzeugung von Strom und Wärme, bspw. in BHKW, verwendet werden. Andererseits sind Triglyceride ein potenzieller Rohstoff für die Chemie. Im chemisch-technischen Bereich können Triglyceride direkt verwendet oder durch Spaltung Fettsäuren und Glycerin gewonnen werden. Fettsäuren wiederum sind Ausgangsstoffe für eine ganze Palette an chemischen Erzeugnissen und finden sich nach Veredelung bspw. in Kosmetika, Lacken, Farben und Tensiden wieder. Glycerin hat ebenfalls vielfältige Anwendungen. Die Weiterverarbeitung ergibt Pharmaglycerin, oder über nachfolgende Konversionen und chemische Reaktionen werden weitere chemische Zwischenprodukte und Erzeugnisse hergestellt. Glycerin kann auch als Fermentationsrohstoff eingesetzt werden. Die Fermentationsprodukte sind entweder wiederum chemische Zwischenprodukte oder werden zu Fertigprodukten weiterverarbeitet.

Aus der entölten Algenbiomasse kann nach Trocknung proteinreiches Futtermittel hergestellt oder die Algenrestbiomasse als Cosubstrat durch anaerobe Vergärung zu Biogas umgesetzt werden.

Beispiel: Die Nutzung von Mikroalgen als Rohstoff in Bioraffinerien erscheint im Vergleich mit der Nutzung traditioneller Anbaubiomasse vielversprechend, weil deren Photosyntheseleistung einen wesentlich höheren Wirkungsgrad erzielen kann. Unter optimalen Wachstumsbedingungen können Mikroalgen bis zu 5 % der Sonnenenergie in chemische Energie umwandeln, Landpflanzen hingegen nur 0,5–1 %. Nachteilig ist, dass die Produktion von Mikroalgen nur in Breitengraden mit langer täglicher und über alle Monate kontinuierlicher Son-

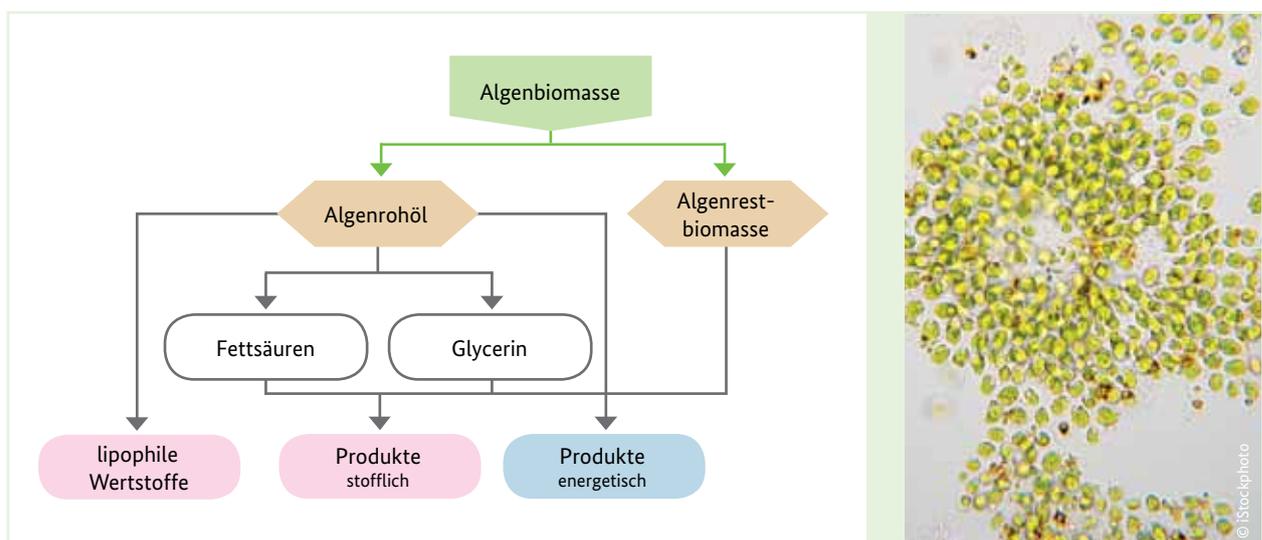


Abbildung 16: Prinzipschema einer Algenlipid-Bioraffinerie³⁶

neneinstrahlung und geeigneten Tages- und Nachttemperaturen ganzjährig effektiv und kostengünstig angebaut werden können.

Für die Algenlipid-Bioraffinerie können derzeit keine konkreten Bioraffineriepfade im Detail technologisch ausgelegt werden, weil belastbare Daten und Kennzahlen noch nicht ausreichend vorliegen. Im Wesentlichen haben sich jedoch drei aussichtsreiche Optionen ergeben.

- Die integrierte Gewinnung von hochpreisigen Chemikalien, wie bspw. Polysaccharide, Lipide und lipophile Wertstoffe. Hinzu kann die Produktion von Biodiesel aus dem Hauptteil der Lipidfraktion kommen. Die Restbiomasse (im Sinne industrieller biogener Reststoffe, siehe Kapitel 3.3.2) wird energetisch verwertet z. B. in einer Biogasanlage. Dieses Konzept lässt sich wirtschaftlich darstellen, allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Anlagenkapazität am Marktvolumen der hochpreisigen Wertstoffe auszureichen ist, das um Größenordnungen kleiner als das der Kraftstoffe ist.
- Die Ausrichtung auf die Abwasserbehandlung. Die anfallende Biomasse kann wiederum zur Herstellung von Chemikalien und Energieträgern eingesetzt werden. Vorteilhaft ist, dass der Aufwand für die Herstellung der Nährstoffe beziehungsweise deren Kreislaufführung entfällt und insbesondere dass der hohe wirtschaftliche und energetische Aufwand der derzeitigen Abwasserbehandlungssysteme der Algenproduktion gutgeschrieben werden kann. Die niedrigen Nährstoffkonzentrationen in bestehenden Kläranlagen limitieren allerdings die Algenproduktivität. Allerdings ist das Spektrum an kommerzialisierbaren Wertstoffen durch entsprechende Richtlinien wegen des Einsatzes von Abwasser eingeschränkt. Außerdem sind Fragen im Zusammenhang mit einer ganzjährigen Anlagenverfügbarkeit und alternativen, besser abtrennbaren Organismen (z. B. Wasserlinsen) zu klären.
- Die Produktion von Energieträgern, die über eine hohe Flüchtigkeit verfügen. Hier kommt beispielsweise Ethanol in Frage. Vorteilhaft ist bei diesem Konzept, dass hier keine energieaufwendige Ernte der Biomasse nötig ist, sondern die Energieträger kontinuierlich produziert werden und die Thermodynamik die Stofftrennung favorisiert. Allerdings sind hier geschlossene Systeme zum Auffangen des Produkts erforderlich.

Für viele Teilprozesse einer Algenlipid-Bioraffinerie sind nur Labor- und Technikumsdaten verfügbar, auf deren Basis derzeit noch keine wirtschaftlich tragbare technologische Auslegung seriös machbar ist. Daher werden hier nachfolgend nur allgemeine Aussagen getroffen und eine mögliche Algenlipid-Bioraffinerie schematisch-exemplarisch in Abbildung 17 skizziert. Dabei wird auf Grundlage der vorliegenden wissenschaftlich-technischen Daten und Studien ein möglicher, zukünftiger Algenlipid-Bioraffineriepfad für die integrierte Gewinnung von hochpreisigen Chemikalien beschrieben.

Beispiel 6:

Das Konzept orientiert sich auf die Gewinnung von Fettsäuren und Glycerin aus den Algenlipiden und von lipophilen Wertstoffen. Die entölte Algenrestbiomasse wird energetisch in einer Biogasanlage verwertet. Als Koppelprodukt fällt Gärrest an.

Der Lipidgehalt in Mikroalgen steigt von 10–15 % (w/w) in wachsenden Kulturen auf 60–70 % (w/w) in wachstumslimitierten Kulturen an. Die Geschwindigkeit der Lipidbildung hängt maßgeblich von der Lichtversorgung der Algenzellen ab. In wachsenden Kulturen liegen die Lipide vor allem als polare Membranlipide unterschiedlicher Lipidklassen vor. Nach Wachstumslimitierung werden Triglyceride als Speicherlipide produziert. Während die Membranlipide einen hohen Anteil mehrfach ungesättigter C16- und C18-Fettsäuren enthalten, enthalten die Speicherlipide stammspezifisch einen hohen Anteil gesättigter C16- und mono-ungesättigter C18-Fettsäuren.

Weltweit werden öltreiche Algen jedoch bisher nur im Pilotmaßstab (<< 1 ha), in offenen Teichen oder geschlossenen Photobioreaktoren produziert. Die Produktion lipidreicher Algenbiomasse (> 30 % Fett säuregehalt) ist in Deutschland aufgrund des hohen Lichtbedarfes und kurzer Produktionszeiten voraussichtlich nur in den Sommermonaten möglich. Deshalb kommen auch nur geschlossene Photobioreaktoren in Frage. In Monaten mit geringer Lichtintensität wird der Energieaufwand für die Produktion höher als der Energieinhalt der produzierten Biomasse und die Fettsäurezusammensetzung verschiebt sich aufgrund des niedrigeren Triacylglyceridgehaltes in Richtung mehrfach-ungesättigter Fettsäuren.

Die Aufarbeitung der Algenbiomasse aus dem Photobioreaktor ist technisch möglich, aber hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und besonders des Energieverbrauchs noch zu optimieren. Darüber hinaus sind die

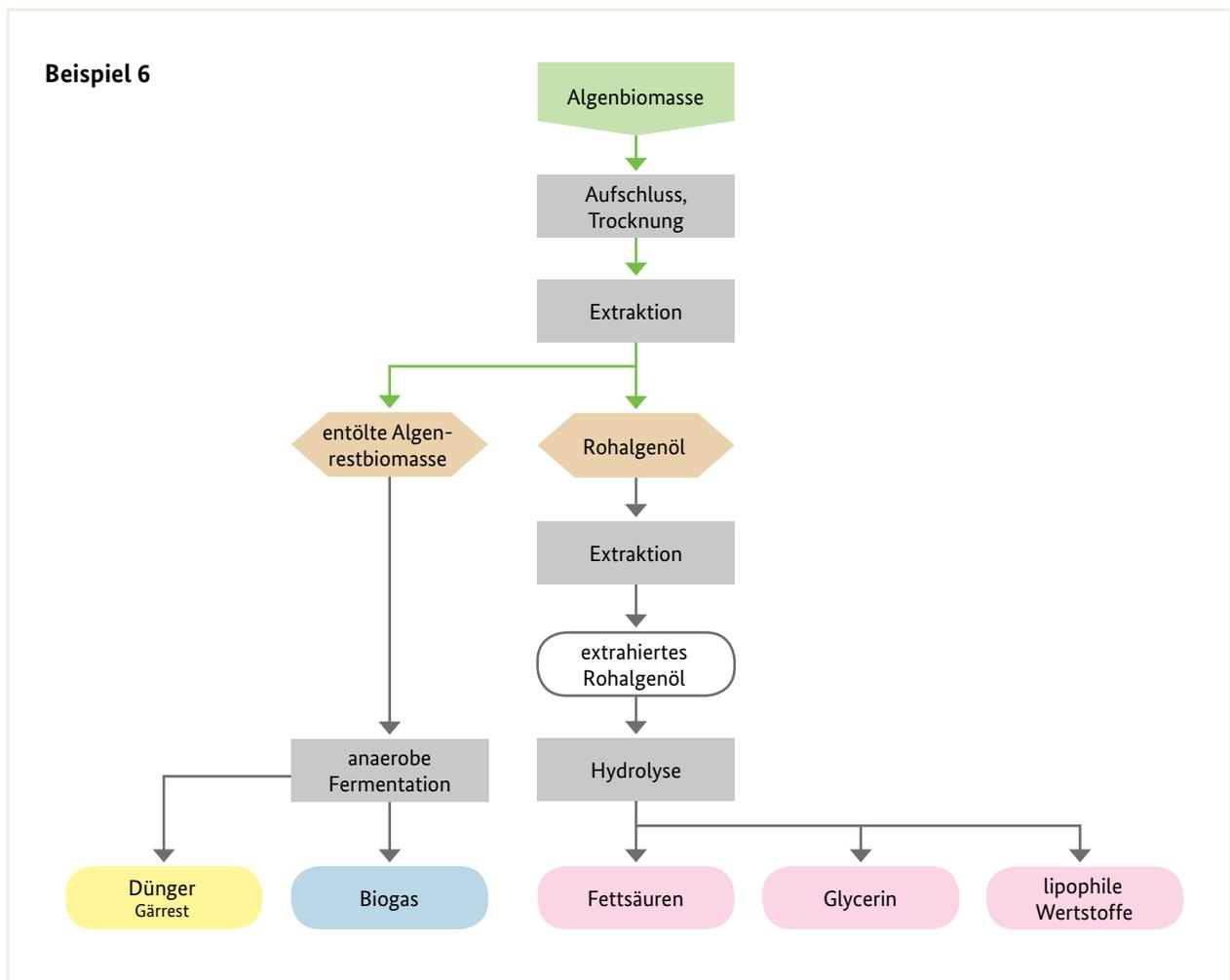


Abbildung 17: Beispiel für einen Algenlipid-Bioraffineriepfad (schematisch-exemplarisch)

Trennverfahren zur Separation von lipophilen Wertstoffen aus dem Algenrohöl bei weitem noch nicht ausgereift. Bisher sind keine Verfahren beschrieben, um aus Algenöl selektiv Carotinoide und Chlorophyll abzutrennen. Bisher angewendete Verfahren zur Carotinoidextraktion nutzen die Algenbiomasse unmittelbar und das erhaltene Carotinoid-Ölgemisch wird ohne Trennung direkt verwendet. Omega-3-Fettsäuren, die ausschließlich in polaren Membranlipiden einiger Algen enthalten sind, können nach Abspaltung und Umesterung zu Ethylestern mit überkritischem Kohlenstoffdioxid chromatographisch getrennt und aufgereinigt werden.

Lipophile Wertstoffe, die als Produkte neben den Triglyceriden aus Algenöl gewonnen werden können, sind Carotinoide (wie β -Carotin, Lutein, Fucoxanthin) als Pigmente und Antioxidantien, Chlorophyll und Omega-3-Fettsäuren (wie Eicosa-pentaensäure für die Lebensmittelindustrie).

4.3 Lignocellulose-Bioraffinerie und Grüne Bioraffinerie

Lignocellulose-Bioraffinerie

Plattform: Bei einer Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis trockener Biomasse ergibt die Komponententrennung in der Primärraffination die lignocellulosischen Komponenten Cellulose, Hemicellulosen und Lignin⁴⁵, die somit die Plattform der Lignocellulose-Bioraffinerie²¹ bilden (Abbildung 18).

Rohstoffe: Lignocellulosische Biomasse als Rohstoff kann aus einer Vielzahl von Quellen stammen, wie agrarische Reststoffe (z. B. Stroh, Bagasse, Maiskolben), Energiepflanzen (bspw. ein- und mehrjährige Gräser), Holz und biogene Abfälle (z. B. Papierabfälle). Für Deutschland sind aus Gründen der qualitativen und quantitativen Verfügbarkeit derzeit vor allem agrarische Reststoffe (Getreide- und Maisstroh) und Holz (Waldholz, Kurzumtriebsholz) von Bedeutung; zukünftig können jedoch auch ein- und mehrjährige Gräser eine Rolle spielen.

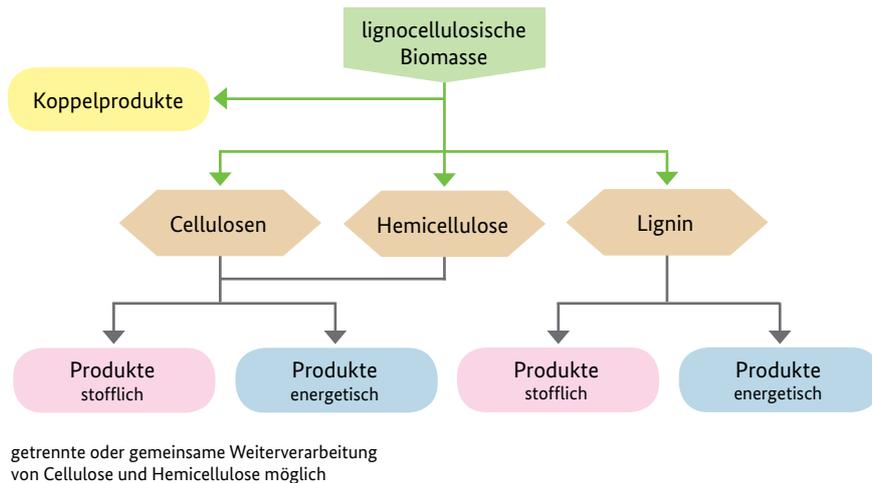


Abbildung 18: Prinzipschema einer Lignocellulose-Bioraffinerie³⁶

Primärraffination: Die Vorbehandlung der relativ widerstandsfähigen lignocellulösen Biomasse ist unumgänglich, und besteht zunächst aus einem mechanischen Prozessschritt (Zerkleinern oder Mahlen). Der Aufschluss erfolgt durch Druck und Temperatur mit oder ohne chemische Agenzien. Alternativ kann auch ein Aufschluss mit konzentrierter Säure erfolgen. Das Lignin kann entweder bei der Vorbehandlung extraktiv oder anschließend von der verbliebenen Lösung als unlöslicher Bestandteil abgetrennt werden.

Für die Weiterverarbeitung stehen als Rohprodukte Cellulose, Hemicellulosen und Lignin zur Verfügung und je nach Aufschlussart auch Mischungen der Rohprodukte.

Sekundärraffination/Produkte: Grundsätzlich gibt es zwei Wege der Sekundärraffination: (a) die direkte Herstellung von fermentierbaren Kohlenhydraten für weitere biotechnologische Umsetzungen und (b) die weitere isolierte Verarbeitung der einzelnen Fraktionen sowie Kombinationen von beiden Nutzungswegen.

(a) Bei der Herstellung von fermentierbaren Kohlenhydraten werden meistens die Cellulose- und Hemicellulose-Fraktion genutzt. Die enzymatische Umsetzung zu den entsprechenden monomeren Kohlenhydraten (bspw. Glucose, Xylose) ergibt einen Stoffstrom von fermentierbaren Zuckern und einen Stoffstrom für Lignin. Die fermentierbaren Zucker können direkt in die biotechnologische Produktion gehen, wie die Produktion von Ethanol und weiteren höherkettigen Alkoholen, Biopolymeren, organischen Säuren, Aminosäuren oder anderen biotechnologischen Produkten.

(b) Bei der isolierten Verarbeitung werden die Fraktionen Cellulose, Hemicellulose und Lignin getrennt weiterverarbeitet. Die beim Aufschluss anfallende Cellulose kann je nach Ziel des Aufschlusses zu Papier- oder Chemiezellstoff verarbeitet werden oder wird nach enzymatischer Hydrolyse zu Glucose als Fermentations- oder Chemierohstoff weiterverarbeitet. Die abgetrennte Hemicellulosefraktion enthält mehr oder weniger abgebaute Kohlenhydrate und diverse monomere C6- und C5-Kohlenhydrate. Hieraus können monomere Kohlenhydrate (bspw. Xylose) abgetrennt werden und dann beispielsweise durch Fermentation oder chemische Verfahren weiter veredelt werden. Die abgetrennte Hemicellulosefraktion enthält durch den Abbau der ursprünglichen Hemicellulosen auch verschiedene andere Wertstoffe (bspw. Essigsäure, Furfural), die gewonnen werden können und im chemisch-technischen Bereich weiterverarbeitet werden.

Lignin aus den Aufschlusswegen (a) oder (b) kann zwar prinzipiell als Einsatzstoff direkt genutzt werden, aber aktuelle Anwendungen sind bislang beschränkt und meistens von geringer Wertschöpfung. Für eine höhere Wertschöpfung des Lignins gibt es zwei Optionen. Einerseits erfolgt die Nutzung von Lignin als Werkstoff, bei der die Veredelung des Lignins durch polymer- und werkstoff-orientierte Technologien erfolgt. Andererseits bietet Lignin mit seiner aromatischen Struktur die Möglichkeit zum (selektiven) Abbau zu monomeren und dimeren Aromaten (bspw. Phenolen). Eine alternative Möglichkeit ist die Nutzung des Lignins bzw. der Lignin/Hemicellulosen-Lösung zur Energieerzeugung. Dies kann entweder durch Verbrennung erfolgen oder durch Vergasung.

Beispiel: Für die Lignocellulose-Bioraffinerie wurden zwei konkrete Bioraffineriepfade als Beispiel im

Detail technologisch ausgelegt, die in Abbildung 19 schematisch dargestellt sind.

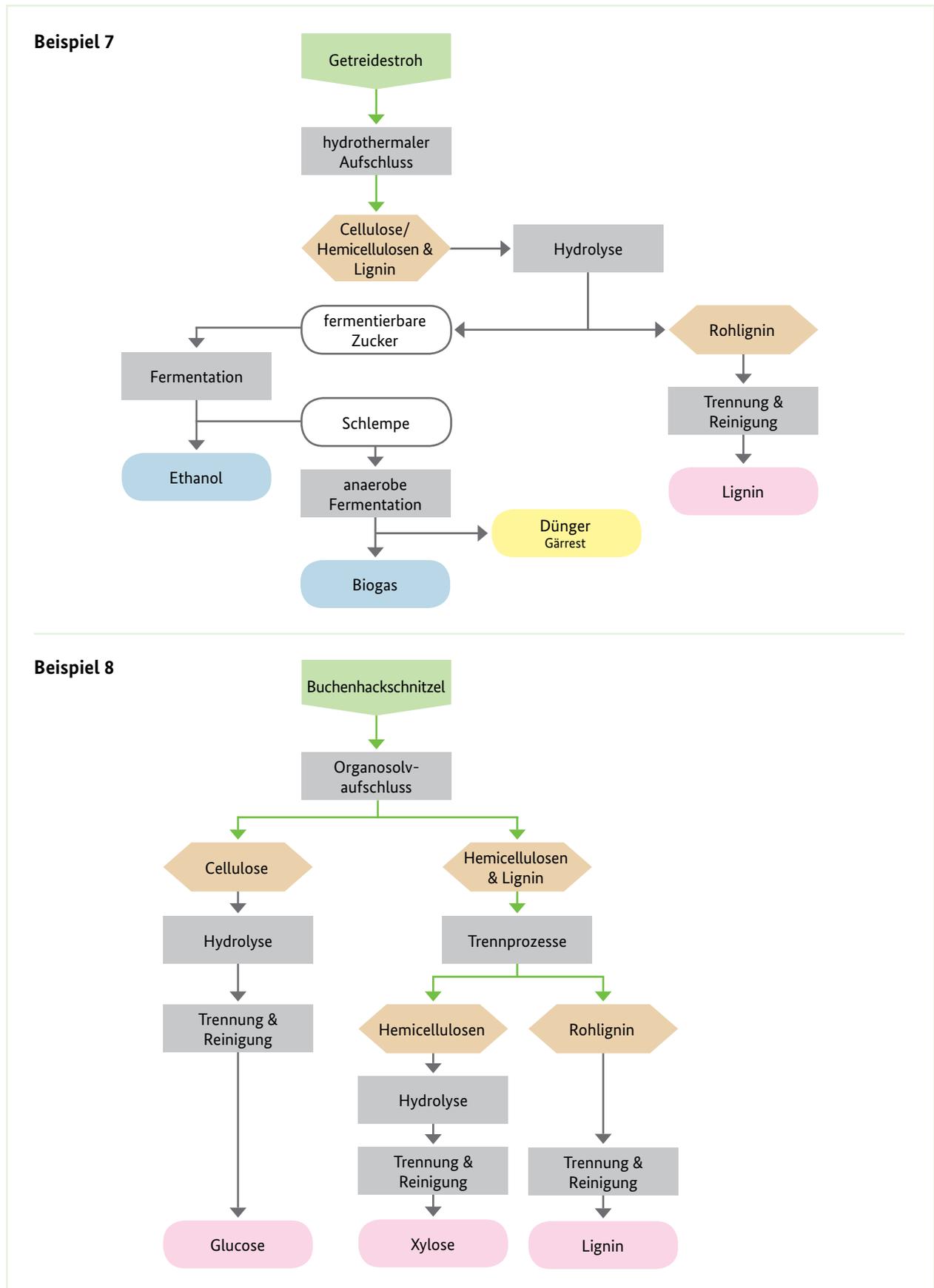


Abbildung 19: Beispiele für Lignocellulose-Bioraffineriepfade

Beispiel 7:

Das Konzept umfasst die Konfiguration einer Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis von Agrarreststoffen (Getreidestroh) zur Herstellung von Ethanol, Biogas und Lignin.

Hierzu wird das Getreidestroh hydrothermal vorbehandelt, um den Rohstoff für die anschließende, enzymatische Hydrolyse vorzubereiten. In der Hydrolysestufe werden mittels Enzymsystemen die Polymere Cellulose und Hemicellulose in monomere, fermentierbare Kohlenhydrate überführt. Die für die Hydrolyse verwendeten, speziell auf den jeweiligen Rohstoff abgestimmten Enzymsysteme werden bei diesem Konzept prozessintegriert in der Bioraffinerie hergestellt. Nach Abtrennung der festen Lignin-Phase werden die gelösten Hexosen und Pentosen⁴⁶ simultan durch Fermentation in Ethanol mit Hefe umgewandelt. Unter anaeroben Bedingungen setzt dann die starke Alkoholbildung ein. Die alkoholische Gärung verläuft analog wie bereits für die Zucker-Bioraffinerie beschrieben und umfasst die gleichen Verfahrensschritte. Die Abtrennung und Aufreinigung des Ethanols erfolgt mittels einer neu entwickelten Adsorptionstechnologie. Die weitere Aufreinigung erfolgt durch eine nachgeschaltete Rektifikation. Am Ende liegt das azeotrope Ethanol/Wasser-Gemisch (96 %) vor. Um das Restwasser dem Alkohol zu entziehen, werden Molekularsiebe verwendet. Das dehydratisierte Bioethanol hat dann eine Reinheit von 99,7 %. Die zurückbleibende Schlempe der Ethanolfermentation wird in Biogas umgewandelt.

Das Biogas kann gemeinsam mit dem abgetrennten Lignin für die Gewinnung von Energie verwendet werden. Diese prozessintegrierte, energetische Nutzung reicht aus, die komplette Prozessenergie bereitzustellen. Alternativ ist eine Einspeisung von Biogas bzw. eine stoffliche Ligninnutzung möglich.

Beispiel 8:

Das Konzept umfasst die Konfiguration einer Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis Waldholz zur Herstellung von Glucose, Xylose und Lignin mittels Ethanol/Wasser-Aufschluss und enzymatischer Hydrolyse. Waldholz in Form von Buchenholzhackenschnitzeln wird mit Ethanol/Wasser unter Druck und Temperatur aufgeschlossen. Anschließend wird die flüssige Phase abgetrennt, die als Hauptkomponenten das Lignin und die (abgebauten) Hemicellulosen umfasst. Die zurückbleibende feste Phase enthält als Hauptkomponente die Cellulose in Form der Faserfraktion des Holzes.

Nach Reinigung der Faserfraktion erfolgt die enzymatische, zweistufige Hydrolyse der Cellulose. Die aufbereitete Glucose-Lösung wird entweder direkt einer Fermentation zur weiteren Veredelung in der Bioraffinerie zugeführt oder als Produkt vermarktet.

Die Gewinnung des Lignins erfolgt durch Fällung aus der flüssigen Phase des Holzaufschlusses. Nach einer Wäsche erhält man reines schwefelfreies Lignin. Das saubere Lignin kann nun in der Bioraffinerie weiterverarbeitet oder vermarktet werden.

Die zurückbleibende Lösung der Ligninfällung enthält die abgebauten Bestandteile der Hemicellulosen in Form von monomeren Kohlenhydraten (insbesondere Xylose). Nach Aufkonzentration und Reinigung gewinnt man daraus eine 5 %-ige Xylose-Lösung, die zur Weiterverarbeitung in der Bioraffinerie zur Verfügung steht.

Grüne Bioraffinerie

Plattform: Bei einer Grünen Bioraffinerie ergibt die Komponententrennung in der Primäraffination Presssaft und cellulosische Fasern, die somit die Plattform der Grünen Bioraffinerie²² bilden (Abbildung 20).

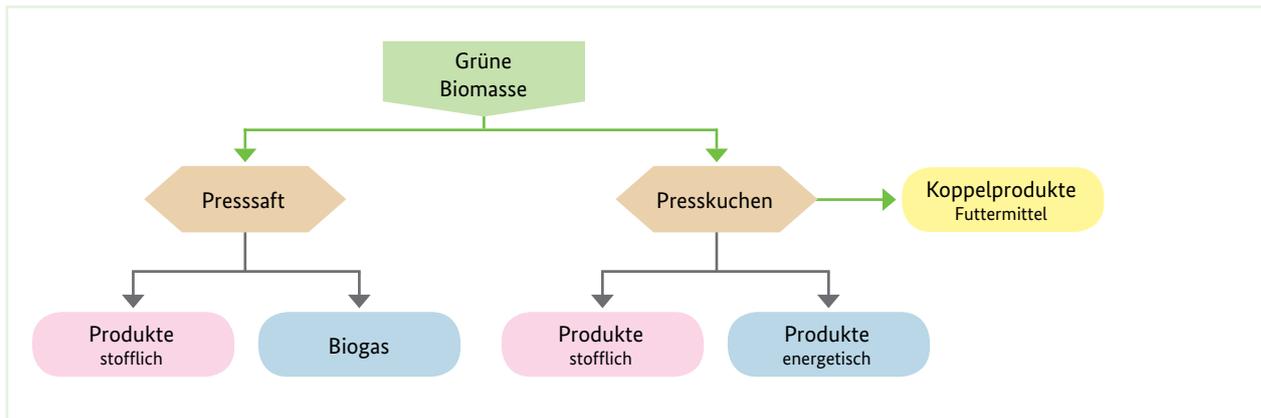
Rohstoffe: In einer grünen Bioraffinerie werden feuchte Biomassen in grüner oder siliierter Form, wie bspw. ein- oder mehrjährige Gräser und Getreide, als Rohstoff verwendet.

Primäraffination: Die grüne oder silierte Biomasse wird gereinigt und zerkleinert. Anschließend werden die flüssigen Bestandteile durch Pressung abgetrennt. Alle löslichen Bestandteile verbleiben im Grassaft. Der verbleibende feste Grasfaserpresskuchen wird von Anhaftungen befreit.

Für die Weiterverarbeitung stehen als Rohprodukte Grassaft und Grasfaser zur Verfügung.

Sekundäraffination/Produkte: Eine Grüne Bioraffinerie wird üblicherweise mit einer Biogasanlage gekoppelt, weil immer ein Teil der einen oder beider Fraktionen (Grassaft bzw. Grasfaser) dort aus verfahrenstechnischen Gründen als Cosubstrat verwendet wird. Darüber hinaus sind aus wirtschaftlichen Gründen die Wasser-/Wärmeströme der Grasverarbeitungsanlagen und der Biogasanlage gekoppelt.

Der Grassaft geht entweder direkt in die Biogasanlage oder es werden seine Inhaltsstoffe (bspw. Milchsäure, Essigsäure, Proteine, Aminosäuren) abgetrennt. Denkbar ist auch der Einsatz des Grassafts (mit oder

Abbildung 20: Prinzipschema einer Grünen Bioraffinerie³⁶

ohne Abtrennung von Inhaltsstoffen) als Rohstoff oder zur Supplementierung bei Fermentationen.

Die Grasfaser kann direkt zu Futtermitteln verarbeitet werden oder als Rohmaterial für faserbasierte Produkte dienen. Solche faserbasierten Produkte sind bspw. Dämmstoffe, Cellulosefasern, faserverstärkte Kunststoffe. Die Grasfaserfraktion kann

nach Aufschluss und hydrolytischem Abbau/Verzuckerung auch als Fermentationsrohstoff interessant sein. Die Fermentationsprodukte auf Basis des Hydrolysates sind dann entweder weitere chemische Zwischenprodukte oder werden zu Fertigprodukten weiterverarbeitet. Reststoffe aus der Grasfaserverarbeitung sind dann wiederum als Cosubstrat für die Biogasanlage verwertbar.

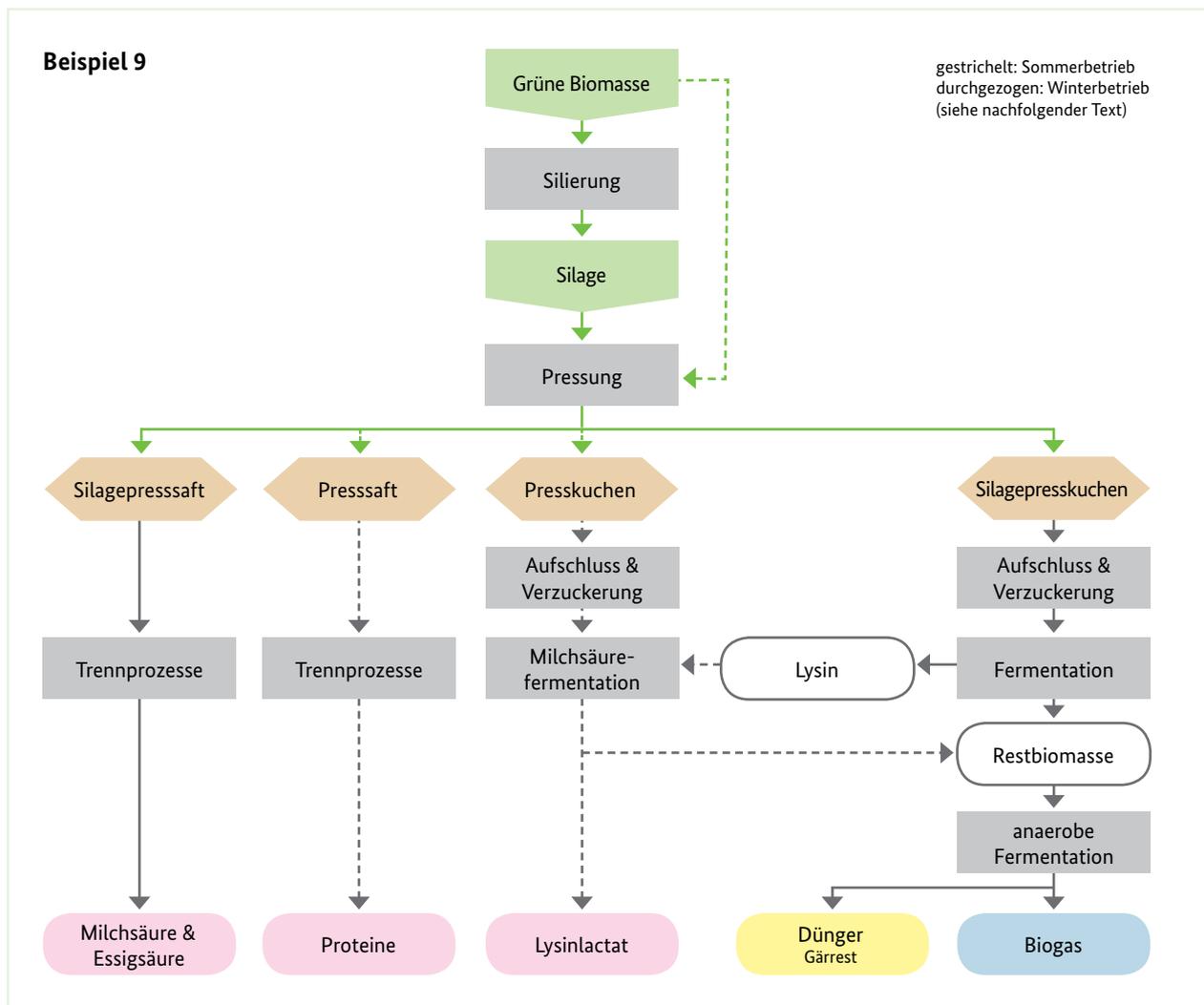


Abbildung 21: Beispiel für einen Grünen Bioraffineriepfad

Beispiel: Für die Grüne Bioraffinerie wurde ein konkreter Bioraffineriepfad als Beispiel im Detail technologisch ausgelegt, das in Abbildung 21 schematisch dargestellt ist.

Beispiel 9:

Das Konzept umfasst die Konfiguration einer Grünen Bioraffinerie auf Basis von Gras zur Herstellung von Lysinlactat, Proteinen, Milchsäure, Essigsäure und Biogas. Als Koppelprodukt fällt Gärrest an. Das Konzept umfasst eine Betriebsweise mit Winter- und Sommerbetrieb.

Im Winterbetrieb wird Grasschnitt siliert, wobei Silage entsteht. Im ersten Schritt der Verarbeitung wird Silage in einer Schneckenpresse aufgeschlossen und abgepresst. Es entstehen Silagepresssaft (green juice) und Silagepresskuchen (green fiber). Aus dem Silagepresssaft werden Milchsäure und Essigsäure chromatographisch abgetrennt. Die weiteren Saftbestandteile werden dem Medium der Lysinfermentation zugefügt. Der Silagepresskuchen wird einer enzymatischen Hydrolyse unterzogen, um die enthaltenen Kohlenhydrate zu monomerisieren (Verzuckerung), und wird dann zusammen mit der Restsaftphase zu einem vollständigen Fermentationsmedium zur Lysinproduktion zusammengeführt. Lysin wird für den Sommerbetrieb eingelagert.

Im Sommerbetrieb wird frisches Gras in einer Schneckenpresse aufgeschlossen und abgepresst. Der abgepresste Saft wird fraktioniert erwärmt und die weißen Proteine von den grünen Proteinen mittels Membranen abgetrennt. Als Restphase entsteht hierbei ein wässriges Medium (brown juice), das dem Medium der Milchsäurefermentation zugefügt wird. Der Presskuchen wird einem AFEX⁴⁷-Aufschluss und einer enzymatischen Hydrolyse unterzogen, um die enthaltenen Kohlenhydrate zu monomerisieren (Verzuckerung) und wird dann zusammen mit der Restsaftphase zu einem vollständigen Fermenta-

tionsmedium zur Produktion von Milchsäure zusammengeführt. Deren Neutralisation mit Lysin (aus dem Winterbetrieb) ergibt Lysinlactat.

Die Restbiomasse aus der Fermentation wird ganzjährig, ggf. zusammen mit Cosubstraten, zu Biogas verarbeitet. Der als Koppelprodukt anfallende Gärrest wird als Dünger verwendet.

4.4 Synthesegas-Bioraffinerie

Plattform: Bei einer Synthesegas-Bioraffinerie erfolgt keine separate Komponententrennung in der Primäraffination, sondern sämtliche organischen Bestandteile und Komponenten der Biomasse werden abgebaut, so dass als Rohprodukt Synthesegas⁴⁸ entsteht (Abbildung 22). Der Vorteil liegt in einer Flexibilität für die Herstellung von Produkten, die entweder Treibstoffe wie Fischer-Tropsch-Diesel, Methanol oder höhere Alkohole oder Chemikalien und selbst Kunststoffe sein können.

Rohstoffe: Als Rohstoffquellen wurden weltweit zahlreiche lignocellulose Biomassen in Betracht gezogen: trockene agrarische Reststoffe (bspw. Stroh, Bagasse, Schalen und Hülsen, Maiskolben), Energiepflanzen (ein- und mehrjährige Gräser), Holz und holzartige Biomasse, trockene biogene Rest- und Abfallstoffe (bspw. Papierabfälle, Lignin). Für Deutschland sind aus Gründen der qualitativen und quantitativen Verfügbarkeit vor allem agrarische Reststoffe (Getreidestroh) und Holz (Waldholz, Kurzumtriebsholz) von Bedeutung.

Primäraffination: Erster Schritt der Primäraffination ist die Biomassevorbereitung und -trocknung. Anschließend erfolgt eine je nach Verfahrenvariante verschieden stark vollendete thermische Spaltung der Biomasse bei hohen Temperaturen, ggf. auch unter Druck. Lange Molekülketten werden durch den Wärmeeinfluss gespalten. Es entstehen zahl-

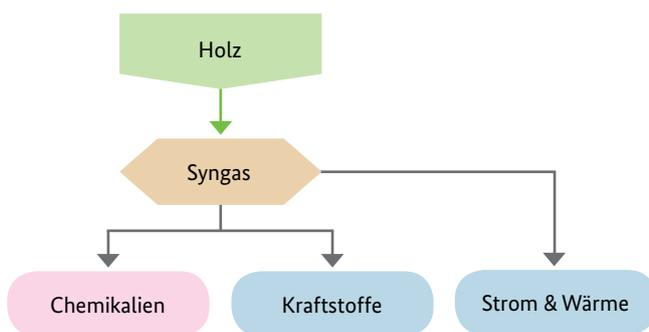


Abbildung 22: Prinzipschema einer Synthesegas-Bioraffinerie³⁶

reiche unterschiedliche flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe mit kürzerer Kettenlänge sowie mit fortschreitendem Verlauf auch vermehrt Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoff, Wasser und Wasserstoff. Die Zusammensetzung des Gasgemisches und die Beschaffenheit der Pyrolyseprodukte lässt sich durch die Prozessbedingungen Temperatur, Druck und Verweilzeit im Reaktor sowie auch durch zugeführte chemische Agenzien und Katalysatoren beeinflussen. Je nach angewendetem Verfahren sind Variationen und Zwischenschritte möglich. So wird teilweise erst ein Pyrolyse-Slurry erzeugt und dieser dann thermisch vergast oder es erfolgt eine vorgelagerte Torrifizierung. Auch für die Vergasung sind verschiedene Technologien bekannt. Als letzter Schritt ist eine Nachbehandlung bzw. Reinigung des Synthesegases notwendig.

Für die Weiterverarbeitung steht als Rohprodukt Syntheserohgas zur Verfügung.

Sekundärrefination/Produkte: Die Gaszusammensetzung des Syntheserohgases hängt von diversen Verfahrensparametern ab und bestimmt auch die nachfolgende Verwendung. In jedem Fall ist für nachfolgende Synthesen eine mehr oder weniger aufwendige und komplexe Gasaufbereitung und Gasreinigung erforderlich, die an die Art der nachfolgenden Konversion angepasst sein muss. Der nachfolgende Schritt ist der Syntheseschritt, bei dem Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff aus dem Synthesegas durch chemische Prozesse weiterverarbeitet werden, entweder direkt zu chemischen Zwischenprodukten (bspw. Methanol oder Dimethylether (DME)) oder zu Kraftstoffen (bspw. sog. Biomass-to-Liquid-Kraftstoffe) oder zu biobasiertem Wasserstoff oder zu chemischen Produkten. Es ist auch eine direkte energetische Nutzung über einen stationären Motor (zu Erzeugung von Strom und Wärme) oder als Motorenkraftstoff im mobilen Einsatz möglich.

Die zurückbleibende Asche und andere feste Bestandteile werden in der Bilanz nicht als zurückgewonnene Nebenprodukte berücksichtigt. Die Nutzung von land- und forstwirtschaftlich interessanten Nährstoffen aus den zurückbleibenden Reststoffen einschließlich der möglichen Aufbereitung und Rückführung wird noch Gegenstand zukünftiger Verfahrensentwicklung für Separation und Aufreinigungsschritte sein.

Beispiel: Für die Synthesegas-Bioraffinerie wurden drei konkrete Bioraffineriepfade als Beispiel im Detail technologisch ausgelegt, die in Abbildung 23 schematisch dargestellt sind.

Beispiel 10:

Das Konzept umfasst die Konfiguration einer Synthesegas-Bioraffinerie auf Basis von Holz zur Herstellung von Methanol mittels Schnellpyrolyse und Flugstromvergasung.

Als Einsatzstoff für die Syntheseroute werden Buchenholzschnitzel verwendet, die in den jeweiligen Schneckenreaktor zweier Pyrolyseanlagen eingebracht werden. Bei Temperaturen von ca. 500 °C wird die Biomasse durch Schnellpyrolyse zu Pyrolysedämpfen und Koks umgewandelt. Durch darauffolgende Kondensation der Pyrolysedämpfe zu Pyrolyseöl und Hinzumischen des Kokes wird eine fließfähige und energiereiche Suspension, der sog. Bioslurry, hergestellt. Dieser wird in den Flugstromvergaser bei über 1.200 °C und bis zu 80 bar, zusammen mit Sauerstoff, eingedüst. Das Rohsynthesegas wird anschließend gekühlt und in einer Gaswäsche gereinigt sowie einer CO-Shift-Umwandlung aufbereitet. Mit der abschließenden Methanolsynthese wird nach Aufarbeitung/Aufreinigung reines Methanol hergestellt, das dann chemisch-technisch als Chemikalie oder Kraftstoff direkt bzw. weiterverarbeitet werden kann.

Beispiel 11:

Das Konzept umfasst die Konfiguration einer Synthesegas-Bioraffinerie auf Basis von Agrarreststoffen (Stroh, ggf. Bagasse) zur Herstellung von Methanol mittels Biomasseröstung (Torrifizierung) und Flugstromvergasung.

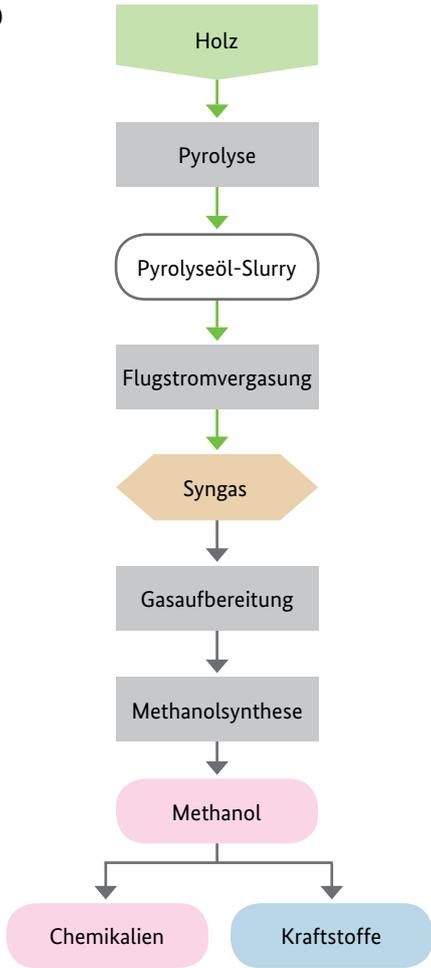
Als Einsatzstoff für die Syntheseroute dient Stroh, das in zwei Röstapparate eingebracht wird, die bei 200 °C bis 300 °C und einer Verweilzeit von 10–30 Minuten geröstete Biomasse erzeugen. Durch eine Dichtstromförderung und ein Schleusensystem wird die geröstete, feinkörnige Biomasse in den Flugstromvergaser eingespeist. Das erzeugte Rohsynthesegas wird durch eine Gaswäsche gereinigt und CO-Shift-Umwandlung aufbereitet. Mit der abschließenden Methanolsynthese wird nach Aufarbeitung/Aufreinigung reines Methanol hergestellt, das dann chemisch-technisch als Chemikalie oder Kraftstoff direkt bzw. weiterverarbeitet werden kann.

Beispiel 12:

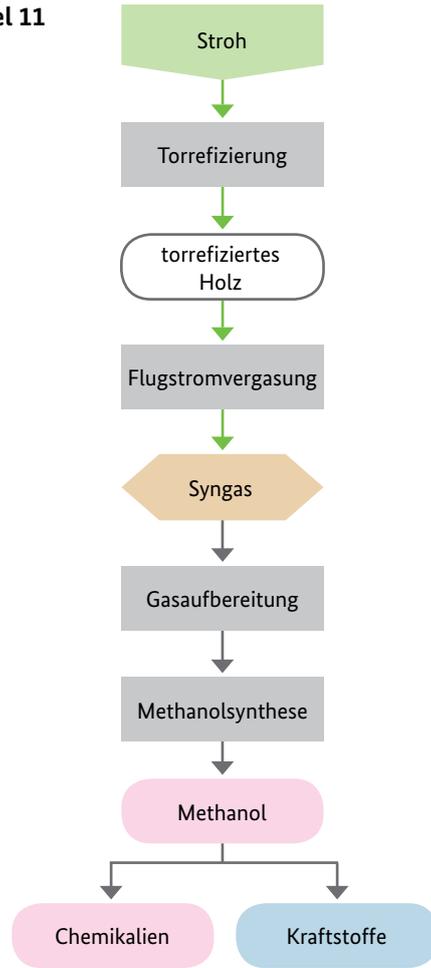
Das Konzept umfasst die Konfiguration einer Synthesegas-Bioraffinerie auf Basis von Kurzumtriebsholz zur Herstellung von Ethanol mittels Biomassetrocknung und Wirbelschichtvergasung.

Pappelholzhackschnitzel werden unter hohem Druck und niedrigen Temperaturen getrocknet und

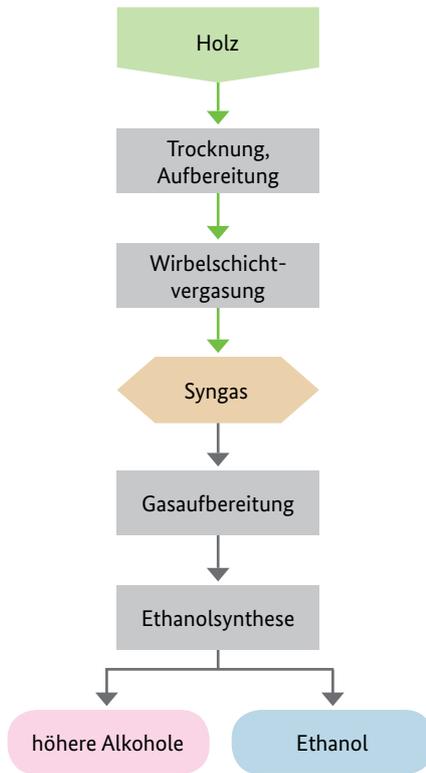
Beispiel 10



Beispiel 11



Beispiel 12



Prozesse nach der jeweiligen Alkoholsynthese hier nicht im Detail ausgelegt

Abbildung 23: Beispiele für Synthesegas-Bioraffineriepfade

aufbereitet. Trockene Holzschnitzel werden dann zusammen mit Sauerstoff in einen Wirbelschichtvergaser bei 870 °C und ca. 30 bar eingespeist. Das produzierte Rohsynthesegas wird aufbereitet und in eine anschließende Alkoholsynthese geleitet. Aus der Alkoholdestillation werden Ethanol sowie höhere Alkohole gewonnen.

4.5 Biogas-Bioraffinerie

Plattform: Bei einer Biogas-Bioraffinerie erfolgt keine separate Komponententrennung in der Primärraffination, sondern ein großer Teil der organischen Bestandteile und Komponenten der Biomasse (eine Ausnahme ist insbesondere Lignin) werden abgebaut, so dass als Rohprodukt Biogas entsteht (Abbildung 24).

Rohstoffe: Als Rohstoffbasis eignet sich verschiedenartige Biomasse, soweit sie nicht zu sehr lignifiziert ist. Insbesondere feuchte Biomassen sind prädestiniert zur Biogaserzeugung. Dazu gehören u. a. organische Reststoffe der Landwirtschaft (tierische Exkremente wie Gülle und Festmist, Ernterückstände wie Rübenblätter), organische Reststoffe der Lebensmittelverarbeitenden Industrie (Gemüse- und Fruchtreste, Schlempe, Treber), kommunale biogene Abfälle (Bioabfall, Speiseabfälle, Grünschnitt, Landschaftspflegegrün) sowie Anbaubiomasse, die gezielt zur Energieerzeugung angebaut wird (sog. Energiepflanzen wie Getreideganzpflanzensilage, Maissilage, mehrjährige Gräser).

Primärraffination: In einer Biogasanlage erfolgt der anaerobe mikrobielle Abbau (Vergärung) des eingesetzten Substrats. Verschiedene Arten von Mikroorganismen nutzen die komplex zusammengesetzte Biomasse (vor allem Kohlenhydrate, Fette und Proteine)

als Nährstoff- und Energielieferanten. Hauptprodukte des Abbaus sind Methan und Kohlenstoffdioxid. Da sie gasförmig sind, trennen sie sich vom Gärsubstrat und bilden die Hauptkomponenten des Biogases.

Für die Weiterverarbeitung steht als Rohprodukt Biogas und der Gärrest zur Verfügung.

Sekundärraffination/Produkte: Die Gaszusammensetzung des Biogases hängt von diversen Parametern, in erster Linie von der Substratzusammensetzung und der Betriebsweise des Gärbehälters, ab. Der Methangehalt liegt üblicherweise bei 50–70 %. Aufgrund des Energiegehaltes von Biogas kann dieses vielfältig zur Bereitstellung von Strom und Wärme in KWK-Prozessen, zur reinen Wärmenutzung (Brennwertkessel) oder als Fahrzeugtreibstoff eingesetzt werden. Für die Einspeisung in das bestehende Erdgasnetz ist aufgrund der Gasnetzanforderungen die Aufbereitung des Biogases zu Biomethan notwendig, wobei neben der Trocknung und Entschwefelung des Gases in erster Linie die Abtrennung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) erfolgt. Die Nutzung des Biogases kann somit entweder direkt an der Biogasanlage, z. B. über ein Blockheizkraftwerk (BHKW), zur Erzeugung von Strom und Wärme erfolgen oder nach einer umfassenden Biogasaufbereitung indirekt über die Einspeisung in das Erdgasnetz bzw. die Nutzung des Biomethans als Kraftstoff.

Der Gärrest kann zwar stofflich und energetisch genutzt werden, er wird jedoch üblicherweise zur Schließung der Nährstoffkreisläufe wieder als Dünger in der Landwirtschaft ausgebracht.

Beispiel: Für die Biogas-Bioraffinerie können derzeit keine konkreten Bioraffineriepfade im Detail



Abbildung 24: Prinzipschema einer Biogas-Bioraffinerie³⁶

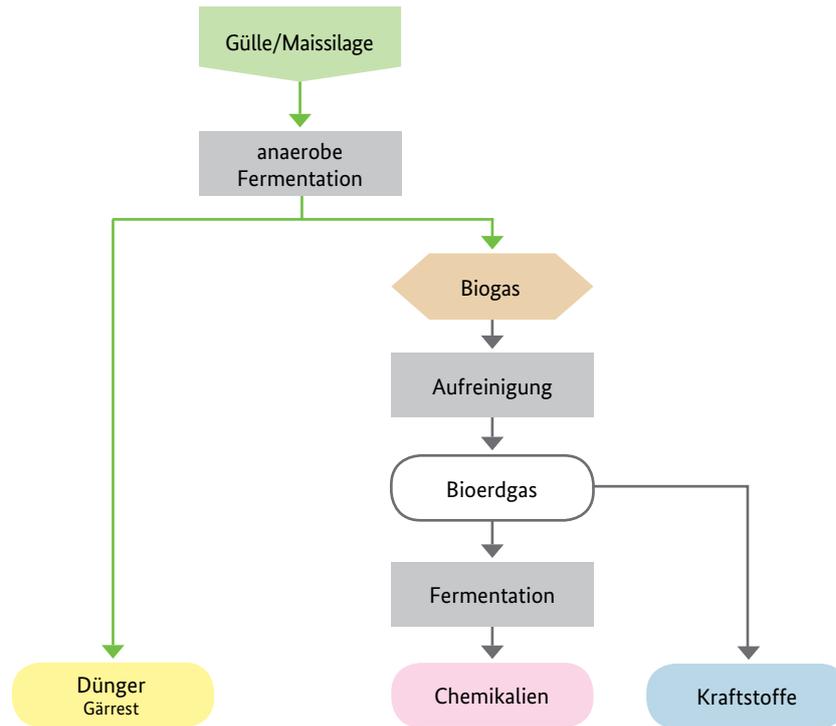
Beispiel 13

Abbildung 25: Beispiel für einen Biogas-Bioraffineriepfad (schematisch-exemplarisch)

technologisch ausgelegt werden, weil belastbare Daten und Kennzahlen noch nicht vorliegen. Für eine Biogas-Bioraffinerie gemäß der unter 3.1 erläuterten Definition wäre neben der oben dargestellten energetischen Nutzung auch eine direkte stoffliche Verwendung des Biomethans vor Ort erforderlich. Für eine direkte stoffliche Nutzung des Biomethans im Sinne eines integrierten, lokalen Bioraffinerie-Konzeptes gibt es allerdings derzeit keine wirtschaftlichen Nutzungsoptionen, die in überschaubaren Zeiträumen realisierbar wären.⁴⁹ Hiervon unbenommen ist die Nutzung an einem anderen Ort via Einspeisung in das Erdgasnetz. Daher werden hier nachfolgend nur allgemeine Aussagen getroffen und eine mögliche Biogas-Bioraffinerie schematisch-exemplarisch in Abbildung 25 skizziert. Dabei wird auf Grundlage der vorliegenden wissenschaftlich-technischen Daten und Studien eine mögliche zukünftige Biogas-Bioraffinerie beschrieben.

Beispiel 13:

Mit der Einspeisung in das Erdgasnetz oder vor Ort kann Biomethan als Erdgassubstitut sowohl für stoffliche als auch energetische Nutzungen bereitgestellt werden. Darüber hinaus wäre eine stoffliche Nutzung des Kohlenstoffdioxids, das infolge der Biogasaufbereitung zu Biomethan vom Biogas abgetrennt wird, als Grundstoff für die chemische Industrie prinzipiell denkbar. Aufgrund der Annah-

me, dass relevante Mengen für industrielle Zwecke nicht in nennenswerten Größenordnungen vor Ort bereitgestellt und/oder genutzt werden können und der Marktwert für Kohlenstoffdioxid gering ist, wird dies derzeit nicht als wirtschaftliche Nutzungsoption betrachtet. Methan ist jedoch grundsätzlich als Fermentationsrohstoff verwendbar, wenn geeignete Mikroorganismen bereitstehen. Die Fermentationsprodukte sind dann entweder wiederum chemische Zwischenprodukte oder werden zu Fertigprodukten weiterverarbeitet. Methan kann prinzipiell chemisch auch zu weiteren chemischen Zwischenprodukten weiterverarbeitet werden.

Inwiefern die Methanol-Erzeugung aus Synthesegas ausgehend von Biogas oder die Fermentation von Biogas durch methylotherme Organismen als tragfähige Verfahren über den Zeithorizont 2030 hinaus für eine stoffliche Nutzung von Biomethan in Betracht kommen, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht abgeschätzt werden.

5 Ökonomische und ökologische Einordnung

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, wird von der Entwicklung neuer Bioraffineriekonzepte eine sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteilhaftigkeit gegenüber fossil oder mineralisch basierten Wertschöpfungsketten, aber auch herkömmlichen Biomassenutzungen erwartet. Um mögliche Potenziale zu realisieren, sich auf dem Markt zu etablieren und auf breite gesellschaftliche Akzeptanz zu stoßen, bedarf es einer Charakterisierung und Einordnung der in Entwicklung befindlichen Konzepte hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Aspekte. So können in einer frühen Entwicklungsphase Hinweise für eine nachhaltige Gestaltung der Verfahren gefunden, Daten für Investitionsentscheidungen bereitgestellt sowie Politik und Unternehmen bei der Identifizierung von besonders vielversprechenden Verfahren und des notwendigen Förderungsbedarfs unterstützt werden. Ferner kann eine solche Analyse auch die Basis zur Bewertung, Kommunikation und Diskussion der Konzepte in der Öffentlichkeit liefern.

Im vorliegenden Kapitel werden zunächst die für die betrachteten generischen Bioraffineriekonzepte (vgl. Kapitel 4) besonders relevanten ökonomischen und ökologischen Aspekte skizziert, auch wenn diese nicht immer spezifisch nur für Bioraffinerien gelten. Hierzu wird in Kapitel 5.1 auf allgemeine Aspekte bei der Bewertung von Bioraffinerien eingegangen. Kapitel 5.2 behandelt Bewertungsaspekte bei Anbau, Bereitstellung und Transport der Rohstoffe. In Kapitel 5.3 werden dann die spezifischen Konzepte näher betrachtet. Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums, in dem sich viele Bioraffineriekonzepte befinden, sind vielfach keine hinreichenden Daten für detaillierte Betrachtungen vorhanden. Auch bestehen verschiedene methodische Probleme. Daher werden in den genannten Kapiteln hauptsächlich qualitative und unterschiedlich detaillierte Betrachtungen vorgenommen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Aussagen auf die konkreten generischen Konzepte beziehen und es bei anderen Ausgestaltungen zu Abweichungen kommen kann. Durch eine erste quantitative ökonomische und ökologische Einordnung zweier Verfahren, einer Lignocellulose-Bioraffinerie über einen hydrothermalen Aufschluss nach dem Sunliquid-Verfahren (Beispiel 7) und einer Synthesegas-Bioraffinerie über Pyrolyse (Beispiel 10), werden weitergehende Aussagen zu Potenzialen und Grenzen dieser Verfahren aufgezeigt. Schließlich werden in Kapitel 5.4 die Ergebnisse diskutiert, Schlussfolgerungen gezogen und

Forschungsbedarf im Hinblick auf weitergehende Analysen und Bewertungen skizziert.

5.1 Allgemeine Aspekte der Analyse und Bewertung von Bioraffinerien

Für eine aussagekräftige ökologische und ökonomische Analyse und Bewertung von Produktions- und Verarbeitungsverfahren sind die gesamten Wertschöpfungsketten von der jeweiligen Rohstoffbereitstellung, Erst- und Weiterverarbeitung bis hin zur Letztbereitstellung von Produkten in entsprechenden Anlagen zu betrachten und hierbei auch Koppelprodukte sowie die Reststoffentsorgung einzubeziehen. Dies gilt für Bioraffineriekonzepte wie auch für alternative Herstellungsverfahren von bio-basierten und nicht-erneuerbaren Produkten gleichermaßen. Im Vergleich von stofflicher mit direkter energetischer Nutzung biogener Rohstoffe liegen wesentliche Unterschiede darin, dass bei der stofflichen Nutzung durch Recycling und Kaskadennutzung eine Verlängerung der Wertschöpfungskette möglich ist, an deren Ende eine energetische Verwertung stehen kann. Unter Berücksichtigung der methodischen Herausforderungen beim Vergleich unterschiedlicher Referenzkonzepte gilt es aber auch, die erwartete Vorteilhaftigkeit von Bioraffineriekonzepten gegenüber (teils etablierten) Anlagenkonzepten für die Erzeugung von Einzelprodukten zu validieren.

Die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Konzepte sind in Analysen und Bewertungen von Bioraffinerien zu berücksichtigen. Dies kann sowohl Technologien betreffen, die sich zwischen Labor-/Technikumsmaßstab, Pilot-, Demonstrations-, Referenzanlage, als auch bis hin zu einem erfolgreichen Einsatz im kommerziellen Maßstab befinden können. Es kann aber auch für die Verwendung verschiedener Pflanzen gelten, die bislang vorwiegend auf hohe Erträge für eine Verwendung als Nahrungs- und Futtermittel gezüchtet wurden. „Neue“ Pflanzen haben mitunter noch kein vergleichbares Zuchtniveau erreicht. Durch moderne Pflanzenzüchtung und die verantwortbare Nutzung biotechnologischer Verfahren im Hinblick auf die zu verwertenden Komponenten sind künftig weitere Verbesserungen möglich. Bei Kurzumtriebsplantagen (KUP) sowie Energiegräsern sind weitere Fortschritte erzielbar. Auch im Hinblick auf Anbau- und Erntetechnik sind

Weiterentwicklungen möglich und erforderlich. Dies führt zu einer unterschiedlichen Verfügbarkeit, einem unterschiedlichen Detaillierungsgrad und unterschiedlicher Qualität der Daten und erschwert belastbare Vergleiche.

Von wesentlicher Bedeutung sind auch logistische Aspekte. Verschiedene Bioraffineriekonzepte sehen eine zeitliche und räumliche Entkopplung von Teilprozessen vor, die durch Kapazitätsausgleich oder Verringerung notwendiger Transportleistungen den Rohstoffspezifika wie etwa saisonalem Anfall oder geringer Transportwürdigkeit (vgl. Kapitel 5.2) begegnen sollen und sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht Vorteile bieten können. Das Gleiche gilt für die Möglichkeit, eine Bioraffinerie „auf der grünen Wiese“ („green field“) in einem *Top-down*-Ansatz oder an einem bestehenden Industriestandort in einem *Bottom-up*-Ansatz zu etablieren (vgl. Kapitel 3.6). Neben den allgemeinen Verbundvorteilen, die mit einer Integration in einen bestehenden Industriestandort verbunden sein können, eröffnet sich die Möglichkeit, entweder rohstoffseitig, z. B. bei Integration in ein Großsägewerk, oder produktseitig durch direkte Weiterverarbeitung von Produkten den Transportaufwand zu verringern.

Analyse- und Bewertungsprobleme können ferner durch Veränderungen in Bezug auf die Kalkulationsgrundlagen, etwa der zugrunde gelegten Daten für eine ökonomische Bewertung, auftreten. Neben anderen Faktoren beeinflussen hier die Konkurrenz verschiedener existierender, aber auch weiterer in Entwicklung befindlicher Biomassenutzungen um die teilweise gleichen Sortimente die Märkte, verknappt das Angebot und erhöhen die Preise. Umgekehrt können Sättigungseffekte und Verbesserungen der konventionellen Produkte zu einer Preisstabilisierung bei biogenen Rohstoffpreisen führen. Analog zu allen weiteren biobasierten Anwendungen sind für die Realisierung einer Bioraffinerie eine nachhaltige und langfristige Sicherung des Rohstoffbezugs in benötigter Menge und Qualität sowie eine kalkulierbare Preisbasis notwendig. Hilfsstoffe wie Enzyme und Katalysatoren werden weiter entwickelt und können neben der Erhöhung von bspw. Konversionsraten sowohl ökonomisch als auch ökologisch die Analyse- und Bewertungsergebnisse beeinflussen. Aufgrund der vollständigeren, und bisweilen hochwertigeren Verwertung der Rohstoffbestandteile und höheren Prozesseffizienzen können Vorteile von Bioraffineriekonzepten gegenüber anderen Konversionsverfahren biogener Rohstoffe dargestellt werden.

Das Angebot größerer Produktmengen kann die existierenden Absatzmärkte für diese Produkte stark beeinflussen. Bei existierenden Produkten ist zudem zu berücksichtigen, dass diese oft deutlich weiter in ihrer Entwicklung sind und entsprechend wirtschaftlicher hergestellt werden können. Für neue Produkte existieren vielfach noch keine belastbaren Abschätzungen zu Marktgrößen und erzielbaren Preisen. Bei einzelnen Bioraffineriekonzepten sind zudem die möglichen Zielprodukte noch nicht fixiert, existieren teilweise keine vergleichbaren Produkte bzw. ist eine Vergleichsbasis zunächst herzustellen, was eine Einordnung und Bewertung dieser Produkte deutlich erschwert.

Für die individuellen Investitionsentscheidungen spielen auch staatliche Förderungen eine Rolle, die in der ökonomischen Beurteilung von stofflichen Nutzungskonzepten zu deutlich anderen Einschätzungen führen, insbesondere im Vergleich mit rein energetischen Nutzungskonzepten.

Bei der ökologischen Analyse und Bewertung gibt es neben den bereits angesprochenen Punkten weitere methodische Herausforderungen. Dies betrifft insbesondere die Berücksichtigung der relevanten Umweltaspekte. Die Betrachtung von Klimawirkungen, Versauerung, Eutrophierung und Ressourcenverbrauch, etwa dem Flächenbedarf oder dem nicht-erneuerbaren kumulierten Energieverbrauch, ist häufige Praxis. Weitere wichtige Kriterien wie Ozonabbau und Sommersmog sind ihrer Bedeutung nach unumstritten und es gibt auch keine spezifischen methodischen Defizite in Bezug auf biobasierte Produkte. Es bestehen jedoch methodische Defizite hinsichtlich des Aspekts der Landnutzungsänderungen. Die direkten Landnutzungsänderungen (direct land use change, dLUC) und damit verbundene Umweltauswirkungen beispielsweise auf Biodiversität und Treibhausgasemissionen lassen sich in Abhängigkeit von Rohstoff- und Kapazitätswahl für einen Bioraffinerietyp i. d. R. vergleichsweise gut bestimmen. Für eventuelle indirekte Landnutzungsänderungen (indirect land use change, iLUC), die auf Verdrängungseffekte beim Biomasseanbau beruhen, wäre u. a. eine wissenschaftlich breit akzeptierte Bilanzierungsmethodik erforderlich. Zudem ist die vor allem regional relevante Wassernutzung ein wichtiger Punkt, die bislang in der ökologischen Analyse und Bewertung nur unzureichend berücksichtigt wird.

Für die ökologische Analyse und Bewertung ist es zudem wichtig, geeignete funktionelle Einheiten zu wählen. Für einige Produkte der Bioraffineriekonzepte kann hierzu, in Analogie zur direkten energie-

tischen Nutzung, der Energiegehalt herangezogen werden. Für verschiedene stoffliche Nutzungen ist dies jedoch nicht sinnvoll und es sind andere geeignete Größen zu definieren. Grundsätzlich ist hier der Vergleich mit Referenzsystemen sinnvoll, die das gleiche Produktspektrum einer Bioraffinerie in gleichen Mengen bereitstellen.

Allgemein ist die Datenbasis in vielen Bereichen der ökonomischen und ökologischen Analyse und Bewertung von Bioraffineriekonzepten noch unzureichend und wenig validiert. Neben Daten zu Anbau und Bereitstellung der Rohstoffe und den technologischen Verfahren fehlen häufig belastbare Daten zu Katalysatoren und Enzymen. Zudem hängen die Umweltwirkungen des Biomasseanbaus und von Bioraffinerien teilweise erheblich von lokalen Bedingungen wie etwa Klima, Wasserversorgung und Boden ab. Hier sind noch Anstrengungen zur Regionalisierung von Bewertungsmethoden notwendig.

Vor dem dargestellten Hintergrund werden im Folgenden die in dieser Roadmap behandelten Beispiele zu generischen Bioraffineriekonzepten näher untersucht. Aufgrund ihrer Relevanz für die Betrachtung aller Bioraffineriekonzepte wird zunächst auf die Bereitstellung der Rohstoffe gesondert eingegangen. Auf Basis der technischen Charakterisierungen (vgl. Kapitel 4) und vorhandener Literatur werden die



diskutierten Konzepte analysiert, um damit erste, hauptsächlich qualitative Aussagen zu deren ökonomischer und ökologischer Einordnung und zu relevanten Aspekten in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Umwelteffekte zu treffen. Wenn nicht anders gekennzeichnet, gehen die Ausführungen auf Datenerhebungen im Rahmen des Roadmap-Prozesses zurück.

5.2 Ökonomische und ökologische Aspekte von Anbau, Bereitstellung und Transport der Rohstoffe

Von zentraler Bedeutung für Analyse und Bewertung von Bioraffineriekonzepten sind Anbau und Bereitstellung der Rohstoffe. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Anlagengröße der Bioraffinerietypen ist dabei im Regelfall davon auszugehen, dass mit zunehmender Anlagengröße (d. h. größeren Mengen an Rohstoff frei Anlage, wobei eine nachhaltige Rohstoffversorgung im Einzelfall zu prüfen ist) komplexere Logistikkonzepte zur Biomassebereitstellung erforderlich sind bei gleichzeitiger Zunahme des Anteils der Rohstoffe, die über internationale Märkte erworben werden.

Im Folgenden wird zunächst auf die mit der Verfügbarkeit von Agrar- und Holzrohstoffen sowie grüner Biomasse verbundenen Aspekte eingegangen. In Kapitel 5.2.2 werden dann Aspekte der Ernte, des Transports und der Logistik der Rohstoffe skizziert, bevor in Kapitel 5.2.3 auf spezifische Bewertungsfragen eingegangen wird. Das in Europa und weltweit durchaus relevante Potenzial von Grenzertrags- und Kargflächen sowie kontaminierten Standorten wird dabei nicht betrachtet, da es für Deutschland als gering eingeschätzt wird.⁵⁰

5.2.1 Rohstoffverfügbarkeit und Preise

Agrarrohstoffe

Die Rohstoffbasis für die unterschiedlichen Bioraffinerietypen umfasst stärkehaltige (z. B. Getreide, Kartoffeln) und zuckerhaltige Agrarprodukte (z. B. Zuckerrüben, Zuckerrohr) sowie verschiedene Ölpflanzen (z. B. Raps, Soja, Ölpalme). Dies schließt auch landwirtschaftliche, biogene Reststoffe ein. Die Vorzüglichkeit der einzelnen Rohstoffe hängt von den erforderlichen Produkteigenschaften (unterschiedliche Stärkegehalte, Fettsäuremuster, Reinheitsgrade etc.) und der späteren Verwendungsrichtung ab. Der Selbstversorgungsgrad Deutschlands bei diesen Produkten betrug im Wirtschaftsjahr 2009/10 zwischen 43 % (pflanzliche Öle) und 136 % (Kartoffeln

und Zucker),⁵¹ was einen Hinweis darauf gibt, dass deren Verfügbarkeit auf nationaler Ebene unter den gegebenen ökonomischen und auch standörtlichen Bedingungen teilweise begrenzt ist.

Die Verfügbarkeit von Fläche und somit der erwähnten Rohstoffe für die Verwertung in Bioraffinerien wird durch verschiedene nationale und europäische Faktoren begrenzt oder verbessert:

- Nutzungskonkurrenzen (z. B. Ernährung, Futter, stoffliche und energetische Nutzung, Naturschutz und Ökosystemdienstleistungen) beeinflussen sowohl national als auch europäisch die Rohstoffverfügbarkeit.
- Politische Entscheidungen über die künftige europäische Gemeinsame Agrarpolitik (CAP) und europäische Umweltpolitik können positiven oder negativen Einfluss auf die Flächenverfügbarkeit für die Produktion haben.
- Es sind weitere moderate Ertragssteigerungen beim Nahrungs- und Futtermittelanbau in Deutschland zu erwarten.
- Der inländische Verbrauch an Lebensmitteln wird sich aufgrund des demographischen Wandels in Deutschland und Änderungen der Ernährungsgewohnheiten in den kommenden Jahren tendenziell leicht rückläufig entwickeln. Der inländische Verbrauch an Futtermitteln für die Fleisch- und Milchproduktion wird aufgrund sinkender Viehbestände infolge des Rationalisierungsdrucks und den sich ändernden Ernährungsgewohnheiten eher rückläufig sein. Die deutsche Ernährungswirtschaft strebt jedoch einen weiteren Ausbau ihrer Exportmöglichkeiten an.
- Koppelprodukte wie Schlempe, Ölschrote etc., die bei der stofflichen und/oder energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe anfallen, können zumindest partiell als Futtermittel eingesetzt werden, wodurch Synergien möglich sind.
- Der inländische Flächenbedarf durch vermehrten Ökolandbau und andere Extensivierung der landwirtschaftlichen Produktion kann leicht ansteigen.
- Nationale Ziele des Natur- und Landschaftschutzes sowie die inländische Entwicklung von Siedlungs- und Verkehrsflächen sind zu beachten.

Alle diese Faktoren lassen aufgrund ihrer Komplexität keine belastbare Aussage zu, ob es zukünftig zu einer Freisetzung von zusätzlichen Flächen zum Biomasseanbau in Deutschland kommt.

In globaler Sicht gilt zudem, dass die Welternährungsorganisation FAO von einem weltweit steigenden Bedarf an Agrarrohstoffen für Nahrungs- und

Futterzwecke insbesondere aufgrund des Bevölkerungswachstums und Änderungen der Ernährungsgewohnheiten zugunsten tierischer Produkte ausgeht. Dieser macht – parallel zu Verbesserungen bei Erträgen und Reduktion von Verlusten – eine deutliche Ausweitung der weltweiten Anbauflächen für Nahrungs- und Futtermittel erforderlich.⁵²

Die zukünftige Nachfrage nach Agrarrohstoffen für die Herstellung von Biokraftstoffen, Strom und Wärme wird maßgeblich von den politischen Rahmenbedingungen (z. B. zukünftige Novellierungen des EEG, deutsche aber auch internationale Zielvorgaben zum Anteil erneuerbarer Energie), den Preisentwicklungen von CO₂ im Rahmen des Emissionshandels und den Preisrelationen zu fossilen Energieträgern bzw. anderen erneuerbaren Energien abhängen. So ist bereits in den vergangenen zehn Jahren die industrielle Verwendung von Getreide durchschnittlich zehnmal so stark gestiegen wie die Nachfrage nach Nahrungsmitteln.

Industrielle Produzenten, so auch die Betreiber von Bioraffinerien, kaufen aus ökonomischen Gründen den Rohstoff dort ein, wo er bei Erfüllung der erforderlichen Produkteigenschaften zum günstigsten Preis erhältlich ist – entweder auf dem EU-Binnenmarkt oder vom Weltmarkt. Einige Rohstoffe mit wünschenswerten Produkteigenschaften (bspw. Kettenlänge der Fettsäuren insbesondere bei Kokosöl) und Palm(kern)öl) werden aufgrund standörtlicher und ökonomischer Bedingungen nicht in Deutschland angebaut, sondern müssen daher importiert werden. Um die Rohstoffbasis langfristig zu sichern, ist daher davon auszugehen, dass die Rohstoffe aus unterschiedlichen Märkten bereitgestellt werden müssen. Landwirte produzieren jedoch nur die Produkte, die sie profitabel absetzen können. Sobald die deutsche Industrie klare Signale an die Landwirte aussenden wird, welche Rohstoffe sie mittel- und langfristig in welchen Mengen und mit welchen Produkteigenschaften zur Weiterverarbeitung benötigen wird und dazu einen für die Landwirte akzeptablen Preis ansetzt, ist davon auszugehen, dass Landwirte mit ihrem Angebot darauf reagieren werden. Geeignete, bereits heute schon erfolgreich praktizierte Instrumente hierfür sind mehrjährige Lieferverträge sowie Vertragsanbau für ausgewählte Rohstoffe nebst Erfassungshandel. Eine erhöhte Nachfrage wird insbesondere bei engem Angebot zu steigenden Preisen führen und somit die Attraktivität für Landwirte erhöhen, diese Produkte anzubieten. Dennoch muss der Anbau von Nahrungsmitteln Vorrang haben, gleichzeitig sind die Auswirkungen auf das Preisgefüge für Nahrungs- und Futtermittel zu beachten.

Abgesehen von Rahmenbedingungen, die eine bestimmte Rohstoffbasis vorschreiben, werden Unternehmen in nennenswertem Umfang nur dann von fossil basierten oder mineralischen auf nachwachsende Rohstoffe umsteigen (die technische Eignung vorausgesetzt), wenn es für sie einen einzelwirtschaftlichen Anreiz gibt – entweder auf Seiten der Rohstoffbeschaffung oder bei der Vermarktung der daraus hergestellten Produkte.

Da Rohstoffe ein wichtiger Produktionskostenfaktor sind, spielen ihre Marktpreise eine wesentliche Rolle. Die Weltmarktpreise landwirtschaftlicher Rohstoffe waren in den letzten Jahren starken Schwankungen ausgesetzt, was in großem Ausmaß auch auf die nationalen Preise durchschlug. Aufgrund der zunehmenden Liberalisierung der Agrarmärkte wird es auch in Zukunft stärkere Preisschwankungen als in der Vergangenheit geben. In 2007/08 befanden sich landwirtschaftliche Rohstoffpreise auf historisch hohem Niveau (siehe Abbildung 26), was an vielschichtigen Faktoren lag, z. B. erhöhtes Erdölpreinsniveau, Missernten in wichtigen Anbauländern, ein erhöhter Bedarf durch die weltweit ansteigende Biokraftstoffproduktion, teilweise historisch niedrige Lagerbestände sowie zumindest temporär auch Preisspekulationen. Ausgelöst durch die weltweite Finanz- und Bankenkrise fielen die Preise zu 2009 hin deutlich ab, um dann Anfang 2011 relativ

schnell wieder ein neues Hoch zu erreichen. Neben den Indizes der deutschen Erzeugerpreise für Futterweizen, Körnermais, Raps und Zuckerrüben zeigt Abbildung 26 auch den indizierten deutschen Einfuhrpreis für Öle und Fette, welcher Hinweise auf die Preise für importiertes Palm- und Sojaöl gibt (jeweils inklusive Umsatzsteuer).

Erhöhen sich die Preise des Rohstoffes, so ist davon auszugehen, dass sich mit gewisser Zeitverzögerung auch die Preise der Haupt- oder Koppelprodukte aus bestimmten Verarbeitungsprozessen entsprechend erhöhen (z. B. Ethanol). FAO und OECD gehen in ihren Agrarpreisprojektionen bis 2030 von real steigenden Rohstoffpreisen aus.

Zusätzlich zu den oben diskutierten Rohstoffen für Bioraffinerien können in Zukunft gezielt angebaute „neue“ Kulturen wie zum Beispiel Miscanthus oder mehrjährige Energiegräser das heimische Biomassepotenzial in Deutschland vergrößern. Hier sind jedoch die genannte Flächenverfügbarkeit sowie die Verträglichkeit mit Landschafts- und Naturschutz zu beachten. Zudem bedeutet die Etablierung mehrjähriger Kulturen einen höheren Aufwand und ein höheres Investitionsrisiko für landwirtschaftliche Betriebe, da die Erlöse aus diesen Kulturen erst zeitverzögert erzielt werden. Die erzielbaren Preise sind zudem unter den genannten Marktbedingungen nur

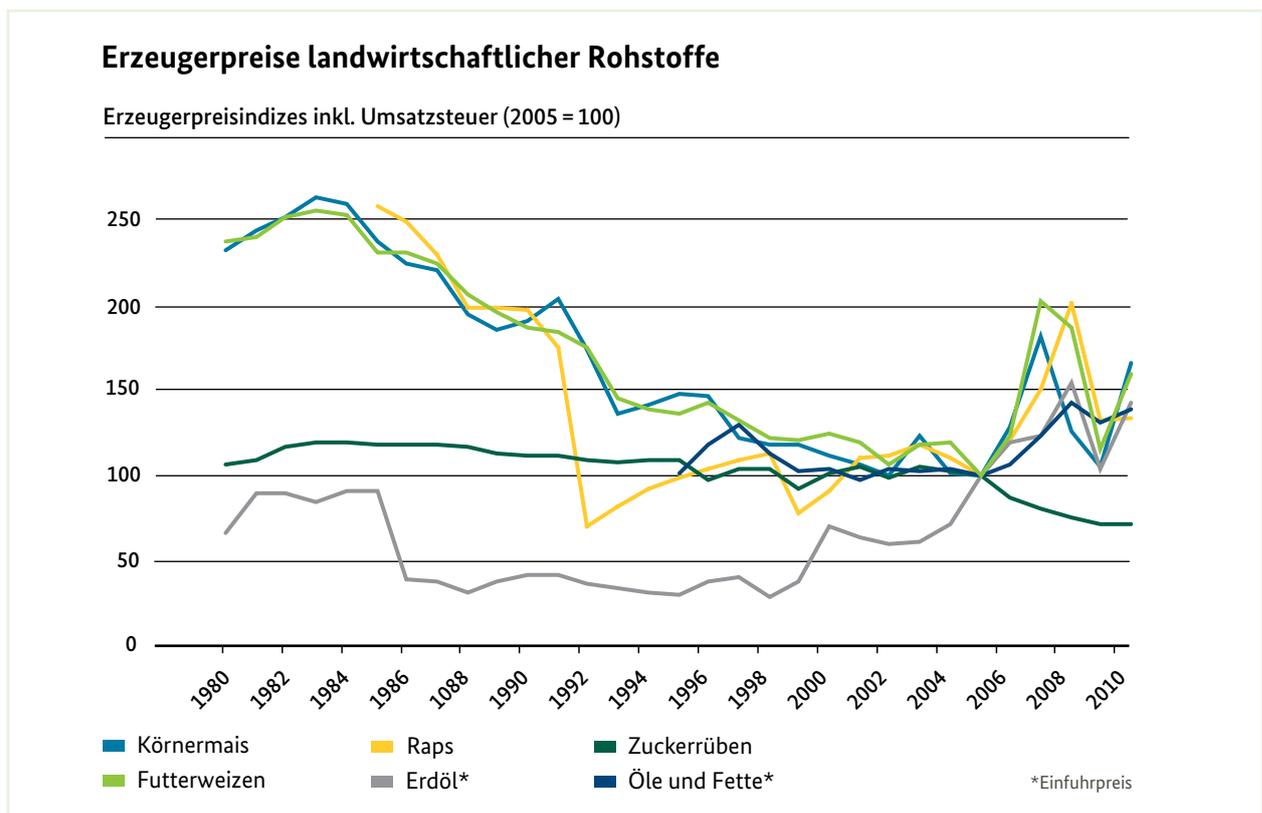


Abbildung 26: Indizes der Erzeugerpreise inklusive Umsatzsteuer für ausgewählte landwirtschaftliche Rohstoffe im Zeitraum 1980–2010⁵³

schwer vorab kalkulierbar, sofern dies nicht über langfristige Verträge abgesichert wird. Der jährliche Aufwand nach Etablierung ist bei mehrjährigen Kulturen in der Regel jedoch geringer.

Stroh

Ernterückstände, wie Stroh aus der Getreide- und Körnermaisproduktion, sind mögliche Rohstoffe für Bioraffinerien. Im Jahre 2010 fielen hiervon in Deutschland schätzungsweise 35,4 Millionen Tonnen an. Der Bedarf, der hiervon zum Erhalt des Humus benötigt wird, hängt von vielen Faktoren, wie z. B. Bodenart und Qualität, Klima, etc. ab. Für die energetische bzw. stoffliche Nutzung stehen zwischen 20 % und 40 % des anfallenden Strohs zur Verfügung, bei den nachhaltig verfügbaren Entnahmeraten sind aber auch die Fruchtfolgeaspekte sowie die Treibhausgasbilanzen wesentlich.⁵⁴ In Einzelfällen können auch höhere Entnahmen von Stroh eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung gewährleisten.

Die regionale Verfügbarkeit des Strohs variiert stark; anders als beispielsweise in Dänemark existiert in Deutschland auch kein etablierter Strohmarkt. Die Hauptursache für diese hohe Variabilität ist neben den alternativen Nutzungsmöglichkeiten die Tatsache, dass Stroh aufgrund seiner niedrigen Energiedichte nur eine geringe Transportwürdigkeit aufweist. Dies hat zur Folge, dass bei dem derzeitigen Preisgefüge davon auszugehen ist, dass sich kein überregionaler Markt für Stroh bildet und Nutzungskonkurrenzen insofern eher regional zu betrachten sind. Dies kann einen Versorgungsvorteil für Bioraffinerien darstellen, da ein regional begrenzter Handel Konkurrenzsituationen stark einschränken kann. So ist Stroh als ein wichtiger landwirtschaftlicher, biogener Reststoff für ausgewählte Bioraffinerien zu betrachten, der als einer der wenigen nachwachsenden Rohstoffe bislang nicht optimal genutzt wird.

„Grüne“ Biomassen

Grüne Biomassen, wie der Aufwuchs von Dauergrünland oder Feldgras von Ackerflächen, werden in der Regel in Abhängigkeit von der Intensität der Nutzung bis zu 3–4 Mal während der Vegetationsperiode (April bis Oktober) geschnitten und können somit pro Jahr Gesamterträge zwischen 7 bis 10 Tonnen Trockenmasse pro Hektar erzielen.⁵⁵ Mit einer intensiven Nutzung können jedoch unerwünschte Effekte auf Umwelt und Natur verbunden sein (u. a. Boden, Wasser, Biodiversität). Ab 2015 wird es keine Milchquote mehr geben und Landwirte werden dann so viel Milch produzieren, wie sie über den



Markt absetzen können. Geht man langfristig von hohen Agrarpreisen für Ackerkulturen aus, so ist damit zu rechnen, dass Landwirte in Ackerbauregionen sich auf die Produktion von Feldfrüchten konzentrieren werden und die bei niedrigen Milchpreisen weniger rentable Milchproduktion sich verstärkt in Grünlandregionen konzentrieren wird.⁵⁶ Wie hoch der tatsächliche Bedarf an Grünschnitt für die Tierproduktion und als Substrat in Biogasanlagen zukünftig sein wird, ist derzeit offen, womit auch keine belastbare Aussage über Verdrängungseffekte (iLUC) möglich ist. Theoretisch stünde Grünschnitt als Rohstoff für die stoffliche und energetische Nutzung in Bioraffinerien zur Verfügung. In Deutschland wurden in 2010 ca. 31 Millionen Tonnen Trockensubstanz grüne Biomasse auf gut 4,8 Millionen Hektar (29 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche) angebaut. Dabei ist jedoch zu bedenken, dass schätzungsweise ein Drittel der Grünlandflächen aufgrund von Hangneigung und Nässe nicht gut mechanisierbar und damit nur bedingt ökonomisch nutzbar ist. Die frische Biomasse muss entweder direkt verarbeitet oder als Silage konserviert werden. Silage erlaubt einen Ganzjahresbetrieb mit dem Rohstoff „Grüne“ Biomasse. Groß dimensionierte Verwertungskonzepte für grüne Biomasse können logistische und vermutlich auch Akzeptanzprobleme bei Bevölkerung und Landwirten hervorrufen. Eine wichtige und nachhaltige, allerdings auch mit höhe-

ren Bereitstellungspreisen verbundene, Alternative zu Grünschnitt können „Naturschutzgras“ und Reststoffe aus der Landschaftspflege darstellen.

Allerdings stellt die geringe Transportwürdigkeit der grünen Biomasse einen begrenzenden Faktor dar, der die Gefahr birgt, dass die wirtschaftlichen Potenziale überschätzt werden. Die Verarbeitung von „Grünen“ Biomassen sollte regional erfolgen, direkt in Kombination mit der vorhandenen agro-industriellen Infrastruktur (Grüngut-Trockenwerke, Silageerzeugung, Biogasanlagen für die Verarbeitung der Reststoffe).

Holz aus Wald und Kurzumtriebsplantagen

Holz ist der weltweit mengenmäßig wichtigste nachwachsende Rohstoff. Aufgrund seiner chemischen und physikalischen, einschließlich mechanischen Eigenschaften wird Holz in vielfältiger Weise stofflich und energetisch genutzt. Im Jahr 2008 waren es weltweit insgesamt rund 3,4 Milliarden Kubikmeter Rohholz.⁵⁷ Davon werden rund 53 % energetisch genutzt. Dies geschieht hauptsächlich für die Zubereitung von Nahrung und zum Heizen in den weniger entwickelten Ländern Afrikas, Asiens und Südamerikas. In Deutschland überwiegt die stoffliche Nutzung. Mantau et al. (2009) gehen für das Jahr 2008 davon aus, dass in Deutschland rund 57 % des Gesamtholzaufkommens stofflich und 43 % energetisch genutzt worden sind. Die Säge-

industrie ist der insgesamt größte Rohholzverbraucher in Deutschland, gefolgt von Haushalten und Kraftwerken, die Holz zur Erzeugung von Wärme und Strom nutzen. Die Holzwerkstoff- sowie die Papier- und Zellstoffindustrie schließen die Reihe der großen Holzverbraucher ab.

Wie groß die Rohstoffbasis für auf Rohholz basierende Bioraffinerien in Deutschland sein wird, hängt von Marktbedingungen und Nutzungskonkurrenz sowie Sicherstellung der Nährstoffnachhaltigkeit ebenso ab, wie von technischen, rechtlichen und administrativen Restriktionen, die die Verfügbarkeit des nachhaltig nutzbaren Holzbiomasseaufkommens in Deutschland sowie den Import und Export von Holz und Holzprodukten beeinflussen. Für Deutschland gehen Schätzungen^{58,59} für das Jahr 2020 übereinstimmend von einer theoretisch jährlich nachhaltig verfügbaren Holzbiomasse aus dem Wald in Höhe von rund 100 bis 140 Millionen Kubikmeter im Jahr 2020 aus. Angesichts der bis 2020 angestrebten Klimaschutzziele und der damit verbundenen Förderung erneuerbarer Energien wird die Nachfrage nach Holz bis zum Jahr 2020 deutlich steigen und das Holzangebot für einige Verwendungsbereiche zunehmend knapp werden.⁶⁰ Differenzierte Standortanalysen zeigen aber, dass es trotzdem ungenutzte Potenziale gibt, die als Rohstoff für eine Lignocellulose-Bioraffinerie verfügbar wären.⁶¹

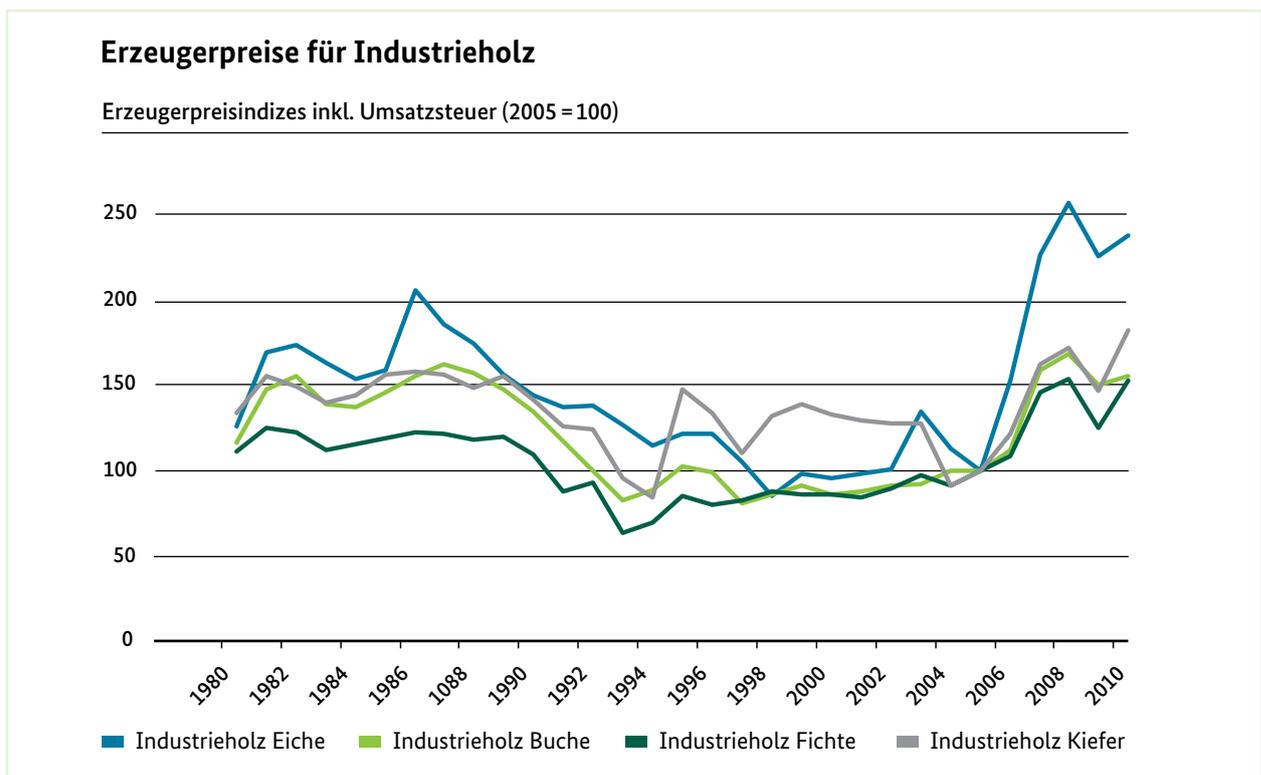


Abbildung 27: Indizes der Erzeugerpreise inklusive Umsatzsteuer für Industrieholz im Zeitraum 1980–2010⁶²

Eine zusätzliche Rohstoffquelle könnten sogenannte Kurzumtriebsplantagen sein. Hierbei handelt es sich um den Anbau schnell wachsender Baumarten wie Pappeln und Weiden auf landwirtschaftlichen Flächen. Diese produzieren in vergleichsweise kurzer Zeit große Mengen Holz ohne nennenswerte Düngung oder Bewässerung. Derzeit kann von 8 bis 12 Tonnen Trockensubstanz pro Hektar und Jahr ausgegangen werden. Schätzungen der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe gehen derzeit von etwa 5.000 Hektar Kurzumtriebsplantagen in Deutschland aus.

Anders als für die meisten landwirtschaftlichen Rohstoffe gibt es für Rohholz keinen globalen Marktpreis. Der Grund hierfür ist, dass der Wert von Rohholz von einer Vielzahl von Kriterien wie Baumart, Dimension, Qualität und Verwendungsmöglichkeiten bestimmt wird und Rohholz deshalb nicht an Warenbörsen gehandelt wird. Rohholzpreise sind daher nicht nur wegen der o. a. Kriterien sondern auch regional sehr unterschiedlich.

Da der Rohstoffbedarf einer Lignocellulose- oder Synthesegas-Bioraffinerie auf Basis Holz etwa mit dem eines Sägewerks oder eines Betriebes der Zellstoffindustrie zu vergleichen ist und in einer Lignocellulose-Bioraffinerie auch Industrieholz verarbeitet werden könnte, sind die Preise für Industrieholz ein guter Indikator für die Rohstoffkosten.

Abbildung 27 zeigt die Entwicklung der Erzeugerpreisindizes inkl. Umsatzsteuer für Industrieholz von Buche, Eiche, Fichte und Kiefer in Deutschland für den Zeitraum 1980–2010. Nach einem Preishoch in den 1980-iger Jahren sind die Preise für Industrieholz bis Mitte der 1990-iger Jahre gesunken, um dann bis in die Mitte des letzten Jahrzehnts auf vergleichsweise niedrigem Niveau zu verharren. Seit Mitte des letzten Jahrzehnts können wieder steigende Preise beobachtet werden. Aufgrund der allgemein erwarteten höheren Nachfrage nach Holz ist mittelfristig mit weiter steigenden Preisen zu rechnen.

5.2.2 Ernte, Transport und Logistik

Im Vergleich zu den meisten fossilen, nicht erneuerbaren Rohstoffen sind Transport und Logistik nachwachsender Rohstoffe durch einige Besonderheiten gekennzeichnet. Am augenfälligsten ist wohl, dass das Aufkommen nachwachsender Rohstoffe nicht von technischen, sondern im Wesentlichen von natürlichen Faktoren wie Klima, Wetter, Jahreszeiten, Boden, Größe und räumlicher Verteilung von Anbauflächen bestimmt wird. Ernte, Transport und Logistik müssen diese Faktoren berücksichtigen und an sie angepasst werden.

Landwirtschaftliche Ernte- und Transportsysteme müssen in den relativ kurzen Ernteperioden vergleichsweise große, dezentral verteilte Mengen ernten, transportieren und, soweit die landwirtschaftlichen Rohstoffe dies erlauben, lagern. In der intensiven Landwirtschaft der Industrieländer können hierfür sehr leistungsfähige und für die jeweiligen Rohstoffe standardisierte Ernteverfahren und Maschinen eingesetzt werden. Unabhängig davon, wo ein bestimmter landwirtschaftlicher Rohstoff angebaut wird, unterscheidet sich die Ernteleistung daher nur wenig. Die Transport- und Lagerfähigkeit landwirtschaftlicher Rohstoffe ist sehr unterschiedlich. Während Körnerfrüchte (wie bspw. Getreide und Ölsaaten) fast ohne Einschränkungen transportiert und gelagert werden können, ist der Transport von Rüben und Knollenfrüchten sowie Grünschnitt/Silagen aufgrund des hohen Wassergehaltes nur über kurze Distanzen ökonomisch sinnvoll. Eine längerfristige Lagerung ist im Fall von Silagen bei geeigneten Lagerbedingungen bis zu 12 Monaten und bei gut gelagerten und sorgfältig abgedeckten Zuckerrüben bis zu 6 Monaten möglich. Kartoffeln lassen sich zwar gekühlt bis zu einem Jahr lagern, allerdings sind sie aufgrund ihrer relativen Druckempfindlichkeit nur aufwendig zu transportieren.

Getreidestroh kann nach der Ernte sowohl am Feldrand oder auch teilweise in Lagern gelagert werden und steht somit auch für eine ganzjährige Belieferung zur Verfügung. Es ist aber aufgrund der geringen (Energie-)dichte nur auf regionaler Ebene transportwürdig.

Waldholz kann mit einigen Einschränkungen ganzjährig geerntet werden. Die Wahl der Holzernte- und Holztransportverfahren erfolgt dabei in Abhängigkeit des Alters, der Dimensionen und anderer Gegebenheiten des zu beerntenden Waldbestandes sowie der zu erntenden Sortimenten. Obwohl es wie im landwirtschaftlichen Bereich hochmechanisierte Ernteverfahren gibt, ist deren Leistungsfähigkeit von Bestand zu Bestand unterschiedlich. Denn anders als Äcker sind Wälder diverser und weniger uniform. Während in jüngeren Beständen die Ernte heute überwiegend vollmechanisiert mit sogenannten Vollerntern erfolgt, werden in älteren Beständen mit stark dimensionierten Bäumen überwiegend motor-manuelle Verfahren eingesetzt. Transport und Lagerfähigkeit von Rohholz ist mit der von Körnerfrüchten vergleichbar. Je feuchter und weniger dicht (Hackschnitzel, Sägespäne) das Sortiment, desto weniger wirtschaftlich ist der Transport über lange Distanzen. Die Lagerfähigkeit von Holz ist, wenn ausreichend trocken und vor Schadorganismen geschützt, nahezu unbegrenzt.

Die Ernte von Kurzumtriebsplantagen ist mit der Ernte anderer landwirtschaftlicher Rohstoffe zu vergleichen, da die Ernte zwar im Winter aber wie bei anderen Rohstoffen nur in einer kurzen Ernteperiode möglich ist. Wenn Holzhackschnitzel produziert werden sollen, kann auf modifizierte landwirtschaftliche Maschinen einschließlich Transportlogistik zurückgegriffen werden. Soll Rundholz geerntet werden, ist spezielle forstliche Erntetechnik einzusetzen. Für den Transport von Hackschnitzeln kann sowohl landwirtschaftliche als auch forstliche Technik zum Einsatz kommen. Die Lagerfähigkeit entspricht der von Waldholz.

Mit dem Ziel der Erhöhung der Energiedichte und damit der Transportwürdigkeit bei gleichzeitiger Verbesserung der Rohstoffeigenschaften für die Konversion bieten sich verschiedene Konditionierungsverfahren an (z. B. Pelletierung, Torrefizierung, Pyrolyse, hydrothermale Konversion) die teilweise bekannt oder in einigen Fällen auch erst im Pilot- bzw. Demonstrationsstadium sind.

5.2.3 Bewertungsaspekte der Rohstoffbereitstellung

Die Bewertungsmethodik ist immer auch von der Zielsetzung abhängig, z. B. optimale Nutzung eines bestimmten Ausgangsstoffs, optimale Flächennutzung, beste Verfahrensrouten zu bestimmten Produkten. Schon hieraus wird klar, dass nicht alle Rohstoffe für verschiedene Bioraffinerietypen miteinander vergleichbar sind und auch andere Anforderungen an die jeweilige Bewertungsmethodik gestellt werden. Daher ist es wichtig, die vorhandenen methodischen Herausforderungen und Datenlücken im Kontext bestimmter Fragestellungen herauszuarbeiten und dann als Forschungsbedarf zu formulieren, um mittelfristig geeignete und tragfähige Bewertungsmethoden zu entwickeln.

Eine standortbezogene Diskussion der Umweltwirkungen hinsichtlich der Rohstoffbereitstellung, die verschiedene Standortoptionen umfasst, ist Voraussetzung sowohl für die konkrete Bewertung vor Ort als auch für die Bewertung deutschland- bzw. weltweit. Sollte die vielfach diskutierte Ausweitung der Nachhaltigkeitsanforderungen an Biomasse zur Nutzung für energetische Zwecke umgesetzt werden, sind sowohl für forstliche als auch für agrarische Rohstoffe, die national und international eingekauft werden, Nachhaltigkeitskriterien zu erfüllen.⁶³ Eine nachhaltige Rohstoffbereitstellung sollte hierbei mindestens (i) eine positive Klimabilanz über den gesamten Lebensweg vom Anbau bis zur Reststoffverwertung aufweisen, (ii) keine



Verschlechterung des Bodenzustands herbeiführen, (iii) tolerable Stoffein- und -austräge über alle Pfade einhalten und (iv) geschlossene Stoffkreisläufe der Reststoffe aufweisen.⁶⁴

Die forstliche Produktion ist sowohl durch geringen Einsatz fossiler Energien als auch geringen Einsatz anderer Produktionsfaktoren, z. B. keine Düngemittel und nur in sehr geringem Maße Pflanzenschutzmittel, gekennzeichnet. Dies führt rohstoffseitig zu insgesamt geringen Belastungen der Umwelt durch Treibhausgase, versauernd oder eutrophierend wirkender Einträge in Boden, Wasser und Luft. Wälder entziehen der Atmosphäre CO₂, speichern dieses über Jahrzehnte und stellen darüber hinaus weitere Ökosystemleistungen zur Verfügung.

Kurzumtriebsplantagen (KUP) sind landwirtschaftliche Kulturen, die vergleichsweise extensiv bewirtschaftet werden. So werden Maschinen während der Anlagedauer weniger intensiv als auf konventionell bewirtschafteten Flächen eingesetzt. Das gilt auch für Pflanzenschutzmittel und den Einsatz von Mineraldünger. Sowohl Treibhausgasemissionen als auch Einträge in Boden und Wasser sind vergleichsweise gering. Die mit dem Anbau von Kurzumtriebsplantagen verbundene lange Bodenruhe führt während der Lebenszeit der KUP zu Verbesserung der Bodenstruktur, Anreicherung mit Nährstoffen, Ausbildung einer Humusschicht und Verringerung von Bodenerosion. Deshalb könnten KUPs auch zur Aufwertung degradierter Böden eingesetzt werden und können sich in Abhängigkeit der Ausgangssituation auch positiv auf das Artenspektrum auswirken. Der Wasserbedarf von KUPs ist in der Regel höher als der von konventionellen Agrarkulturen unter ähnlichen Standortbedingungen. Negative Auswirkungen auf die Umwelt und den Naturhaushalt können bei der Rodung der KUP entstehen, wenn die Fläche nachfolgend nicht ackerbaulich genutzt wird.

Kulturpflanzen (Getreide, Ölfrüchte, Zuckerrüben, etc.) werden hauptsächlich zur Verwendung als Nahrungsmittel bzw. Futtermittel angebaut. Um möglichst hohe Flächenerträge zu erzielen, bedarf es oftmals des Einsatzes von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln, womit unerwünschte Auswirkungen auf Umwelt und Natur verbunden sein könnten. Mit dem Anbau gehen die nicht zur Nahrungsmittelproduktion geeigneten lignocellulosehaltigen Agrarreststoffe als Nebenprodukte der Primärnutzung einher. Bei der Bereitstellung von Feldfrüchten werden pro Flächeneinheit höhere Umweltauswirkungen als bei der Bereitstellung von Hölzern verursacht; Agrarprodukte können jedoch leichter in hochwertige Produkte umgesetzt werden. Dies liegt darin begründet, dass Rohstoffbestandteile entweder direkt genutzt (z. B. Zucker oder Pflanzenöl) oder nur geringfügig konvertiert (z. B. Stärke) werden müssen. Eine Umwandlung der lignocellulosehaltigen Agrarreststoffe in höherwertige stoffliche Produkte oder Energie erscheint wirtschaftlich sinnvoll, erste Ansätze zeigen die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit. Zum Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Umweltwirkungen, insbesondere die Veränderung des Bodenkohlenstoffgehalts und die C/N-Wechselwirkung im Boden, aber auch Bodenerosion und -verdichtung wird noch Untersuchungsbedarf gesehen. Die Verwendung von Agrarprodukten als Rohstoff für Biokraftstoffe hat eine intensive Debatte über direkte und indirekte Landnutzungsänderungen ausgelöst, da die zur Erzeugung von Biomasse (unabhängig ob z. B. aus agrarischer oder forstlicher Produktion) zur Verfügung stehende Fläche grundsätzlich begrenzt ist und somit Konflikte zwischen den verschiedenen Nutzungsoptionen entstehen können. Hier besteht ein Vorteil von Ernterückständen, da mit deren Verwertung keine zusätzliche Landnutzung aufgrund der Primärnutzung von Nahrungs- und Futtermitteln einhergeht und somit eine optimale Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln in Kombination mit lignocellulose-basierten Produkten erreicht werden kann.

Um biobasierte Produkte zu identifizieren, die sowohl ökonomisch als auch ökologisch vorteilhaft sind, werden in der Leitmarktinitiative der EU detaillierte Ökobilanzen als Bewertungsinstrument empfohlen. Allerdings gibt es bei der ökologischen Bewertung, insbesondere in Hinblick auf die nachhaltige Bewirtschaftung des Bodens, noch erhebliche methodische Herausforderungen, z. B. in Hinblick auf:

- die Erfassung der Humusbildung in Böden zum Erhalt der Fruchtbarkeit sowie die Lachgas (N_2O)

- und Ammoniak-Emissionen durch auf dem Acker verbliebene bzw. zurückgeführte biogene Reststoffe,
- die Quantifizierung des Wasserbedarfs (water footprint) für die hergestellten Produkte,
- direkte und indirekte Landnutzungsänderungen,
- die Biodiversität und Ökosystemdienste,
- den zeitlichen Bewertungsrahmen (jährlich, Fruchtfolge, Ernteperiode oder 100 Jahre in Übereinstimmung mit dem THG-Effekt),
- regional-spezifische Wirkungsabschätzungsmethoden und
- die Nachhaltigkeitsbewertung, z. B. durch Kombination von Life Cycle Assessment und Life Cycle Costing und ggf. Social Life Cycle Assessment.

Außerdem fehlen für nachwachsende Rohstoffe disaggregierte Hintergrunddaten für relevante Konversions- und Aufbereitungsverfahren in den existierenden Ökobilanzdatenbanken, aber auch regional und saisonal aufgelöste Stoffstromanalysen für organische Reststoffe in Deutschland.

5.3 Ökonomische und ökologische Aspekte der betrachteten Bioraffineriekonzepte

Im Folgenden werden anhand der in dieser Roadmap betrachteten dreizehn Beispielkonzepte für die unterschiedlichen Bioraffinerietypen (vgl. Kapitel 4) ökonomische und ökologische Aspekte diskutiert. Den Entwicklungsstand und die Datenlage reflektierend werden die meisten Beispiele eher qualitativ eingeordnet und die aus ökonomischer und ökologischer Sicht hinsichtlich einer Umsetzung im kommerziellen Maßstab besonders relevanten Faktoren und Problemstellungen skizziert. Exemplarisch werden für eine Lignocellulose-Bioraffinerie (Beispiel 7) und eine Synthesegas-Bioraffinerie (Beispiel 10) erste quantitative Abschätzungen vorgenommen.

5.3.1 Zucker- und Stärke-Bioraffinerie

Die im Rahmen dieser Roadmap vorgestellten Konzepte der Zucker- und Stärke-Bioraffinerien (vgl. Kapitel 4.1) basieren auf dem *Bottom-up*-Ansatz (vgl. Kapitel 3.6) und erweitern die Produktpalette bestehender Biomasseverarbeitungsanlagen durch neu integrierte Verfahren.

Der Bedarf an Zuckerrüben der in dieser Roadmap als Beispiel 1 identifizierten möglichen Zucker-Bio-

raffinerie dürfte grundsätzlich national gedeckt werden können. Für alle Produkte der Zucker-Bioraffinerie sind bereits heute Absatzmöglichkeiten vorhanden, z. B. für Glucose, Fructose, Kohlensäure und Gluconat in der Nahrungsmittelindustrie sowie Bioethanol als Kraftstoff.

Die Bereitstellung von Getreidemehl als Rohstoff einer Stärke-Bioraffinerie auf Basis von Weizen (Beispiel 2) bzw. Mais (Beispiel 3) kann national und saisonal unabhängig gedeckt werden. Die Transport- und Lagerkosten von Getreide/-mehl sind daher als gering einzuschätzen. Auf der Absatzseite existieren entsprechende Märkte in der Nahrungsmittel- und der Futtermittelindustrie, im Verkehrssektor bzw. in der chemischen Industrie.

Die Wirtschaftlichkeit von Zucker- und Stärke-Bioraffinerien ist von mehreren Faktoren abhängig. Neben den Kosten für die Bereitstellung der Betriebsmittel (Rohstoffe, Enzyme, Sonstiges) fallen vor allem Kosten für die Energiebereitstellung als Hauptkostenkomponenten an. Schwankende Rohstoffpreise sowie steigende Energiepreise können sich daher hier stark auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Ein integrierter Ansatz, in dem verschiedene Zucker- und Stärke-Bioraffinerien in einem Anlagenkomplex arbeiten, kann die Wirtschaftlichkeit verbessern. Die Erlöse der unterschiedlichen neuen Produkte können ebenfalls zur Wirtschaftlichkeit dieser Bioraffinerien im Vergleich zu konventionellen Biomasseverarbeitungen beitragen. Die Investitionen für eine Stärke-Bioraffinerie auf Basis von Weizen (gemäß Beispiel 2) mit einer Kapazität von 200.000 t/a Weizen liegen in der Größenordnung von etwa 120 Millionen Euro. Eine weitergehende ökonomische Einordnung bedarf detaillierter Studien für den konkreten Anwendungsfall.

Gleiches gilt für eine ökologische Einordnung, da die Datenlage auch hierfür nicht ausreichend ist. Für die Umweltwirkungen erscheinen neben der Rohstoffherstellung vor allem die Bereitstellung von Energie sowie Betriebsmitteln, z. B. Enzyme und Chemikalien relevant. In Zucker- und Stärke-Bioraffinerien werden heute schon einige Chemikalien produziert, die aus Biomasse kostengünstiger hergestellt werden können als aus fossilen Rohstoffen. Zudem bestehen für viele Produkte der Zucker- bzw. Stärkebasierten Bioraffinerie mehrere äquivalente Produkte, d. h. es besteht die Schwierigkeit, hier geeignete Systeme mit funktioneller und qualitativer Äquivalenz zu definieren. Ein Vergleich mit (fossil-basierten) Referenzsystemen ist aus den genannten Gründen erschwert.

Insofern bedarf es auch hier einerseits weitergehender Arbeiten zur Vereinheitlichung von Bilanzierungsmethoden sowohl für den Anbau der Rohstoffe als auch deren Konvertierung, andererseits auch der Bereitstellung von Daten zu den Konversionsprozessen, um gesicherte und quantitative ökonomische und ökologische Aussagen treffen zu können.

5.3.2 Pflanzenöl- und Algenlipid-Bioraffinerie Pflanzenöl-Bioraffinerie

Die im Rahmen dieser Roadmap vorgestellten Konzepte für Pflanzenöl-Bioraffinerien stellen eine Kombination von bereits industriell genutzten und noch in der Entwicklung befindlichen Verfahren dar. Insofern handelt es sich auch hier um *Bottom-up*-Entwicklungen. Oleochemische Betriebe sind größtenteils in das Verbundnetzwerk der chemischen Industrie eingebunden und befinden sich in der Regel an Standorten mit ebenfalls auf fossilen Rohstoffen basierender Produktion. Anlagen zur Produktion von Biodiesel sind entweder alleinstehend oder in Ölmühlen integriert. Diese Prozesse zur stofflichen und energetischen Nutzung haben sich damit eher dezentral entwickelt. Erste Ansätze für eine kommerzielle Pflanzenölraffinerie der beschriebenen Art gibt es beispielsweise in Südostasien.

Beispiel 4 ist eine Pflanzenöl-Bioraffinerie auf Basis von Rapssaat zur Herstellung von Biodiesel, Schmierstoffen und Spezialchemikalien. Orientiert an den Kapazitäten von Ölmühlen in Deutschland kann eine Dimensionierung der Verarbeitung auf ca. 530.000 Tonnen Rapssaat pro Jahr als realistisch angenommen werden. Für die Integration einer solchen Anlage in einen bestehenden Industriepark wäre mit einer Investition in der Größenordnung von 100 Millionen Euro zu rechnen. Hauptprodukt wäre Rapsölmethylester als Kraftstoff, der zu mehr als der Hälfte zum Gesamtumsatz der Raffinerie beitragen würde. Bei den derzeitigen Preisverhältnissen würden weitere 15 % auf Rapsextraktionsschrot entfallen, etwas weniger als ein Drittel des Umsatzes auf die höherwertigen Produkte Triacetin, 1,3-Propandiol und Schmierstoffe.

Beispiel 5 stellt eine Pflanzenöl-Bioraffinerie zur Herstellung von Fettsäuren, Tensiden und Spezialchemikalien aus Palmkernen dar.⁶⁵ Unter der Annahme einer Rohstoffverarbeitungskapazität von 400.000 Tonnen Palmkernen pro Jahr wäre ebenfalls mit ca. 100 Millionen Euro als Investition für die Integration in einen bestehenden Industriepark zu rechnen. Den weitaus größten Anteil am Umsatz hätte in der hier betrachteten Konfiguration

Fettalkoholsulfat mit etwa 75 %. Als weitere Hauptprodukte würden Fettsäuren, Alkylpolyglycoside, Triacetin und Glycerin für ein diversifiziertes Produktportfolio sorgen. Zudem könnte das Nebenprodukt Palmkernextraktionsschrot abgesetzt werden.

Die Umweltwirkungen pflanzenölbasierter Raffineriekonzepte sind insbesondere durch das ökologische Profil des Rohstoffs, aber auch durch die Ausgestaltung der Transportwege sowie durch die Prozessbedingungen und Einsatzstoffe bei der Konversion zu den Endprodukten bestimmt. Eine ökologische Bewertung der Prozesse einer integrierten Pflanzenöl-Bioraffinerie steht noch aus. Es können somit derzeit keine gesicherten Aussagen hinsichtlich der Umweltwirkungen dieser Konzepte getroffen werden.

In einer Pflanzenöl-Bioraffinerie, die den aktuellen Stand oder die nahe Zukunft der Technik darstellt, würden hauptsächlich Produkte erzeugt, die bereits heute auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden. Zukünftige Forschung zur Bewertung von Pflanzenöl-Bioraffinerien sollte sich daher auf die Analyse integrierter, aller Rohstoffkomponenten nutzender Konzepte vor dem Hintergrund der bestehenden Struktur in Deutschland konzentrieren. Ziel sollte dabei sein, die gesamte Wertschöpfungskette einschließlich Rohstoffanbau und Produktnutzung mit einzubeziehen, Kosteneinsparpotenziale aufzuzeigen sowie oleochemische Prozess- und Produktinnovationen bei den Analysen zu berücksichtigen.

Algenlipid-Bioraffinerie

Dadurch, dass Algen und Cyanobakterien viele sekundäre Stoffwechselprodukte produzieren, eignen sich diese nicht nur zur Herstellung von nicht toxischen und biologisch abbaubaren Kraftstoffen, sondern sind auch zur Gewinnung von Chemikalien, Polymeren oder z. B. als Futtermittel für Fische geeignet.

Praxiserfahrungen existieren im großen Maßstab für die industrielle Produktion von stofflichen Produkten, bspw. von β -Carotin (z. B. in Australien) mittels open ponds beziehungsweise für die Produktion von Nahrungsergänzungstoffen in geschlossenen Photobioreaktoren (z. B. Klötze in Deutschland). Auf EU-Ebene werden gegenwärtig drei Demonstrationsprojekte zur Produktion von Energieträgern gefördert, die den Anbau von Mikroalgen auf 10 Hektar anvisieren. Ziel dieser Projekte ist es, fossile Kraftstoffe durch biobasierte zu ersetzen. Daneben existiert eine Vielzahl von Projekten im Labormaßstab.

Da Algen auf nicht fruchtbaren Flächen kultiviert werden können, ist die Nutzung zur Herstellung von Kraftstoffen mit einer geringeren Flächenkonkurrenz als bei konventionellen Biokraftstoffen der ersten Generation verbunden. Auf Basis der hohen Ausbeuten haben erste Potenzialstudien ergeben, dass Kraftstoffe aus Algen theoretisch fossile Kraftstoffe vollständig substituieren könnten. Ökobilanzielle Studien zeigen, dass die Energiebilanz von Algenkraftstoffen negativ werden kann. Haupteinflussfaktoren sind das Anbausystem, der Einsatz von Düngern und Kohlenstoffdioxid so wie die Wahl der Aufbereitungs- beziehungsweise Konversionstechnik.

Häufig wird bei der ökonomischen und energiebilanziellen Betrachtung auch vernachlässigt, dass die Mikroalgen tagsüber Masse auf- und nachts wieder abbauen und dass die Lipidproduktion nur bei Wachstumslimitierung erfolgt, also die Biomasseproduktion nicht die bekannten Maximalwerte erreicht. Ein bis dato nicht detailliert betrachteter Kostenfaktor ist die Reinigung von Anlagen, der stark in Abhängigkeit von Anlagentyp und Nährstoffzufuhr variiert. Einen auch energetisch vorteilhaft erscheinenden Ansatz stellt die Nutzung von Abwässern als Nährstoffquelle dar.

Als Ergebnis dieser Betrachtungen lassen sich die meisten Konzepte mit dem Ziel der primär auf Kraftstoffe ausgerichteten Produktion sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht nicht sinnvoll darstellen. Es verbleiben im Wesentlichen die in Kap. 4.2 beschriebenen Optionen.

Sowohl aus technischer Sicht als auch im Hinblick auf die ökologisch-ökonomische Bewertung besteht noch großer Forschungsbedarf.

5.3.3 Lignocellulose-Bioraffinerie und Grüne Bioraffinerie

Lignocellulose-Bioraffinerie

Von den im Rahmen dieses Dokumentes näher betrachteten Beispielen zu Verfahrenstypen einer Lignocellulose-Bioraffinerie (vgl. Kapitel 4.3) wird im Folgenden zunächst auf die Verwertung von Stroh über einen hydrothermalen Aufschluss nach dem Sunliquid-Verfahren (Beispiel 7) und dann von Holz über den Organosolv-Aufschluss (Beispiel 8) eingegangen. Während für das Beispiel 7 eine erste quantitative Abschätzung vorgenommen wird, erfolgt für Beispiel 8 nur eine qualitative Einordnung.

Das betrachtete Beispiel 7 einer Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis von Ernterückständen wird 2012 im Demonstrationsmaßstab erprobt, indem ca.

4.500 Tonnen Rohstoff pro Jahr zur Produktion von ca. 1.000 Tonnen Ethanol eingesetzt werden sollen. Das Verfahren ist nach dem *Top-down*-Konzept gestaltet, d. h. zielt auf eine eigenständige Anlage ab, die in Rohstoffnähe gebaut wird. Als Rohstoff sollen Ernterückstände wie zum Beispiel Weizenstroh zum Einsatz kommen, die unkonditioniert im Mittel aus ca. 50 km Entfernung zum Bioraffineriestandort transportiert werden. Hauptprodukte dieses Bioraffineriekonzeptes sind Ethanol und das im Rohstoff enthaltene Lignin, welches thermisch verwertet und die so erhaltene Energie für den Eigenbedarf der Anlage eingesetzt wird. Als Koppelprodukt wird Mineraldünger erzeugt. Als mögliche Größenordnungen für avisierte industrielle Anlagen wird mit ca. 250.000 bis 750.000 Tonnen (atro⁶⁶) Rohstoffeinsatz pro Jahr gerechnet.

Für das beschriebene Realisierungsszenario wird im Folgenden eine erste quantitative ökonomische und ökologische Abschätzung getroffen. Es ist darauf hinzuweisen, dass diese dem Entwicklungsstadium geschuldet mit erheblichen Datenunsicherheiten verbunden ist. Aufbauend auf einer Investitionsschätzung für die Gesamtanlage wird eine Produktionskostenschätzung für das Hauptprodukt durchgeführt, in der investitionsabhängige Kostenarten (Abschreibung und Zinsen, Wartung, Reinigung und Instandhaltung, Verwaltung, Versicherung und Unvorhergesehenes) statisch in Prozent der Investitionssumme abgeschätzt werden. Weiter werden verbrauchsabhängige Kostenarten für Rohstoffe, Hilfs- und Betriebsstoffe, Wasser, Energie und Abwasser berücksichtigt. Um zu einer konservativen

Schätzung für die Produktionskosten zu gelangen, werden keine Erlöse für das Koppelprodukt Mineraldünger berücksichtigt. Ebenso wird auch eine nach Weiterentwicklungen und Verfahrensoptimierungen ggf. mögliche weitergehende (stoffliche) Verwertung dann überschüssiger Ligninmengen nicht betrachtet. Die entsprechenden Kalkulationsgrundlagen und Berechnungen finden sich in Tabelle 6 bis Tabelle 8 im Anhang.

Mit der Realisierung dieses Anlagenkonzepts für die Verwertung von beispielsweise 280.000 t/a Stroh wäre mit einer notwendigen Investition in der Größenordnung von 70 Millionen Euro für zukünftig optimierte Produktionsanlagen zu rechnen. Für das Hauptprodukt Ethanol würde dies zu Produktionskosten von ca. 680 €/t⁶⁷ Ethanol führen (Berechnung s. o.), entsprechend 2,5 €-ct/MJ. Ca. 65 % der Produktionskosten entfallen auf die Bereitstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie weitere stoffstromabhängige Kosten (Abwasser). Den mit mehr als 50 % größten Anteil der Gesamtkosten machen die Bereitstellungskosten für das Stroh aus, die mit 75 €/t angenommen wurden. Die restlichen Kosten setzen sich aus kapitalabhängigen Kosten (Zinsen und Abschreibungen 23 %) sowie sonstigen Kosten (11 %) zusammen (siehe Abbildung 28). Eine Variation des Bereitstellungspreises verdeutlicht den großen Einfluss dieses Parameters: Bei einem Strohpreis von 50 €/t Trockensubstanz ergeben sich Produktionskosten von 562 €/t Produkt, bei 100 €/t sind es 797 €/t Produkt.⁶⁸ Die Gegenüberstellung mit den Preisen für Ethanol aus Rotterdam von rd. 750–800 €/t⁶⁹ in 2011 erlaubt eine Einordnung

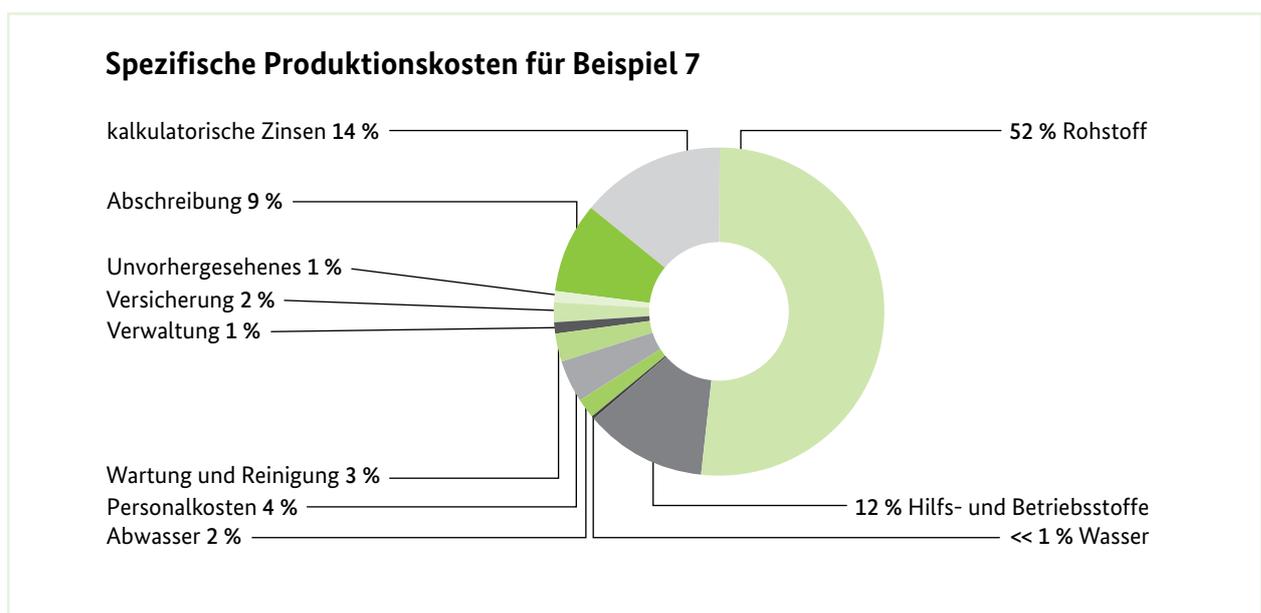


Abbildung 28: Zusammensetzung der spezifischen Produktionskosten für Ethanol in einer Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis von Stroh (Beispiel 7)

dieser Produktionskosten in die aktuellen europäischen Marktgegebenheiten.

Eine Vergleichsgröße für diese Produktionskosten kann das Referenzsystem „Benzinbereitstellung und 100 %-Nutzung in einem Mittelklasse-Pkw mit Ottomotor“ darstellen. Dieses besitzt für das Jahr 2010 einen Bereitstellungspreis⁷⁰ von 4,2 €-ct/MJend (entspricht 1.722 €/t Benzin). Damit liegen die Preise für Bioethanol derzeit in gleicher Größe wie die Handelspreise für Ottokraftstoff in Rotterdam.

Für eine erste ökologische Einordnung wird das vorgestellte Konzept ebenfalls mit der Bereitstellung und Nutzung von Ottokraftstoff verglichen.⁷¹

Durchgeführt wird eine erste Abschätzung der Umweltwirkungen (midpoints) bezüglich Treibhauspotenzial (GWP100) und Versauerung sowie für den kumulierten nicht-erneuerbaren Energieverbrauch (KEV_{nichterneuerbar}) als Indikator für den Ressourcenverbrauch nicht erneuerbarer Primärenergieträger.⁷² Berücksichtigt wird dabei die gesamte Wertschöpfungskette vom Anbau über die Bereitstellung des Rohstoffes, dessen Konversion in der Bioraffinerie bis hin zur Nutzung des Ethanol als Kraftstoff im Fahrzeug.^{73, 74, 75}

Es wird angenommen, dass bei der Herstellung von Bioethanol Emissionen ausschließlich für die Bereitstellung der Hilfs- und Betriebsstoffe anfallen (Ernte und Transport des Rohstoffs (50 km), Wasserbereitstellung, Bereitstellung von Chemikalien). Da die gesamte Prozessenergie aus der energetischen Nutzung des Lignins gedeckt werden kann, entstehen hier keine weiteren Emissionen aus fossilen Energieträgern. Unter diesen Voraussetzungen würden sich Einsparungen von 98 % der Treibhausgase, 40 % der

versauernden Emissionen und 96 % des KEV_{nichterneuerbar} gegenüber dem Referenzsystem erzielen lassen (siehe Abbildung 29).

Gegenüber existierenden Biomassennutzungen ermöglicht das Verfahren mit einer stofflichen Nutzung der Cellulose- und Hemicellulosefraktion sowie einer prozessintegrierten, energetischen Nutzung der Ligninfraktion zur Bereitstellung von Prozessenergie eine nahezu vollständige Nutzung des Rohstoffs. Es entstehen kaum zusätzliche Kosten und Emissionen für die Bereitstellung der Prozessenergie. Da das Stroh als Ernterückstand anfällt, werden keine direkten Landnutzungsänderungen hervorgerufen.

Zusammenfassend zeigt diese Einordnung, dass das Verfahren einerseits das Potenzial zeigt, aus wirtschaftlicher Sicht hinsichtlich des Ethanolpreises mit Benzin konkurrieren zu können, wenn die derzeit gültige Steuerbefreiung erhalten bleibt. Entscheidend ist dabei die Rohstoffversorgung. Dabei besitzt das betrachtete Verfahren durch eine vergleichsweise kleine Größe und das Konzept einer alleinstehenden Anlage den Vorteil, eine Produktion in Rohstoffnähe zu ermöglichen. In den betrachteten Wirkungskategorien Treibhauspotenzial, Versauerung und nicht-erneuerbarer Energieverbrauch werden durch die erste Abschätzung der Umweltwirkungen deutliche Potenziale für eine Umweltentlastung aufgezeigt. Über eine allgemeine ökologische Vorteilhaftigkeit kann noch keine Aussage getroffen werden, da die ökologische Bewertung derzeit nur unvollständig erfolgen kann. Zur Realisierung der aufgezeigten Potenziale sind die zugrunde gelegten Annahmen hinsichtlich der Maßstabsvergrößerung zu erfüllen. Hierzu können auch Weiterentwicklungen zur Produktion weiterer

Vergleich von ausgewählten Umweltwirkungen für Beispiel 7

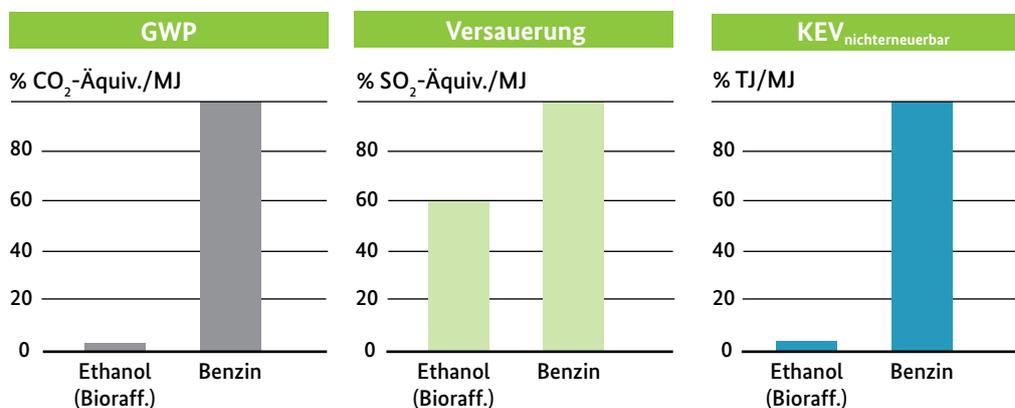


Abbildung 29: Treibhauspotenzial, Versauerungspotenzial und KEV_{nichterneuerbar} für Bioethanol aus einer Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis von Stroh (Beispiel 7) im Vergleich zu herkömmlichem Otto-Kraftstoff

Produkte auf Basis der Cellulose und Hemicellulose-Komponenten sowie einer stofflichen oder energetischen Verwertung der Ligninfraktion sowie die Vermarktung der Mineraldüngerfraktion dienen.

Auch Beispiel 8 für eine Lignocellulose-Bioraffinerie, dem Verfahrensweg über den Organosolv-Aufschluss und enzymatischer Hydrolyse ist derzeit noch nicht im industriellen Maßstab realisiert. Nach einem Pilotprojekt wird derzeit an einer Weiterentwicklung des Verfahrens und dem Bau einer Pilotanlage am Standort des Fraunhofer CBP im Chemiapark Leuna gearbeitet. Durch das Pilotprojekt und dessen Fortführung liegen jedoch Daten hinsichtlich einer ökonomischen und ökologischen Einordnung einer industriellen Anlage dieses Verfahrenstyps vor.⁶¹ Auf diesen basiert im Wesentlichen die folgende Einordnung.

Gegenüber herkömmlichen Nutzungspfaden für Biomasse zielt das Verfahren auf eine möglichst vollständige Nutzung von Holz bislang noch nicht vollständig genutzter Sortimenten und stellt einen alternativen Weg zur Bereitstellung von Zuckern als Fermentationsrohstoffe dar. Neben den Substitutionsmöglichkeiten von fossil-basierten Produkten über Fermentationsprozesse soll mit dem schwefelfreien Lignin auch eine Alternative für auf fossil-basiertem Wege produzierte Stoffe wie beispielsweise Aromaten bereitgestellt werden.

Das Anlagenkonzept sieht eine Einbindung in einen bestehenden Industriekomplex vor, um die teils in Lösung vorliegenden Produktströme direkt weiterverarbeiten zu können. Eine solche Einbindung und die gesicherte Versorgung mit dem Rohstoff Holz (Sicherstellung der Menge, Preis und Transportentfernung) sind daher wesentliche Erfolgsfaktoren für die Realisierung des Verfahrenstyps. Die Größenordnung einer solchen industriellen Realisierung wird bei einer Verarbeitung von ca. 300.000 bis 500.000 Tonnen Holz (atro) pro Jahr gesehen.

Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hängt im Besonderen von einer Reihe von Faktoren ab. Neben der bereits angesprochenen Einbindung in einen bestehenden Industriekomplex und die Bereitstellung des Rohstoffs steht die Validierung der Annahmen und die Realisierung der bislang im Labor- und Technikumsmaßstab erzielten Ausbeuten auch im industriellen Maßstab sowie die hochwertige stoffliche Nutzung der drei Produktfraktionen Glucose, (Oligo)pentosen, insb. Xylose, und vor allem des Lignins im Vordergrund. Weitere besonders relevante Kostenpositionen sind die Bereitstellung

von Energie und Lösungsmitteln sowie Enzymen. Werden die technischen Bedingungen erfüllt und wird eine hochwertige stoffliche Verwertung des Lignins erreicht, erscheint die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens möglich.

Eine ökologische Bewertung der Kette vom Rohstoff bis zum Fabrikausgangstor (cradle-to-gate-Analyse) hinsichtlich der Wirkungskategorien Klimaänderung, Versauerung und Eutrophierung mit Methoden der Ökobilanzierung (ISO 14040 und ISO 14044) nach CML⁷⁶ wurde für die Produkte Glucose und Xylose (fermentierbarer Zucker) sowie Lignin durchgeführt. Der Vergleich zu Referenzprozessen (Herstellung von Zuckerrohsaft aus Zuckerrüben und Phenol aus Cumol über den Hock-Prozess) zeigte in allen drei betrachteten Wirkungskategorien deutliche Vorteile des Verfahrens (insgesamt ca. 40 % weniger CO₂-Äquivalente, ca. 55 % weniger SO₂-Äquivalente, ca. 65 % weniger PO₄-Äquivalente). Die Hauptbeiträge zu den betrachteten Klimawirkungen gehen auf die Bereitstellung von Dampf- und elektrischer Energie zurück. Hinsichtlich versauernder Effekte sind zunächst die Bereitstellung von Betriebsmitteln, insbes. Lösungsmittel und Enzyme vor der Bereitstellung elektrischer Energie zu nennen. Die Betriebsmittelbereitstellung, vor allem die Enzyme, dominieren zudem auch die eutrophierende Wirkung. Für allgemeine Aussagen zur ökologischen Vorteilhaftigkeit sind jedoch auch hier weitere Untersuchungen notwendig.

Grüne Bioraffinerie

Im Rahmen der Erstellung dieses Dokuments wurde ein kombinierter Prozess zur Verarbeitung von 91.000 t/a (20 % Trockensubstanzgehalt) Grünschnitt und Silage auf der Grundlage von experimentellen Ergebnissen erarbeitet (vgl. Kapitel 4.3, Beispiel 9).

Eine solche Anlage würde typischerweise rohstoffnah am Standort einer Biogasanlage errichtet, um einerseits vorhandene Infrastruktur zu nutzen und andererseits entstehende Reststoffe verwerten zu können. Ausgehend von einem mittleren Ertrag (8 t TM/ha·a), 50 % frisch zu verarbeitender Biomasse und 50 % siliierter Biomasse (10 % Silierverlust unterstellt) würde eine solche Bioraffinerie ca. 2.300 Hektar Grünland benötigen. Da im Umkreis einer Bioraffinerie vermutlich nicht nur Grünland zu finden sein wird, sondern auch bessere Böden für Getreideanbau, ist mit einem größeren Einzugsradius zu rechnen. Aufgrund der mehrfachen Ernteschnitte pro Jahr ist dies mit logistischen Herausforderungen verbunden.

Bei einer Realisierung einer Grünen Bioraffinerie der genannten Größenordnung ist mit Investitionen von ca. 15 Millionen Euro zu rechnen. Als Hauptkostentreiber sind die Bereitstellung von Rohstoffen und Energie zu erwarten. Für die Bewertung spielt insbesondere das breite mögliche Produktspektrum aus weißen Proteinen, Futtermitteln, Lysinlactat und Fermentationsmedien eine große Rolle. Für solche Produkte sind hochpreisige Absatzmöglichkeiten denkbar, es existieren aber sowohl im Hinblick auf Marktgrößen als auch die erzielbaren Erlöse hohe Unsicherheiten. Für weitergehende Aussagen und einen Vergleich mit existierenden Referenzsystemen sowohl hinsichtlich der Kosten als auch hinsichtlich der Umweltwirkungen wären weitergehende Ausarbeitungen des technischen Konzepts, der Definition von Referenzprodukten sowie detailliertere Bewertungsstudien notwendig.

5.3.4 Synthesegas-Bioraffinerie

Synthesegas-Bioraffinerien zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL)-Kraftstoffen und Chemikalien sind derzeit noch nicht im kommerziellen Maßstab am Markt vertreten. Da die Herstellung von BtL-Kraftstoffen und Chemikalien komplexe und kostenintensive Technologien erfordert, wird die Produktion in großen Anlagen erfolgen, um Größendegressionseffekte zu nutzen und insgesamt wirtschaftlich darstellbar zu sein. Die Kapazität der Anlagen wird in erster Linie durch die Transportwürdigkeit der eingesetzten Biomassearten begrenzt sein. Diskutiert wird – je nach Variante – über Größenordnungen von 500.000 bis 2.000.000 Tonnen Biomasseinsatz pro Jahr. Die Investitionen für Anlagen in dieser Größenordnung bewegen sich zwischen 250 und 1.000 Millionen Euro. Um Vorteile kleinerer Anlagen bzgl. geringerer Transportkosten mit Vorteilen größerer Anlagen hinsichtlich der Größendegression zu kombinieren wird eine Entkopplung und Dezentralisierung mehrerer kleinerer Anlagen für die Biomassevorbereitung diskutiert. Gegenüber herkömmlichen Biomassenutzungen für stoffliche und energetische Zwecke besitzt das Verfahren den Vorteil, dass die Biomasse hier weitgehend vollständig genutzt wird und darüber hinaus die Verwendung von Reststoffen möglich ist.

Nachstehend folgt eine nähere quantitative Betrachtung des Beispiels 10 zu Synthesegas-Bioraffinerien aus Kapitel 4.4. Bei diesem Beispiel ist für die Pyrolyse und Vergasung die Betrachtung an das bioliq-Konzept angelehnt, bei dem diverse Biomassen wie Stroh und Holz verwendet werden können. Anschließend werden davon ausgehend die wichtigsten qualitativen Unterschiede im Vergleich zu den Beispielen 11

und 12 untersucht. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei der vorliegenden ersten quantitativen ökonomischen und ökologischen Einordnung um eine erste Abschätzung handelt, die dem Entwicklungsstadium geschuldet, mit entsprechenden Datenunsicherheiten verbunden ist.

Das betrachtete Szenario zu Beispiel 10 der Synthesegas-Bioraffinerien zur Produktion von Methanol weist eine Kapazität von ca. 450.000 Tonnen (atro) Buchenholzschnitzel pro Jahr auf. Die verwendeten Anlagenkomponenten sind mit Ausnahme der zwei Pyrolyseanlagen für diese Kapazität bereits kommerziell verfügbar, wenn auch für den Einsatz von fossilen Energieträgern als Ausgangsstoff. Die Anpassung der Anlagen auf Biomasse bzw. Buchenholzschnitzel als Ausgangsstoff bringt für die Vergasung und nachgelagerten Prozessschritte aber keine grundsätzlichen Verfahrensänderungen mit sich, stellt jedoch für die praktische technische Umsetzung für Konversionsprodukte auf Biomassebasis sehr wohl eine Herausforderung dar. Die größte Unsicherheit stellt die Pyrolyseanlage dar, da noch keine Anlagen mit den betrachteten Kapazitäten betrieben werden. Weiterhin bestehen Unsicherheiten in Bezug auf die Rohstoffversorgung. Dies betrifft insbesondere die Größe des Einzugsgebiets, das notwendig sein wird, um die beiden benötigten Pyrolyseanlagen mit einem Biomassebedarf von je ca. 225.000 Tonnen Trockensubstanz pro Jahr zu beliefern und zu welchem Preis diese Belieferung durchschnittlich erfolgen kann. Im Folgenden wird von Bereitstellungskosten frei Pyrolyseanlage von ca. 75 Euro je Tonne Trockenmasse ausgegangen.

Insgesamt ist für eine solche Synthesegas-Bioraffinerie mit einer Investition in Höhe von ca. 250 Millionen Euro zu rechnen, um eine einsatzbereite Anlage zu errichten. Den größten Anteil tragen dabei die beiden Pyrolyseanlagen bei, gefolgt von Flugstromdruckvergaser, Rectisol-Wäsche, Luftzerleger, Methanolsynthese und CO-Shift-Reaktor.

Analog zum Vorgehen bei der Lignocellulose Bioraffinerie auf Basis von Stroh (vgl. Kapitel 5.3.3) werden aufbauend auf der Investitionsschätzung die Produktionskosten für das Hauptprodukt Methanol geschätzt. Neben den investitionsabhängigen Kostenarten (vgl. Kapitel 5.3.3) werden verbrauchsabhängige Kosten für den Rohstoff Buchenholzschnitzel, die Hilfs- und Betriebsstoffe, wie Katalysator, Sand, Methanol, Soda sowie für Wasser, elektrische Energie und Erdgas berücksichtigt. Der Personalbedarf wird in Abhängigkeit der Kapazität des Biomasseinputs abgeschätzt.⁷⁷ Die entsprechenden

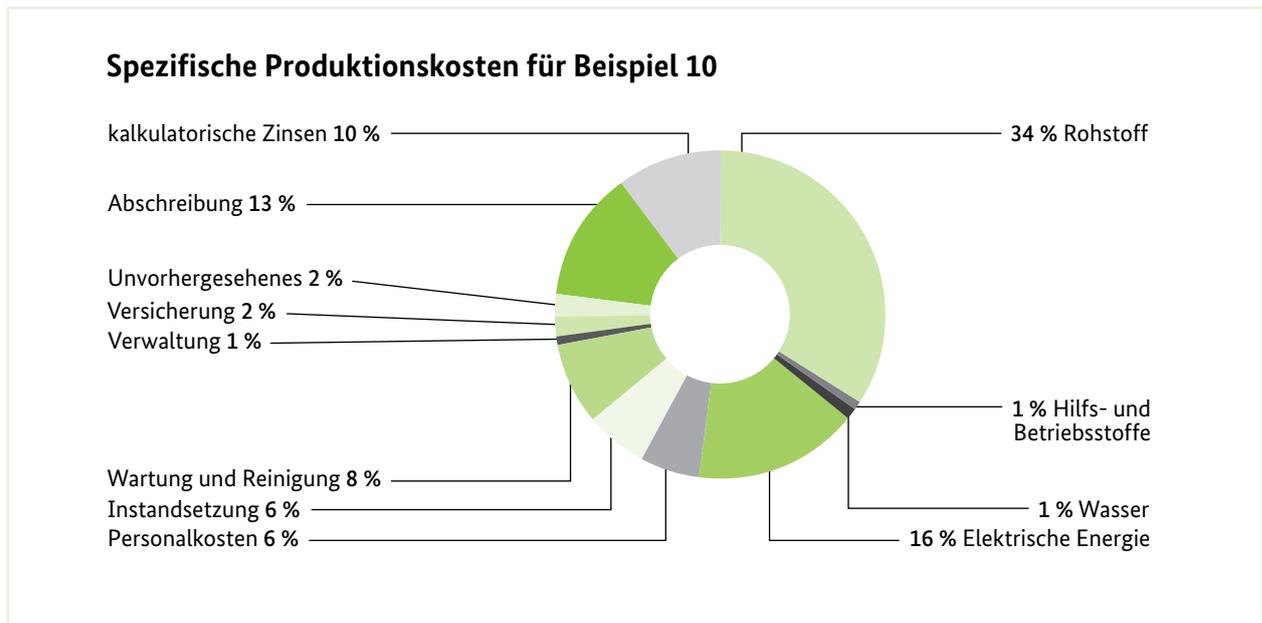


Abbildung 30: Zusammensetzung der spezifischen Produktionskosten für Methanol aus einer Synthesegas-Bioraffinerie (Beispiel 10)

Kalkulationsgrundlagen und Berechnungen finden sich in Tabelle 9 bis Tabelle 11 im Anhang.

Das Ergebnis der Produktionskostenschätzung für das Hauptprodukt Methanol ist in Abbildung 30 in Form der Kostenbestandteile der spezifischen Produktionskosten dargestellt. Das Hauptprodukt der betrachteten Synthesegas-Bioraffinerie stellt Methanol mit einer Jahresproduktionsmenge von ca. 150.000 Tonnen dar, welches unter den getroffenen Annahmen für ca. 680 Euro pro Tonne hergestellt werden könnte. Mit mehr als 30 % den größten Anteil an den Herstellungskosten trägt die Bereitstellung des Rohstoffs Buchenholzschnitzel bei. Die verbrauchsabhängigen Kosten machen in Summe ca. 18 % der Produktionskosten aus. Danach folgen die einzelnen investitionsabhängigen Kostenarten und Personal. Als Ergebnis dieser ersten groben Schätzung der Produktionskosten für biogenes Methanol bleibt festzuhalten, dass es momentan noch nicht konkurrenzfähig zu konventionellem Methanol hergestellt werden kann. Dieses wird aktuell zu Marktpreisen zwischen 300 und 400 Euro je Tonne gehandelt und ist somit noch um ca. 50 % günstiger. Auch hier zeigt sich der große Einfluss der Rohstoffkosten. Bei Zugrundelegung von 50 Euro pro Tonne Trockensubstanz lägen diese bei 600 Euro pro Tonne, bei 100 Euro pro Tonne Trockensubstanz hingegen bei 755 Euro pro Tonne.

Für eine erste quantitative Einordnung der ökologischen Wirkungen der Synthesegas-Bioraffinerie wird das Beispiel 10 mit dem Rohstoff Holz bewertet und mit dem Referenzsystem „fossiles Methanol“⁷⁸ in den Kategorien Treibhauspotenzial, Versauerungspotenzial und kumulierter nicht-erneuerbarer Energie-

verbrauch ($KEV_{\text{nichtererneuerbar}}$) verglichen.⁷⁹ Die Vorgehensweise und Datengrundlage ist analog zu der Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis von Stroh (vgl. Kapitel 5.3.3, Beispiel 7). Die Emissionen (CO_2 -Äquivalente), die bei der stofflichen Umsetzung von Holz zu Methanol entstehen, werden als biogen betrachtet und fließen nicht in die Bewertung mit ein. Ebenfalls nicht betrachtet wird der Einfluss von Katalysatoren. Die benötigte thermische Energie wird durch den Prozess geliefert. Energie für die Erzeugung unterschiedlicher benötigter Drücke von Stickstoff und Dampf sowie die Demineralisierung von Wasser sind in der elektrischen Energie enthalten.

Die Ergebnisse der ersten quantitativen Einordnungen sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Treibhausgasemissionen (GWP) der Pyrolyse-Synthesegas-Bioraffinerie setzen sich zu 75 % aus der Bereitstellung von elektrischer Energie zusammen. Es lassen sich 45 % der Treibhausgasemissionen einsparen. Wird Methanol im weiteren Produktzyklus thermisch verwertet, kann sich insgesamt ein Einsparpotenzial von 85 % der Treibhausgase ergeben.⁸⁰

Eine Gegenüberstellung des nicht-erneuerbaren kumulierten Energieverbrauchs der Synthesegas-Bioraffinerie mit einem konventionellen Herstellungsverfahren zeigt eine Einsparung von 75 %, da in der Bioraffinerie der nicht-erneuerbare Rohstoff Erdgas durch nachwachsende Rohstoffe ersetzt wird (Abbildung 31).

In der Kategorie des Versauerungspotenzials ergibt sich ein Einsparpotenzial der Bioraffinerie von über 40 % SO_2 -Äquivalenten im Vergleich zum Referenz-

Vergleich von ausgewählten Umweltwirkungen für Beispiel 10

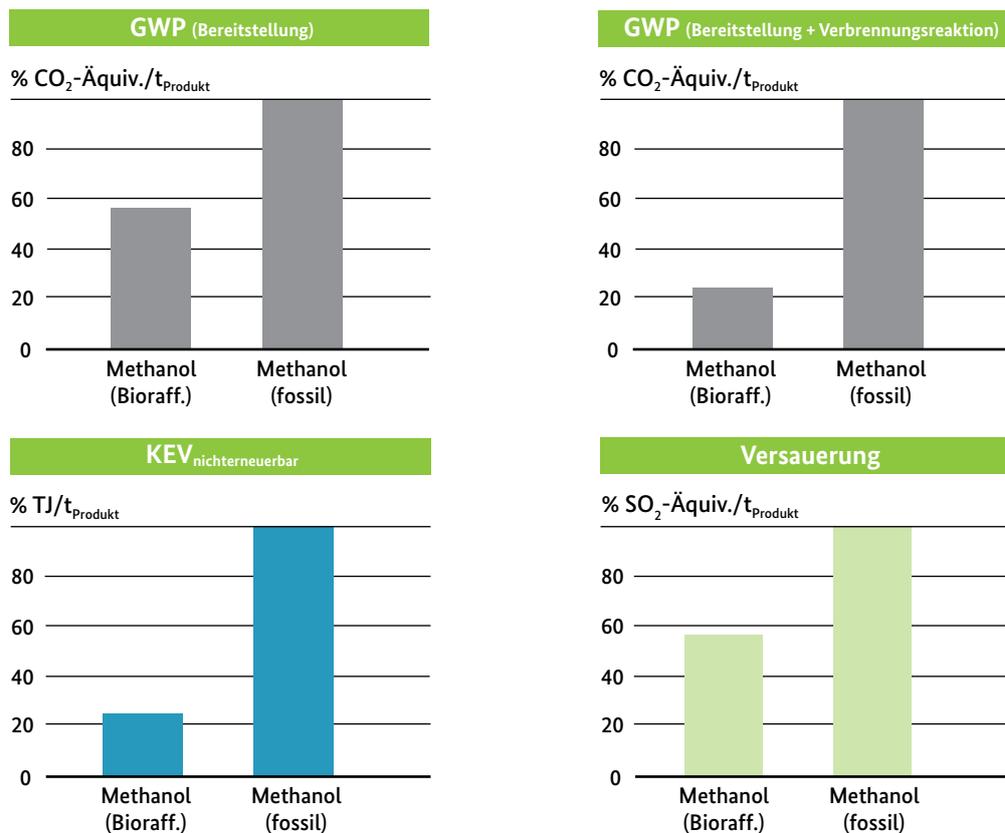


Abbildung 31: Treibhausgasemissionen (Bereitstellung von Methanol ab Werk, Bereitstellung ab Werk + Verbrennungsreaktion), Luftschadstoffe und KEV_{nichterneuerbar} für Methanol aus der Synthesegas-Bioraffinerie (Beispiel 10) im Vergleich zu fossil-basiertem Methanol

system (Abbildung 31). 80 % der Luftschadstoffe werden durch die Bereitstellung von Energie verursacht.⁸¹

Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Unterschiede der verschiedenen in dieser Roadmap betrachteten Konzepte der Synthesegas-Bioraffinerien aus ökonomischer und ökologischer Sicht untersucht.

Die wichtigste Einflussgröße bei der Rohstoffwahl zwischen Holz, d. h. Waldrestholz bzw. Holz aus Kurzumtriebsplantagen, oder agrarischen Reststoffen, d. h. Getreidestroh, als möglichen Einsatzstoffen in einer Synthesegas-Bioraffinerie stellt der Preis für die Biomasse ab Feld bzw. Wald dar. Aufgrund ihrer Transporteigenschaften (vgl. Kapitel 5.2.2) kommt es zu starken regionalen Schwankungen in den Beschaffungskosten der Einsatzstoffe. Erst wenn diese durch langfristige Verträge gesichert sind, können die vergleichsweise kleinen Unterschiede in den einzelnen Prozessschritten Transport, Trocknung sowie Pyrolyse und Vergasung genauer untersucht werden. Bei den Transportkosten im Vergleich zu Stroh liegen leichte Vorteile auf Seiten des Holzes. Durch die höhere volumenbezogene Energiedichte des Holzes weist es

eine höhere Transportwürdigkeit auf. Mehrkosten auf Seiten des Holzes entstehen vor allem durch die der Pyrolyse vorgeschaltete Trocknung, da das Holz zu Beginn der Prozesskette i. d. R. mehr Wasser enthält als Stroh (es wird von ca. 50 % Wassergehalt im Holz gegenüber 15 % Wassergehalt im Stroh ausgegangen).

Als alternativ mögliche erste Umwandlungsschritte von Biomasse zu einem Einsatzstoff für die Vergasung werden in den Synthesegas-Bioraffinerie-Konzepten die Pyrolyse und die Torrefizierung (vgl. Beispiel 11) betrachtet. Im Fall einer Torrefizierung von Stroh könnten durch diese technisch weniger aufwendige Alternative Kosten eingespart werden. Teilweise könnte dieser Kostenvorteil jedoch wieder durch eine komplexere Technik für den Biomasseeintrag für den Flugstromdruckvergaser und die niedrigere Qualität des Strohs im Vergleich zu Holz kompensiert werden. Um eine endgültige Aussagen zu treffen, ist eine detailliertere Gegenüberstellung der Verfahrensalternativen notwendig.

Im Vergasungsschritt kann die Wirbelschichtvergasung (vgl. Beispiel 12) im Vergleich zur Flug-

stromdruckvergasung nur in kleineren Maßstäben umgesetzt werden und daher nicht in gleichem Maße von Größendegressionseffekten profitieren. Allerdings ist die Wirbelschichtvergasung technisch nicht so anspruchsvoll wie die Flugstromdruckvergasung. Durch die niedrigere Vergasungstemperatur in Wirbelschichtvergasern entsteht ein im Vergleich zur Flugstromdruckvergasung minderwertigeres Synthesegas, das in der Regel umfangreicher aufbereitet werden muss, sofern es in denselben Syntheseprozessen eingesetzt werden soll.

Durch die Flexibilität des Endprodukts Methanol hinsichtlich der Verwendung ergeben sich Absatzvorteile, da Methanol als Basischemikalie sowohl für Kraftstoffe als auch weitere chemische Grundstoffe dienen kann und hier bereits weite Verbreitung gefunden hat.

Methanol kann direkt dem Benzin zugesetzt werden. Es weist mit über 100 Oktan Vorteile zur Verbesserung der Klopfestigkeit auf. Zudem kann es als MTBE umgewandelt eingesetzt werden. Methanol ist eine Basischemikalie und Wege selbst zu Propylen und damit zu Polypropylen sind möglich um „grünen Kunststoff“ herzustellen.

Aus ökologischer Sicht verhalten sich die verschiedenen Verfahrenstypen in den drei Beispielen der Synthesegas-Bioraffinerie bei identischem Einsatzstoff hinsichtlich der meisten Umweltwirkungen grundsätzlich entsprechend der jeweiligen energetischen Effizienz, d. h. dass ein Verfahren, das aus energetischer Sicht vorteilhaft ist, auch diesbezüglich vorteilhaft ist.

Unterschiede in den ökologischen Profilen der Verfahrenswege ergeben sich daher neben der Ausgestaltung des Konversionsverfahrens in erster Linie durch die Wahl des Einsatzstoffes.

5.4 Diskussion und Schlussfolgerung

Der ökonomischen und ökologischen Einordnung von Bioraffineriekonzepten kommt eine Schlüsselrolle bei Prozessentwicklung, Investitionsentscheidungen, gesellschaftlicher Akzeptanz und Förderpolitik zu. Mit Methoden der Stoffstromanalyse, Wirtschaftlichkeitsrechnung und Ökobilanzierung können hier prinzipiell entsprechende Beurteilungen, auch im Vergleich zu Referenzsystemen vorgenommen werden. Hierbei sind jedoch die Spezifika von Bioraffinerien zu betrachten. Es fehlt oft an

vollständigen und validen Datengrundlagen zum (künftigen) Rohstoffanbau, den technischen Prozessen und Referenzsystemen für eine Einordnung bzw. einen Vergleich der Analyseergebnisse. Auch methodisch treten andere Aspekte als beispielsweise bei energetischen Biomassenutzungskonzepten in den Vordergrund. Somit sind bislang für viele Bioraffineriekonzepte nur eingeschränkte Bewertungsaussagen, insbesondere im Hinblick auf Umweltwirkungen möglich. Die Betrachtungen in diesem Kapitel der Roadmap kann daher lediglich eine erste Einordnung und Diskussion wesentlicher ökonomischer und ökologischer Bewertungsaspekte geben.

Die Analyse und Bewertung von Bioraffineriekonzepten muss die relevanten Aspekte der Systeme bzw. der Wertschöpfungsketten betrachten. Ein Vergleich möglicher Bioraffinerien muss neben der technischen Anlage auch die Anbau- und Bereitstellungssysteme, Logistik sowie Nutzung und Lebenszyklusende der Produkte berücksichtigen. Ein Vergleich der verschiedenen Konzepte untereinander und mit den Referenzsystemen ist durch die Vielzahl der möglichen Konzepte bezogen auf Rohstoff, logistische Konfiguration, Technologien, Produkte und Märkte, Leistungsklassen und Entwicklungsstände erschwert. Insofern sind auch die Ergebnisse von Einzelbetrachtungen nicht ohne weiteres auf andere Bioraffineriekonzepte übertragbar. Hier sind weitergehende Betrachtungen erforderlich. Vor diesem Hintergrund liefert die Diskussion allgemeiner Bewertungsaspekte, die Betrachtung des Rohstoffanbaus sowie der einzelnen Bioraffineriekonzepte erste Hinweise auf Schlüsselaspekte im Hinblick auf die ökonomischen und ökologischen Erfolgsaussichten der Verfahren.

Analog zu anderen Biomassekonversionsanlagen ist für die meisten Bioraffineriekonzepte die nachhaltige Sicherung der Rohstoffbasis ein kritischer Faktor, d. h. die Bereitstellung der nachhaltig produzierten benötigten Mengen und Qualitäten der Rohstoffe zu vertretbaren Preisen. Hier spielt die Konkurrenz zu bisherigen Nutzungen aber auch verschiedenen in Entwicklung befindlichen Verfahren um die gleichen Rohstoffpotenziale eine wichtige Rolle. Die Diskussion um Bioraffinerien und die Sicherung der notwendigen Rohstoffbasis führt so auch zu einer Diskussion um eine effiziente Allokation von zur Verfügung stehenden agrar- und forstwirtschaftlichen Flächen unter Berücksichtigung einer möglichen Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Weitere Faktoren, die je nach Konzept unterschiedlich zum Tragen kommen, sind die Einbindung in bestehende Chemiestandorte, Energiekosten, sowie Kosten für die Bereitstellung von

Hilfs- und Betriebsstoffen, vor allem Lösungsmittel, Enzyme und Katalysatoren. Zudem ist es wichtig, die angestrebten Prozesseffizienzen (Produktausbeuten, Enzym- und Lösemittelnrückgewinnungen etc.) beim Hochskalieren aus dem bisherigen Entwicklungsstadium in den industriellen Maßstab zu erreichen bzw. zu verbessern. Um die gegenüber herkömmlichen Biomassennutzungen z. T. erheblich aufwendigeren Verfahren wirtschaftlich zu betreiben, ist meist die hochwertige stoffliche Verwertung sämtlicher Produktströme notwendig. Auf Grundchemikalien wie etwa Alkohole abzielen, hat den Vorteil, dass entsprechende Märkte bereits existieren. Allerdings ist die Konkurrenz durch existierende konventionelle Herstellungsverfahren als tendenziell stark einzustufen. Für in der Entwicklung befindliche Verfahren ist die Markteinführung daher bisweilen erschwert. Die Herstellung von Feinchemikalien bietet unter Umständen bessere Möglichkeiten, Produkte zu höheren Preisen abzusetzen. Dem stehen jedoch in der Regel deutlich kleinere Märkte gegenüber, die eine Aufnahme der Produktströme bisweilen problematisch erscheinen lassen. Hier wird es auf die Entwicklung geeigneter neuer Produktstammbäume und Produktportfolios ankommen.

Im Hinblick auf neue Bioraffineriekonzepte ist zudem zu berücksichtigen, dass erste kommerzielle Anlagen einerseits mit erhöhten Investitionen und ggf. noch nicht erreichten Verbrauchs- und Konversionsraten verbunden sein werden. Für das Erreichen einer wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit der Verfahren ist daher vielfach eine weitere Verbreitung notwendig, um Lern- und Erfahrungskurveneffekte zu realisieren.

Die Betrachtungen der Bioraffineriekonzepte zeigen in Bezug auf die genannten Faktoren sehr große Unterschiede, auch innerhalb der Varianten zu den generischen Konzepten. Insofern ist eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Konzepte auch unter Berücksichtigung standortrelevanter Faktoren sinnvoll. Diese würde eine quantitative Beurteilung von Verfahrenskonzepten ermöglichen, könnte Hinweise für die Weiterentwicklung der Verfahren geben und durch den Vergleich mit Referenzsystemen auch Aussagen hinsichtlich einer Vorteilhaftigkeit zu existierenden Wertschöpfungsketten machen.

Dies erfordert sowohl in Bezug auf die Datenbasis als auch hinsichtlich der Methodik umfangreiche weitergehende Studien. Im Bereich der Analyse und Bewertung von Umweltaspekten bedarf es für die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe mehr noch als für die energetische Nutzung vor allem auch

vereinheitlichter Bilanzierungsstandards, um ökologische Kenndaten vergleichbar zu machen.

In Bezug auf die Datenbasis liegen für einige Konzepte bislang erst grobe Abschätzungen der ein- und ausgehenden Stoff- und Energieströme vor. Hier sind weitergehende Ausarbeitungen und Entwicklungen zur Anlagenkonzeption und -auslegung, der Verfahren sowie experimentelle Bestätigungen der Stoff- und Energieströme in größeren Maßstäben notwendig, um zu validen Daten zu kommen. Außerdem fehlen für nachwachsende Rohstoffe disaggregierte Hintergrunddaten für relevante Konversions- und Aufbereitungsverfahren in den existierenden Ökobilanzdatenbanken, aber auch regional und saisonal aufgelöste Stoffstromanalysen für organische Reststoffe in Deutschland. Allgemein sind die z. T. erheblichen Unsicherheiten, mit denen Daten zu den technischen Prozessen, der Bereitstellung der Rohstoffe sowie den ökonomischen Kalkulationsgrößen verbunden sind, dabei zu berücksichtigen.

Um Aussagen zur Vorteilhaftigkeit, sowohl gegenüber existierenden Nutzungskonzepten biogener Rohstoffe als auch fossil bzw. mineralisch basierter Wertschöpfungsketten zu erlangen, bedarf es zudem der Definition geeigneter Referenzsysteme und der entsprechenden Datenbeschaffungen vor allem für stoffliche Produkte sowie für deren künftige Entwicklung bis 2020 und 2030. Für eine Abschätzung, inwieweit Bioraffineriekonzepte Beiträge zur Lösung der Probleme hinsichtlich der Minderung klimarelevanter Emissionen sowie zur Rohstoffsicherung im Kontext von begrenzten Rohstoff- und Flächenpotenzialen und hieraus resultierenden Konkurrenzen liefern können, müssen die zeitliche Veränderung der Kenndaten von Referenzsystemen (Dynamik) sowie regionale, nationale und internationale Aspekte berücksichtigt werden.

Methodische Herausforderungen bei Analyse und Bewertung sind darin zu sehen, trotz der Komplexität der zu beachtenden Faktoren die zu vergleichenden Systeme einfach genug zu halten, um Deutungen zu ermöglichen. Es ist dafür Sorge zu tragen, dass die in vielen Fällen zu erwartenden Zielkonflikte berücksichtigt werden (bspw. durch die Verwendung multikriterieller Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungsverfahren), da die Anzahl der zu betrachtenden Kriterien, Faktoren und Konzepte sehr groß werden kann. Zudem sind die Anforderungen verschiedener Stakeholder mit in die Bewertungen einzubeziehen. Ferner sind insbesondere hinsichtlich der Abschätzung von Umweltaspekten verschiedene methodische Weiterentwicklungen notwendig,

beispielsweise um Aspekte des Flächenbedarfs/der Landnutzungsänderung oder des (regionalisierten) Wasserbedarfs hinreichend zu berücksichtigen. Allgemein sind Ansätze zur geeigneten Berücksichtigung von Datenunsicherheiten und -bandbreiten insbesondere in Bezug auf in Entwicklung befindliche Prozesse notwendig.

Ein Ansatz zur Lösung der genannten Probleme kann eine exemplarische Betrachtung ausgewählter Bioraffineriekonzepte in weiteren Studien mit detaillierten vereinheitlichten Methoden und Grundlagendaten sein. Damit kann eine weitergehende Beurteilung der Vorteilhaftigkeit der angedachten Konzepte im Vergleich zu Wertschöpfungsketten auf Basis fossiler Rohstoffe, aber auch im Vergleich zu herkömmlichen Nutzungen von Biomasse, getroffen werden. Zudem würde diese zu einer Weiterentwicklung der stofflichen Referenzdaten beitragen. Eine vollständige Bewertung und Analyse ist aufwendig, doch unerlässlich; ein zweistufiges Vorgehen (1. Hotspot-Analyse, 2. detaillierte Bewertung) könnte diesen Aufwand jedoch in einem ersten Schritt verringern und einen Beitrag zur Lösung der skizzierten Probleme liefern. Dazu müssten für die Hotspot-Analyse aggregierte Indikatoren ausgewählt werden, die geeignet sind ökonomische Schlüsselgrößen zu identifizieren und auftretende Umweltwirkungen abzubilden, z. B. Carbon Footprint, Water Footprint und Nitrogen Footprint. Unter Berücksichtigung der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie würde nach Abgleich mit relevanten Referenzsystemen dann der Fokus und das Vorgehen für eine detaillierte Bewertung abgeleitet. An passenden Fallstudien, die etwa die in dieser Roadmap betrachteten Beispielkonzepte detaillierter, insbesondere hinsichtlich der in der Hotspot-Analyse identifizierten Schlüsselgrößen, untersuchen, könnten exemplarisch die Fragen von Bedeutung und Einfluss verschiedener Faktoren, etwa des Katalysator- und Enzymeinsatzes, der Wassernutzung oder der Landnutzungsänderungen behandelt und Lösungsansätze entwickelt und diskutiert werden. Insoweit würde dadurch auch ein Beitrag zur Harmonisierung der methodischen Vorgehensweise geleistet. Die im Rahmen solcher Detailstudien ermittelten Daten könnten auch als Basis für regionale, nationale und internationale Systemstudien dienen, die die möglichen ökonomischen und ökologischen Beiträge von Bioraffineriekonzepten wie auch anderen Nutzungskonzepten biogener Rohstoffe abschätzen. Dabei kann auf die Ergebnisse aus abgeschlossenen und laufenden Forschungsvorhaben (z. B. BioCouple⁸², Bioraffinerie2021^{28, 77}) und die in Arbeit befindlichen Analysen zu EU-Projekten²⁶ (z. B. StarColibri²⁷, KACELLE⁸³) aufgebaut

werden. Eine valide Grundlage für die zeitliche Entwicklung der fossilen und mineralischen Referenzsysteme ist jedoch noch zu entwickeln.

Darüber hinaus ist bei der Entwicklung und Umsetzung der verschiedenen Bioraffineriekonzepte bereits frühzeitig und über alle Entwicklungsstadien ein Monitoring ökologischer und sozioökonomischer Effekte zu berücksichtigen, um Fehlentwicklungen schnellstmöglich sichtbar und korrigierbar zu machen.

Von dem Grad, zu dem die dargestellten Aspekte berücksichtigt und Lösungen erarbeitet werden, hängt die Aussagefähigkeit der Bewertung ab. Generell werden die mit der Bewertung verbundenen Unsicherheiten jedoch immer nur zu Schätzungen mit gewissen Bandbreiten führen.

Zu diskutieren ist ebenfalls der Stand und die möglichen Entwicklungsrichtungen von verschiedensten Förderinstrumenten für eine stoffliche Nutzung von Biomasse im Vergleich und im Kontext der Förderungen energetischer Nutzungskonzepte.



6 Herausforderungen zur Etablierung von Bioraffinerien – SWOT-Analyse

In den beiden vorausgegangenen Kapiteln (Kapitel 4 und 5) wurden Bioraffinerien technologisch, ökonomisch und ökologisch eingeordnet und charakterisiert. Basierend darauf erfolgen in diesem Kapitel für die einzelnen Bioraffineriekonzepte eine Stärken-Schwächen-Analyse, eine Abwägung der Chancen und Risiken sowie eine Adressierung von zukünftigen Herausforderungen und Problemen. Dies wird die Grundlage für die Ableitung des Handlungsbedarfs für die Entwicklung und Etablierung von Bioraffinerien im nächsten Kapitel (Kapitel 7) sein.

Der Reifegrad der Bioraffineriekonzepte ist sowohl untereinander als auch bezogen auf die verschiedenen Unterkonzepte sehr heterogen. Der Entwicklungsstand der verschiedenen Bioraffineriekonzepte ist in Abbildung 32 basierend auf dem TRL-Konzept^{84, 85} relativ zueinander dargestellt.

Dabei ist zu beachten, dass alle Bioraffineriekonzepte in diversen Prozess- und Technologiekonzepten umgesetzt werden können, so dass der Entwicklungs-

stand für die daraus resultierenden Varianten von dem hier dargestellten allgemeinen Entwicklungsstand⁸⁵ abweichen kann. Darüber hinaus können Teilkomponenten bereits im Entwicklungsstand weiter sein bzw. außerhalb von Bioraffineriekonzepten technologisch als Einzelprozess ausgereifter sein.

Ferner ist die Technologiereife für die verschiedenen Elemente der Bioraffinerie (einschließlich deren Integration) gleichfalls differenziert zu betrachten. Insbesondere bei der Veredlung zu Chemikalien, Pharmaka, Polymeren und Funktionsmaterialien gibt es hinsichtlich der Produktentwicklung noch umfangreiche offene Fragen. Bioraffinerien werden nicht nur eine stärkere Substitution fossiler Kohlenstoffquellen für die Herstellung einer Reihe bekannter Chemikalien und Energieträger, sondern auch neue Produkte als Teil neuer Wertschöpfungsketten ermöglichen. Mögliche Produkte von Bioraffinerien verdeutlicht Abbildung 33.

Eine detaillierte Analyse der verschiedenen Bioraffineriekonzepte hinsichtlich des aktuellen Ent-

Entwicklungsstand von Bioraffineriekonzepten

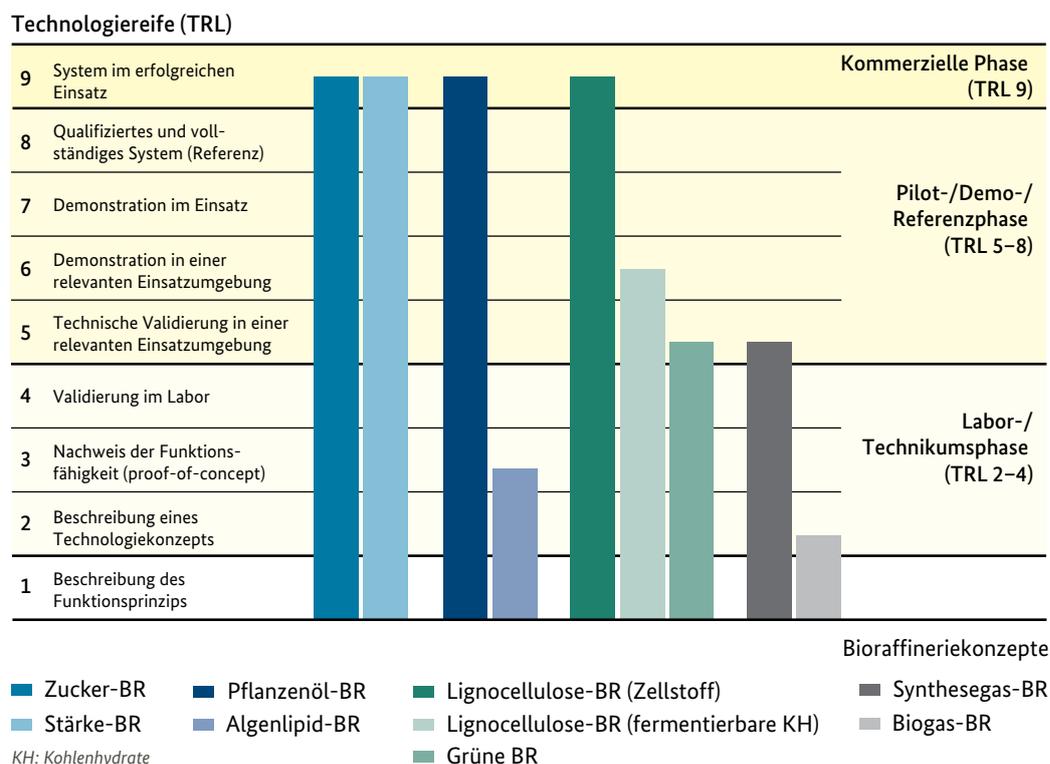


Abbildung 32: Entwicklungsstand^{84, 85} von Bioraffineriekonzepten

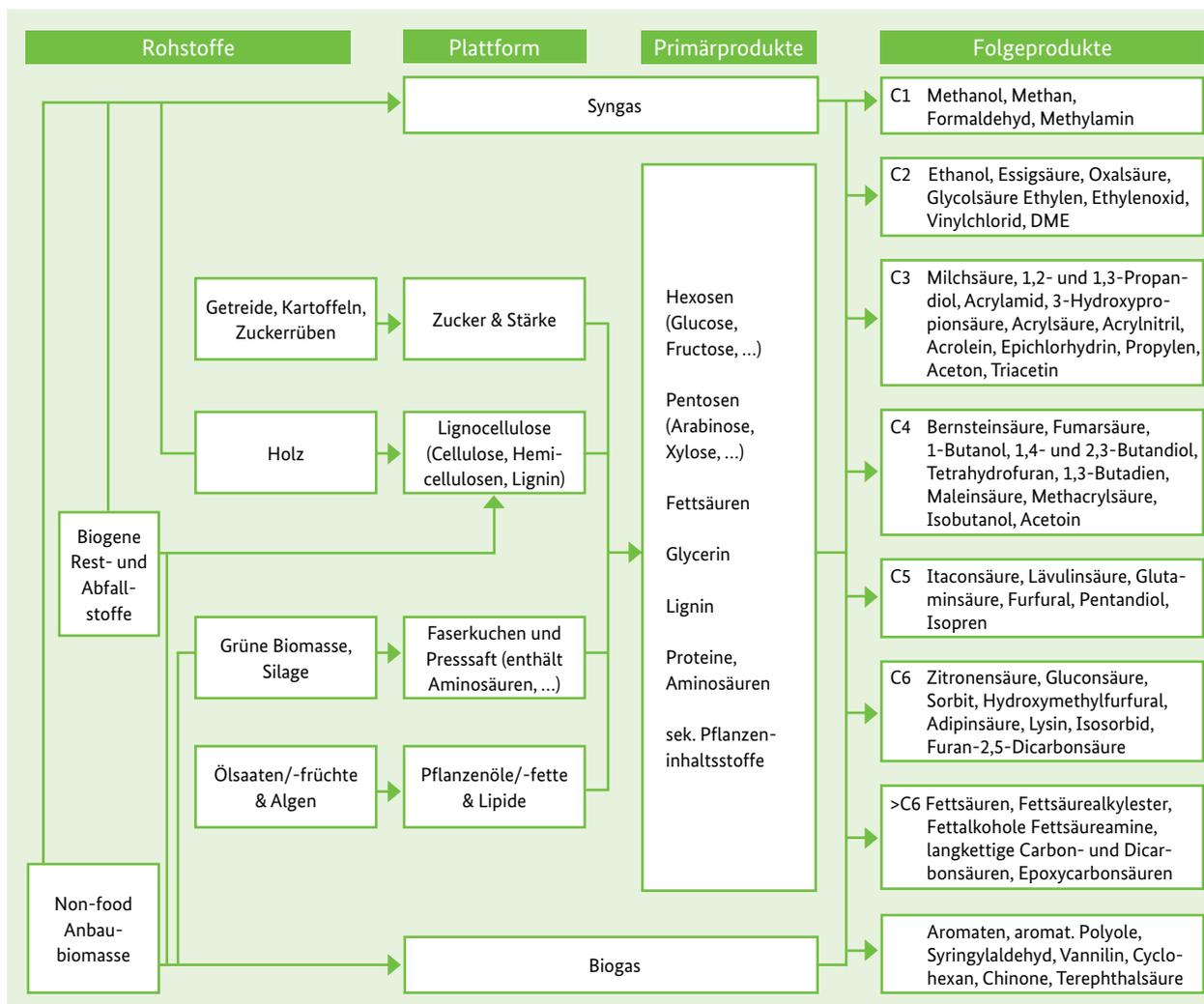


Abbildung 33: Produkte von Bioraffinerien (Auswahl)

wicklungsstands und der Technologiereife sowie mit Bezug auf die zukünftigen Aussichten und die Herausforderungen für eine Umsetzung in den nächsten Jahren bis 2030 wird im Detail nachfolgend erläutert. Dabei fokussiert die Stärke-Schwäche-Analysen primär auf Deutschland. Die Chancen-Risiko-Bewertung ist global ausgerichtet und erfolgt aus deutscher Sicht.

6.1 Zucker- und Stärke-Bioraffinerie

Die Verarbeitung von Zucker- und Stärkepflanzen und die Herstellung von Zucker- und Stärke-basierten Produkten hat eine lange Tradition, verfügt über ausgereifte Technologien und ist in Deutschland seit Jahrzehnten etabliert. Auf der anderen Seite sind Technologien zur chemisch-technischen oder biotechnologischen Konversion von Kohlenhydraten (wie bspw. Glucose, Saccharose und Stärke) teilweise in der chemischen Industrie vorhanden. Auch die Zucker- und Stärkeindustrie selbst produziert bereits in bestehenden Zucker- und Stärkefabriken Folge-

produkte auf Basis der Plattformen Saccharose bzw. Stärke. Durch Forschungsaktivitäten (z. B. in der biotechnologischen Konversion) lassen sich weitere Verwertungsfelder erschließen. Erste Bioraffineriekonzepte sind in einfacher Form mit einem verhältnismäßig geringen Produktspektrum und oft mit geringem Veredlungsgrad verwirklicht oder werden angestrebt (bspw. im französischen Lestrem). Der derzeitige Entwicklungsstand der Zucker- und Stärke-Bioraffinerie ist in Abbildung 34 veranschaulicht.

Stärken:

- es wird auf bereits bestehende Strukturen der Zucker- und Stärkeindustrie aufgebaut
- bereits europäisch aufgestellte deutsche Zucker- und Stärkeindustrie
- starker deutscher Maschinen- und Anlagenbau in relevanten Bereichen, der bereits global orientiert ist
- starke Forschung und Entwicklung in biotechnologischer Konversion von Kohlenhydraten in Deutschland
- Rohstoffe in Deutschland, Europa und global verfügbar

- Erzeugung von Überschüssen in Deutschland bei den Rohstoffen Zuckerrübe und Weizen ist möglich
- technologisch weit entwickelte Primärraffination zu den Plattformen Saccharose und Stärke
- Erfahrungen zur chemischen und biotechnologischen Konversion von Kohlenhydraten sind vorhanden, wobei die Palette an Zwischenprodukten aus der Sekundärraffination erweitert werden muss

Schwächen:

- Produktdiversifizierung noch nicht ausreichend; Veredlung von Zwischenprodukten zu neuen Produkten ist zu verbessern
- integrierte Produktion von biobasierten Produkten und Bioenergie ist ausbaufähig
- Verknüpfung der Zucker-/Stärkeindustrie mit der chemischen Industrie ist unterentwickelt

Chancen:

- Weiterentwicklung bestehender Standorte der Zucker-/Stärkeindustrie über ein *Bottom-up*-Entwicklungsszenario zu integrierten Bioraffineriestandorten
- Zusätzliche Wertschöpfung durch die Integration weiterer chemischer und biotechnologischer Prozesse und Produkte

- Realisierung von Synergieeffekten durch gekoppelte Prozesse
- Exportmöglichkeiten von deutschen Technologien und Anlagen basierend auf Zucker und Stärke zur Errichtung von Zucker- und Stärke-Bioraffinerien im Ausland

Risiken:

- deutsche Zucker- und Stärkeindustrie global in relevanten Standorten (Brasilien, USA, Südostasien) schwach positioniert
- Konkurrenz durch global agierende agroindustrielle Firmen, die vorwärts oder Chemieunternehmen, die rückwärts integriert sind
- Rohstoffverknappung durch zunehmenden Bedarf an Zucker und Stärke für den Nahrungsmittelbereich

Zukünftig gilt es, integrierte Ansätze, in denen verschiedene Zucker- bzw. Stärke-Verarbeitungs- und Veredlungsverfahren in einen Anlagenkomplex zusammengefasst werden, auszubauen und als integrierte Bioraffinerie zu betreiben. Hierbei kommt der Verknüpfung von Primär- und Sekundärraffination sowie der Entwicklung von neuen, höherwertigen Produkten eine Schlüsselrolle zu. Dieser Weg der Diversifizierung und höheren bzw. zusätzlichen Wertschöpfung wird zukünftig konsequent weiterverfolgt

Zucker- und Stärke-Bioraffinerie

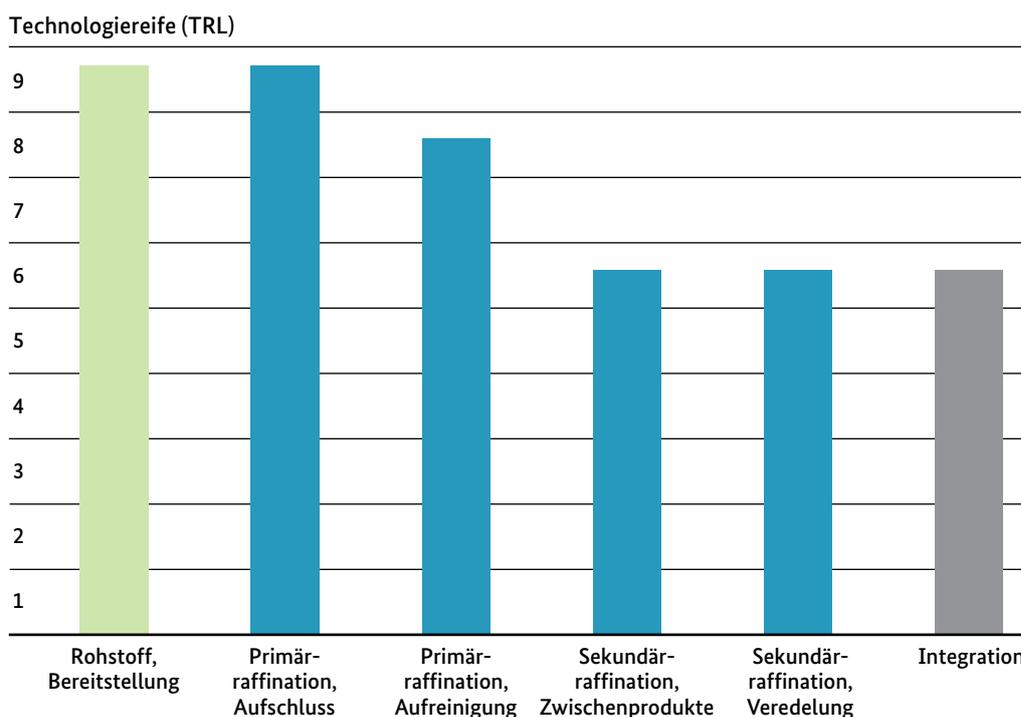


Abbildung 34: Technologiereifegrad (TRL)^{84, 85} der Zucker- und Stärke-Bioraffinerie

werden müssen. Dies wird die Wirtschaftlichkeit verbessern (bspw. infolge Kostensenkungen durch Verfahrensintegration und die Erlöse der unterschiedlichen Produkte). Wichtigstes Ziel ist dabei, dass eine hohe Wertschöpfung unter europäischen Rahmenbedingungen gewährleistet werden kann.

Im Ergebnis werden sich bis 2030 die meisten Standorte der Zucker- und Stärkeindustrie zu Zucker- und Stärke-Bioraffinerien wandeln. Diese Entwicklung hat bereits – auch in Deutschland – begonnen; beispielhaft stehen hierfür die integrierten Standorte in Zeitz (Zucker-Bioraffinerie) und in Krefeld (Stärke-Bioraffinerie).

6.2 Pflanzenöl- und Algenlipid-Bioraffinerie

Pflanzenöl-Bioraffinerie

Die Verarbeitung von Ölpflanzen und die Herstellung von Pflanzenöl-basierten Produkten zur stofflichen und energetischen Nutzung sind in Deutschland seit längerem in der Industrie etabliert, die hier über ausgereifte Technologien verfügt. Andererseits ist bei der chemisch-technischen Konversion von Pflanzenölen neben der Verwendung technischer Öle in der Oleochemie (bspw. bei der Fettkoholherstellung) in den letzten Jahren in großem Umfang die Produktion von Rapsölmethylester (Biodiesel) hinzugekommen. Dabei war die Primärraffination meist von der Sekundärraffination getrennt. Jedoch ist in den letzten Jahren ein Trend hin zu integrierten Anlagen zu beobachten, die die Pflanzenölgewinnung mit der Herstellung eines Produktes (bspw. Biodiesel oder Fettsäuren) verknüpfen. Gegenwärtig sind solche integrierten Anlagen bei Neuanlagen der Standard.

In Bezug auf einheimische Rohstoffe (Rapssaat, Sonnenblumenkerne und ggf. andere Ölsaaten wie Leindotterseed) liefert die Primärraffination ausschließlich langkettige Fettsäuren.⁴³ In der Oleochemie sind aber auch Palmkernöl und Kokosöl wichtige Rohstoffe, da sie kurzkettige Fettsäuren⁴³ enthalten. Diese Rohstoffe müssen jedoch aus tropischen Ländern (bspw. Malaysia, Indonesien) importiert werden. Hier erfolgt die Primärraffination in den Herkunftsländern. Der derzeitige Entwicklungsstand der Pflanzenöl-Bioraffinerie ist in Abbildung 35 veranschaulicht.

Stärken:

- es wird auf bereits bestehende Strukturen der Pflanzenölproduktion und -verarbeitung aufgebaut

- bereits global aufgestellte deutsche Pflanzenölindustrie bzw. global agierende Unternehmen sind in Deutschland engagiert
- starker deutscher Maschinen- und Anlagenbau in relevanten Bereichen, der bereits global orientiert ist
- forschungsintensive KMU zur stofflichen Veredlung von Pflanzenölen vorhanden
- starke Forschung und Entwicklung zur Konversion von Pflanzenölen in Deutschland etabliert
- Rohstoffe für langkettige Fettsäuren in Deutschland, Europa und global verfügbar
- technologisch weit entwickelte Primärraffination zur Plattform Pflanzenöl
- Erfahrungen zur chemischen und biotechnologischen Konversion von Pflanzenölen vorhanden

Schwächen:

- Rohstoffe für kurzkettige Fettsäuren in Deutschland und Europa nicht verfügbar, sondern nur in tropischen und subtropischen Ländern
- wirtschaftliche Herstellung von Folgeprodukten aus Glycerin im Gegensatz zu denen aus Fettsäuren eher unterentwickelt
- Primärraffination und Sekundärraffination oft noch nicht an einem Standort integriert⁸⁶
- integrierte Produktion von biobasierten Produkten zusätzlich zu Bioenergie unterentwickelt

Chancen:

- Weiterentwicklung bestehender Standorte der Pflanzenölverarbeitung (bspw. Ölmühle) über ein *Bottom-up*-Entwicklungsszenario zu integrierten Bioraffineriestandorten
- Zusätzliche Wertschöpfung durch die Integration chemischer und biotechnologischer Prozesse und Produkte auf Basis Glycerin und Fettsäuren
- Exportmöglichkeiten von deutschen Technologien und Anlagen sowie Prozesschemikalien für die Verarbeitung von Pflanzenölen

Risiken:

- global agierende agroindustrielle Firmen, die die gesamte Verfahrenskette vom Rohstoff bis zum Produkt abdecken
- Verlagerung der Herstellung von oleochemischen Zwischenprodukten in außereuropäische, rohstoffnahe Länder; Bioraffinerien mit kurzkettigen Fettsäuren als Plattform entwickeln sich in den Herkunftsländern der Rohstoffe
- Rohstoffverknappung durch zunehmenden Bedarf an Pflanzenölen für den Nahrungsmittelbereich und die Bioenergiebereitstellung; alternative Rohstoffquellen (bspw. Algenlipide, mikrobielle Lipide) noch nicht marktreif

Pflanzenöl-Bioraffinerie (links) und Algenlipid-Bioraffinerie (rechts)

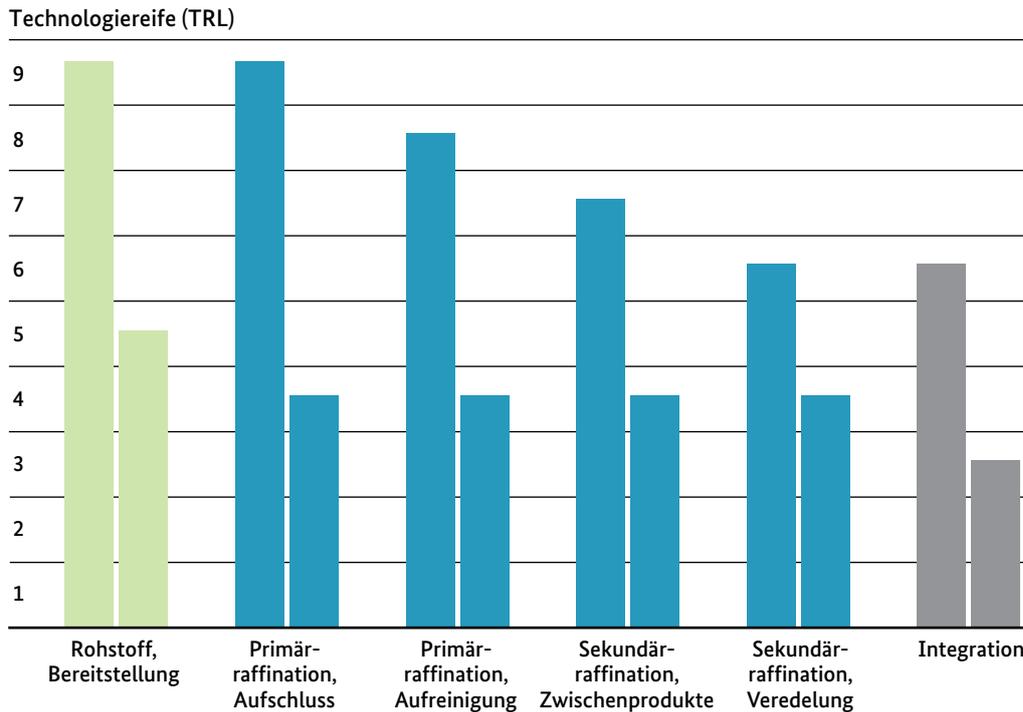


Abbildung 35: Technologiereifegrad (TRL)^{84, 85} der Pflanzenöl- und Algenlipid-Bioraffinerie

Zukünftig wird sich vor dem Hintergrund der bestehenden Strukturen in Deutschland die Entwicklung auf integrierte Bioraffineriekonzepte mit Pflanzenölen aus mehrheitlich langkettigen Fettsäuren konzentrieren. Hier sind durch Veredelung von Zwischenprodukten neue Oleochemikalien zu entwickeln.

Oleochemische Betriebe zur Veredelung von Pflanzenölen sind größtenteils in das Verbundnetzwerk der chemischen Industrie eingebunden und befinden sich in der Regel an Standorten mit ebenfalls auf fossilen Rohstoffen basierender Produktion. Hier werden oft oleochemische Vorprodukte von externen Lieferanten bezogen. Dies wird auch zukünftig so sein. Biomassennutzungspfade mit getrennter Primär- und Sekundärraffination werden daher in der Oleochemie weiter bestehen bleiben. Wo es sinnvoll ist, kann aber eine integrierte Primär- und Sekundärraffination in einem Bioraffineriekonzept erfolgen (wie bspw. bereits heute am Standort Düsseldorf).

Für Pflanzenöle mit kurzkettigen Fettsäuren ist eine entkoppelte Produktion unter Nutzung der Biomassekomponenten an verschiedenen Standorten (bspw. Deutschland: Palmkernöl; Herkunftsland: Palmfruchtfleisch, Reststoffe der Palmkerne) oder die Etablierung von Pflanzenöl-Bioraffinerien in den

Rohstoffproduktionsländern die zweckmäßigere Variante. Erste Ansätze für kommerzielle Pflanzenöl-Bioraffinerien letzterer Art gibt es beispielsweise in Südostasien.

Im Ergebnis wird sich bis 2030 eine differenzierte Entwicklung vollziehen, die sowohl integrierte Wege (und somit Bioraffineriekonzepte) als auch standörtlich getrennte Nutzungspfade der Biomasse umfasst.

Algenlipid-Bioraffinerie

Im Bereich der Algenlipid-Bioraffinerie ist derzeit festzustellen, dass sich die Potenziale dieses Konzepts auf Basis von Algen bisher (noch) nicht wirtschaftlich realisieren lassen. Große Herausforderungen gibt es sowohl bei der Primär- als auch der Sekundärraffination. Bereits die Nutzung von einzelnen Komponenten der Algenbiomasse ist bisher nur in Einzelfällen kommerziell erfolgreich, wobei hier Produkte mit hoher Wertschöpfung und relativ geringer Tonnage vermarktet werden. Der derzeitige Entwicklungsstand der Pflanzenöl-Bioraffinerie ist in Abbildung 35 veranschaulicht.

Stärken:

- starke Forschung und Entwicklung zu Mikroalgen in Deutschland
- forschungsintensive KMU im Bereich der Kulti-

vierung und Nutzung von Mikroalgen einschließlich der Technologieentwicklung (bspw. Photobioreaktoren, Aufarbeitungstechnik)

- starker deutscher Anlagenbau in relevanten Bereichen

Schwächen:

- klimatische Voraussetzungen für die Kultivierung von Mikroalgen in Deutschland nicht optimal
- nur geschlossene Photobioreaktoren in Deutschland anwendbar; Aufwand für die Biomasseproduktion und Aufarbeitung ist derzeit noch hoch und kostenintensiv
- Kreislaufführung und Rückführung der Nährstoffe ist noch nicht gelöst
- ungenügende Lösungsansätze für das Problem, dass eine hohe Produktivität von Mikroalgen einer geringen Konzentration gegenüber steht
- Produktentwicklung und -veredlung unterentwickelt, insbesondere für Produkte, mit denen sich eine hohe Wertschöpfung erzielen lässt

Chancen:

- Erschließung einer neuen Biomassequelle, die unabhängig von Ackerflächen erzeugt werden kann
- hohe Photosyntheseeffizienz ermöglicht eine zu Landpflanzen vergleichsweise hohe Biomasseproduktion in Mikroalgen
- Wertschöpfung durch neue Produkte mit neuen Funktionalitäten und Nutzungsoptionen
- Vermarktung von Produkten mit hoher Wertschöpfung
- Exportmöglichkeiten von deutschen Technologien und Anlagen für die Kultivierung, Auf- und Weiterverarbeitung von Mikroalgenbiomasse

Risiken:

- Deutschland ist geografisch gegenüber andern globalen Standorten für die Mikroalgenkultivierung benachteiligt
- starke, kompetitive Forschung und Entwicklung außerhalb von Deutschland
- leichter Zugang zu FuE-Mitteln und Risikokapital in Nordamerika und Asien in der vorwettbewerblichen Phase

Die Herausforderungen liegen zukünftig klar auf der grundlagen- und anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung und einem eher langfristigen Zeithorizont. Sowohl im mikro- und molekularbiologischen Bereich und in der Kultivierung als auch in der Bioverfahrenstechnik insgesamt sind in der Algenbiotechnologie noch große Lücken zu schließen. Wichtigste Ziele sind, einerseits die Produktivität der Algenproduktion weiter zu erhöhen und anderer-

seits die Aufarbeitungseffizienz deutlich zu erhöhen, um deren Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Erst wenn diese Herausforderungen grundsätzlich gelöst sind, kann die Entwicklung von integrierten Konzepten zur gekoppelten stofflichen und energetischen Produktion von Materialien und Energie auf Basis von Algen erfolgen.

Im Ergebnis wird bis 2030 eine Verbesserung der Technologiereife erfolgen, die auch eine technische Validierung und Demonstration einschließt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird dann eine vollständige Bewertung von Algenlipid-Bioraffineriekonzepten möglich sein. Ferner werden aus etablierten stofflich-getriebenen Algenlipid-Bioraffinerien umfangreiche Erfahrungen vorliegen.

6.3 Lignocellulose-Bioraffinerie und Grüne Bioraffinerie

Lignocellulose-Bioraffinerie²¹

Im Fall der Lignocellulose-Bioraffinerie ist bei der Einschätzung des Entwicklungsstandes bei den Komponenten Cellulose/Hemicellulose zwischen dem Ziel der Zellstoffherstellung und dem der Herstellung von fermentierbaren Kohlenhydraten zu unterscheiden.

Die Zellstoffherstellung ist Stand der Technik und verfügt über ausgereifte Technologien. Bei der Zellstoffherstellung auf Basis des Sulfitverfahrens wurde das Konzept der Lignocellulose-Bioraffinerie bereits verwirklicht (bspw. im norwegischen Sarpsborg und im österreichischen Lenzing). Für die Zellstoffherstellung nach dem Kraft-Verfahren, die im Jahre 2010 weltweit über 90 % und in Deutschland rd. 40 % der Zellstoffproduktion ausmachte, ist trotz des hohen Potenzials der Entwicklungsstand im Hinblick auf Bioraffineriekonzepte wesentlich niedriger.

Das Konzept der Herstellung von fermentierbaren Kohlenhydraten auf Basis von Cellulose und/oder Hemicellulosen war in der Mitte des 20. Jahrhunderts bereits realisiert, aber technologisch-wirtschaftlich nicht ausgereift genug, um gegen die aufkommende petrochemische Konkurrenz zu bestehen. Der Lignocelluloseaufschluss wurde meist für die Zellstoffherstellung, aber nicht für eine nachfolgende Hydrolyse zu fermentierbaren Kohlenhydraten optimiert. Allerdings wird hier somit nicht völlig Neuland betreten, sondern man kann bereits auf Erfahrungen zurückgreifen. Die industrielle Biotechnologie hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht. Der derzeitige Entwicklungsstand der Lignocellulose-Bioraffinerie ist in Abbildung 36 veranschaulicht.

Stärken:

- innovative Chemie- und Biotechnologieunternehmen sind etabliert; es kann auf bereits bestehende Strukturen der Fermentationsindustrie aufgebaut werden
- gut entwickelte deutsche Zellstoffindustrie
- starker deutscher Maschinen- und Anlagenbau in relevanten Bereichen, der bereits global orientiert ist
- starke Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der chemischen und biotechnologischen Konversion von Kohlenhydraten und deren Weiterveredlung in Deutschland vorhanden
- lignocellulosische Rohstoffe in Deutschland, Europa und global prinzipiell verfügbar; nicht genutztes Potenzial land- und forstwirtschaftlicher lignocellulosischer Reststoffe vorhanden
- keine unmittelbare Rohstoffkonkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion bei Nutzung von lignocellulosischen Rohstoffen aus Agrarreststoffen und Waldholz
- Erfahrungen zu Aufschlussverfahren von Lignocellulose zur chemischen und biotechnologischen Konversion von Kohlenhydraten sind vorhanden
- erste Pilot- und Demonstrationsanlagen von Lignocellulose-Bioraffinerien sind in Deutschland in Betrieb oder im Aufbau

Schwächen:

- Konkurrenzsituation bei der Nutzung von einheimischem Waldholz unter Berücksichtigung der multifunktionalen Ansprüche an den Wald können das Rohstoffangebot einschränken
- Synthesegas- und Lignocellulose-Bioraffinerie greifen auf die gleiche Rohstoffbasis zu
- Ligninverwertung ist im Hinblick auf Produkte mit hoher Wertschöpfung noch unterentwickelt
- die alleinige Verwertung der Pentosen aus den Hemicellulosen ist nur in Ansätzen entwickelt
- Aktivitäten zu Bioraffineriekonzepten für die deutsche Zellstoffindustrie unterdurchschnittlich entwickelt
- Integration der einzelnen Elemente der Lignocellulose-Bioraffinerie und deren Validierung im Zusammenwirken noch unausgereift
- Demonstration der Technologien im Einsatz in einem Industriemaßstab steht noch aus
- Verknüpfung mit der Wertschöpfungskette der chemischen Industrie unterentwickelt

Chancen:

- Entwicklung neuer Wachstumsmärkte über ein *Top-down*-Entwicklungsszenario (Konzept fermentierbare Kohlenhydrate)
- Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit und

Weiterentwicklung bestehender Standorte der Zellstoffindustrie durch Diversifizierung und neue Produkte über ein *Bottom-up*-Entwicklungsszenario (Konzept Zellstoff)

- Exportmöglichkeiten von deutschen Technologien und Anlagen basierend auf Lignocellulose zur Errichtung von Lignocellulose-Bioraffinerien im Ausland
- Erschließung einer neuen Quelle für fermentierbare Kohlenhydrate

Risiken:

- konkurrierende Nutzungsoptionen für lignocellulosische Biomasse
- starke, kompetitive Forschung und Entwicklung außerhalb von Deutschland (u. a. USA, Skandinavien)
- leichter Zugang zu FuE-Mitteln und Risikokapital in Nordamerika und Asien in der vorwettbewerblichen Phase
- massive Förderung der Technologie für energetisch-getriebene Lignocellulose-Bioraffinerien für die Bioethanolproduktion in Nordamerika bis in den Produktionsmaßstab; dadurch Verlust des europäischen Technologievorsprunges möglich

Auch bei der Beurteilung der zukünftigen Entwicklung muss zwischen dem Konzept Lignocellulose-Bioraffinerie für Zellstoff einerseits und für fermentierbare Kohlenhydrate andererseits differenziert werden.

Bei der Lignocellulose-Bioraffinerie für Zellstoff sind eine höhere Wertschöpfung aus der Schwarzlaugung (bspw. Lignin-basierte Materialien, Schwarzlaugungsvergasung) und die Verwertung von Nebenprodukten die Hauptzielrichtungen. Letztere kann durch vorgeschaltete (bspw. Vorextraktion, Vorhydrolyse) oder nachgeschaltete (bspw. Extraktion der Abfallströme) Prozesse erreicht werden. Hier liegt zukünftig die Herausforderung bei der Generierung von zusätzlicher Wertschöpfung aus bisher ungenutzten oder nur zur Gewinnung von Strom und Wärme verwendeten Komponenten.

Die Lignocellulose-Bioraffinerie für fermentierbare Kohlenhydrate wird bereits – auch aufgrund ihres Potenzials zur Nutzung lignocellulosischer Reststoffe – intensiv in verschiedenen Varianten und Produkten untersucht. Bei vielen Varianten gibt es jedoch sowohl bei der Primär- als auch der Sekundärraffination hohen FuE-Bedarf. In diesem Zusammenhang ist ein kostengünstiger Lignocelluloseaufschluss ein wichtiges Ziel. Ferner ist eine wertschöpfende Verwertung aller Komponenten zu gewährleisten, wobei

Lignocellulose-Bioraffinerie – Konzept Zellstoff (links), Lignocellulose-Bioraffinerie – Konzept fermentierbare KH (mitte) und Grüne Bioraffinerie (rechts)

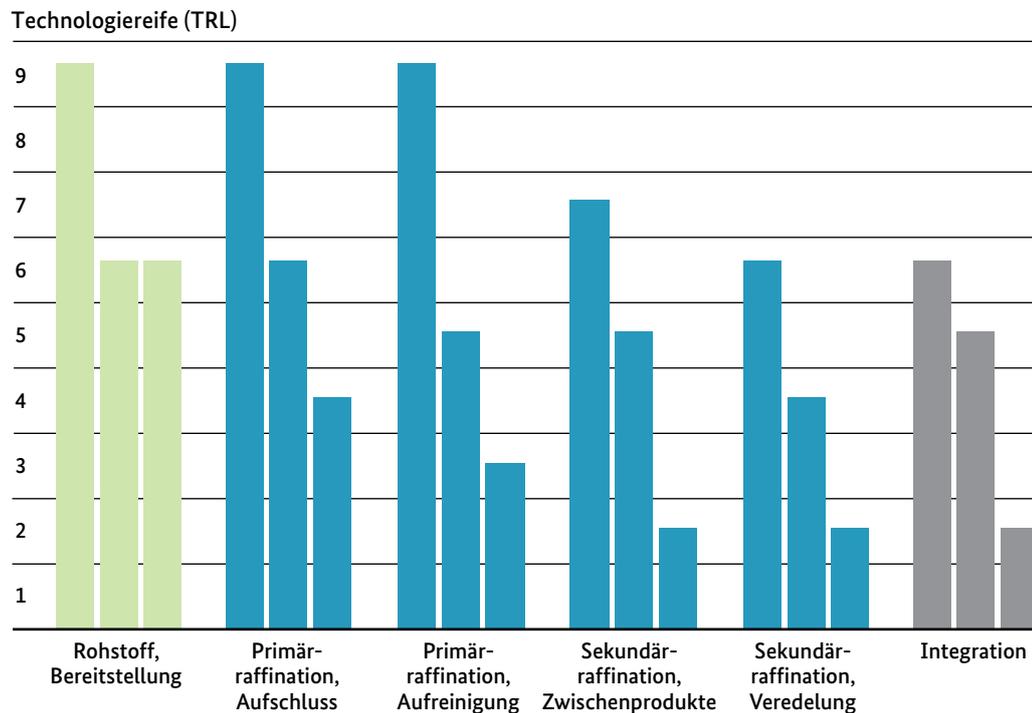


Abbildung 36: Technologiereifegrad (TRL)^{84,85} der Lignocellulose-Bioraffinerie und der Grünen Bioraffinerie

hier insbesondere das Augenmerk auf einer höheren Wertschöpfung für Lignin und Hemicellulosen im Rahmen der Sekundärraffination liegen muss.

Im Ergebnis werden sich bis 2030 viele Standorte der Zellstoffindustrie in Europa zu Standorten mit einem diversifizierten Produktspektrum wandeln. Diese Entwicklung hat bereits in Skandinavien begonnen. Lignocellulose-Bioraffineriekonzepte mit dem Fokus auf fermentierbare Kohlenhydrate werden bis 2030 eine verbesserte Technologiereife aufweisen. Eine technische Validierung und Demonstration wird erfolgen und erste Referenzanlagen sind errichtet worden. Damit entsteht ein mittel- bis langfristiger Investitionsbedarf für den Bau und Betrieb von industriellen Referenzanlagen. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird dann eine vertiefte Bewertung möglich sein. In Deutschland wird dies insbesondere für Lignocellulose-Bioraffineriekonzepte mit dem Fokus auf fermentierbare Kohlenhydrate der Fall sein. Mit den in Deutschland derzeit im Bau befindlichen Pilot- (Leuna) und Demonstrationsanlagen (Straubing) wird dies bereits ersichtlich.

Grüne Bioraffinerie²²

Alle Varianten wurden bisher nur in Teilkomponenten untersucht und nicht als integriertes

Gesamtkonzept umgesetzt. Ferner zeigt die bisherige Entwicklung, dass diese Teilkomponenten immer zusammen mit einer Biogasanlage konzipiert wurden. Außerhalb des Labors erfolgte eine Validierung zumeist als Annexanlage, die in deutlich kleinerem Maßstab betrieben wird. Eine Ausnahme ist hier die Umsetzung der grünen Bioraffinerie in Brensbach in Hessen, wo – weltweit einmalig – eine Demonstration im Einsatz im nahezu industriellen Maßstab erfolgt. Eine Biogasanlage ist in der überwiegenden Anzahl der Konzepte eine notwendige Bedingung – wenn auch allein nicht hinreichend – für den wirtschaftlichen Betrieb einer Grünen Bioraffinerie. Der derzeitige Entwicklungsstand der Grünen Bioraffinerie ist in Abbildung 36 veranschaulicht.

Stärken:

- weltweit führende Forschung im Bereich Biogas-erzeugung
- starker deutscher Maschinen- und Anlagenbau in relevanten Bereichen, der bereits global orientiert ist
- Erhalt von Kulturlandschaft und von ökologisch wertvollen Flächen

Schwächen:

- nur an Standorten und Regionen realisierbar, die

- über ungenutztes Grünland verfügen
- als Konzept nur mit einer Biogasanlage wirtschaftlich umsetzbar
- Aufwand des Downstream Processing bisher zu hoch
- Qualitätsniveau der Produkte oft nicht ausreichend oder nur aufwendig erreichbar, Wertschöpfung aus den Produkten bisher nicht ausreichend
- Konzepte auf Basis frischer grüner Biomasse sind nur saisonal zu betreiben

Chancen:

- Weiterentwicklung bestehender Standorte von Biogasanlagen durch Diversifizierung über ein *Bottom-up*-Entwicklungsszenario
- Möglichkeiten zum Technologieexport

Risiken:

- alternative biogene Zugangsmöglichkeiten zu den Produkten (bspw. Fasern, Milchsäure, Proteine) bestehen
- Exportmöglichkeiten auf Länder mit Grünlandüberschuss beschränkt

Die zukünftige Entwicklung der Grünen Bioraffinerie ist schwierig einzuschätzen, weil diese sich in recht unterschiedlichen Varianten umsetzen lässt. Folglich sind hier ganz verschiedene Herausforderungen bei der Primär- als auch der Sekundärrefinerie zu lösen und somit ergibt sich ein sehr differenziertes Bild der Herausforderungen. Hier ist insbesondere der Nutzungspfad der Faserfraktion des Presskuchens entscheidend, der entweder in einer überwiegend werkstofflichen oder chemisch-technischen Verwertung bestehen kann. Als gemeinsame Herausforderung ist die wirtschaftliche Umsetzung der Grünen Bioraffinerie zu adressieren. Die Nutzung von Teilströmen oder Reststoffen in einer Biogasanlage stellt hingegen keine technische Hürde dar, wobei im Einzelfall jedoch FuE zur technologischen Optimierung oder Verbesserung der Wirtschaftlichkeit sinnvoll ist.

Im Jahre 2030 werden dann umfangreiche Erfahrungen aus der Umsetzung der Grünen Bioraffinerie in Brensbach und auch Erkenntnisse von anderen Standorten (bspw. dem österreichischen Utzenaich und dem deutschen Selbelang) vorliegen, die eine Bewertung der Zukunftsfähigkeit der Grünen Bioraffinerie erlauben.

6.4 Synthesegas-Bioraffinerie

Die Synthesegas-Bioraffinerien sind derzeit noch nicht im kommerziellen Maßstab am Markt ver-

treten. Bisher lag der Fokus auf der Konversion von Synthesegas zu einem Hauptprodukt (bspw. Strom und Wärme oder Biokraftstoffe). Die technische Umsetzung bei der Bereitstellung von Strom und Wärme über die Biomassevergasung ist bereits bis in den Maßstab von Referenzanlagen erfolgt (bspw. im österreichischen Güssing⁸⁷). Die Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL)-Kraftstoffen und Chemikalien auf Basis der Plattform Synthesegas bietet darüber hinaus ein großes Entwicklungspotenzial. Die Entwicklung wird insbesondere durch das Ziel der Substitution von petrochemischen Kraftstoffen durch Biokraftstoffe angetrieben. Damit ist die Synthesegas-Bioraffinerie ein energetisch getriebenes Bioraffineriekonzept. Der derzeitige Entwicklungsstand der Synthesegas-Bioraffinerie ist in Abbildung 37 veranschaulicht.

Stärken:

- starke Forschung und Entwicklung in Deutschland zur Biomassevergasung
- Erfahrungen zur Kohlevergasung und deren Scale-up sind vorhanden und können einbezogen werden
- starker deutscher Maschinen- und Anlagenbau in relevanten Bereichen, der bereits global orientiert ist
- Rohstoffe zur Vergasung in Deutschland, Europa und global prinzipiell verfügbar
- lignocellulose Rohstoffe in Deutschland, Europa und global prinzipiell verfügbar; nicht genutztes Potenzial land- und forstwirtschaftlicher lignocellulose Reststoffe vorhanden
- keine unmittelbare Rohstoffkonkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion bei Nutzung von lignocellulose Rohstoffen aus Agrarreststoffen und Waldholz
- Erfahrungen zur chemischen Konversion von Synthesegas sind vorhanden

Schwächen:

- hoher Rohstoffbedarf in Folge des Erfordernisses großer Anlagen
- Konkurrenzsituation bei der Nutzung von heimischem Waldholz unter Berücksichtigung der multifunktionalen Ansprüche an den Wald können das Rohstoffangebot einschränken
- Synthesegas- und Lignocellulose-Bioraffinerie greifen auf die gleiche Rohstoffbasis zu
- Bau der Anlagen sehr kapitalintensiv
- Integration der einzelnen Elemente der Synthesegas-Bioraffinerie und deren Validierung im Zusammenwirken noch nicht ausgeführt
- Demonstration der Technologien im Einsatz in einem Industriemaßstab steht noch aus

- potenzielle Produktvielfalt bislang noch nicht ausgeschöpft
- biotechnologische Konversion von Synthesegas ist bisher unterentwickelt

Chancen:

- Konzept erlaubt inhärent die nahezu vollständige Nutzung der Biomasse
- mögliche Produktvielfalt auf Basis von Synthesegas ist hoch
- Entwicklung neuer Industrien über ein *Top-down*-Entwicklungsszenario
- Exportmöglichkeiten für deutsche Technologien und Anlagen zur Errichtung von Synthesegas-Bioraffinerien im Ausland
- einfacher und globaler Zugang zur Wertschöpfungskette der chemischen Industrie möglich
- Synthesegas als alternative Kohlenstoffquelle für Fermentationen

Risiken:

- konkurrierende Nutzungsoptionen für lignocellulose Biomasse
- starke, kompetitive Forschung und Entwicklung außerhalb von Deutschland (u. a. USA, Österreich)
- leichter Zugang zu FuE-Mitteln und Risikokapital in Nordamerika und Asien in der vorwettbewerblichen Phase

Die zukünftige Umsetzung von Synthesegas-Bioraffinerien ist eng verknüpft mit der verwendeten Vergasungstechnologie, so dass hier eine vordringliche Herausforderung bei der Primärraffination besteht. Technische Herausforderungen bei Einzelverfahrensschritten und deren Zusammenspiel sind noch nicht gelöst. Hierzu gehört auch die Biomassekonditionierung für die Vergasung und die Gasreinigung. Wichtigstes Ziel ist es, die Effizienz der Erzeugung von Synthesegas in erforderlicher Qualität weiter zu erhöhen und deren Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Ferner gibt es auch Herausforderungen bei der Integration mit den nachfolgenden Sekundärraffinationsschritten. Die Konversion von Synthesegas zu einem Hauptprodukt wird weiter verfolgt werden. Neben der Bereitstellung von Strom und Wärme wird die Erzeugung einzelner Produkte (bspw. Biokraftstoffe) hinzukommen. Somit wird in einem ersten Schritt die Integration in bestehende Wertschöpfungsketten erfolgen (bspw. Schwarzlauevergasung in der Zellstoffindustrie). Darüber hinaus ist für Kraftstoffgetriebene Ansätze die Möglichkeit der Beeinflussung von Kraftstoffcharakteristika (Benzin, Diesel, Flugturbinenkraftstoff) durch die Prozessführung ein wichtiger Treiber, wobei insbesondere die Aussicht zur Produktion von Flugturbinenkraftstoff (Jet fuel) attraktiv ist.

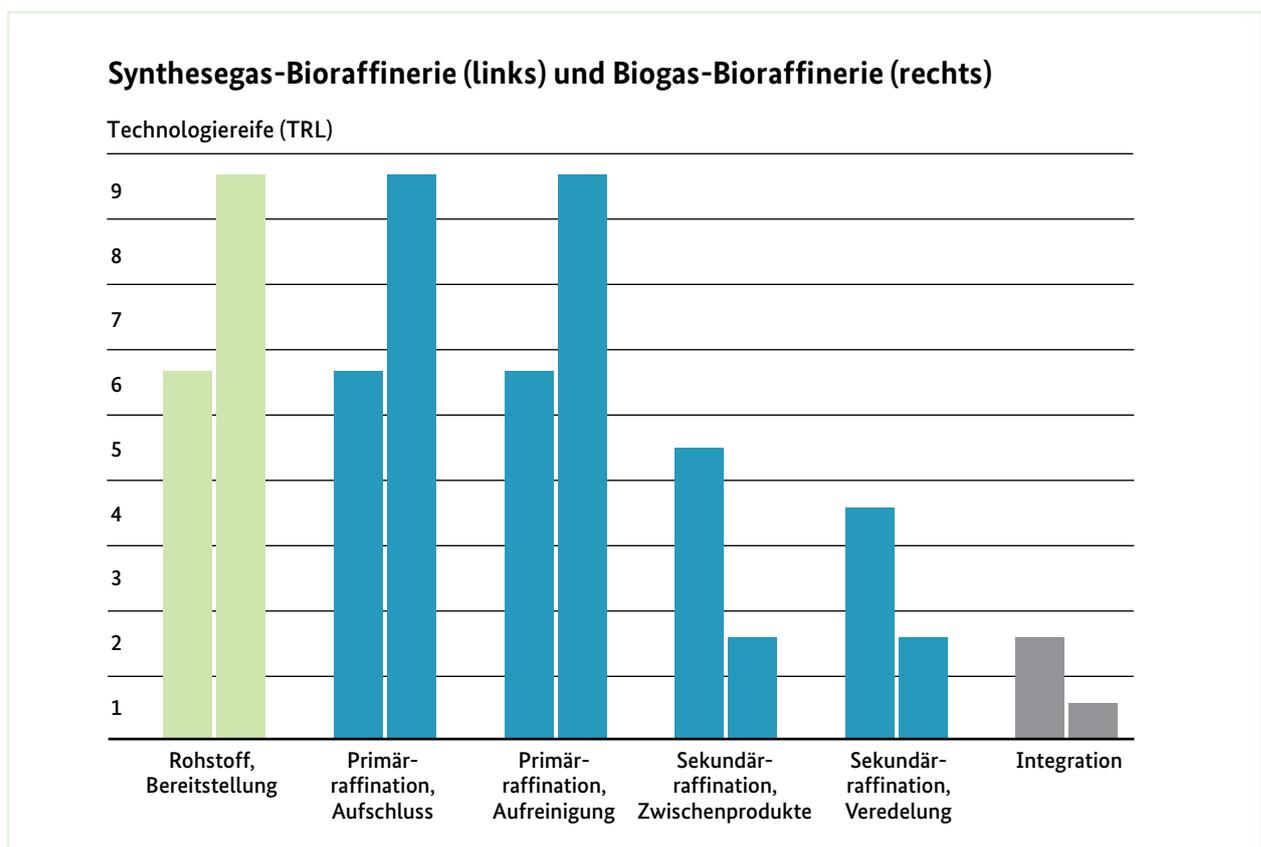


Abbildung 37: Technologiereifegrad (TRL)^{84,85} der Synthesegas- und Biogas-Bioraffinerie

Integrative Konzepte zur Produktion von Chemikalien und Energie werden ein Zwischenprodukt (bspw. Methanol) als Basis für den Aufbau eines chemischen Produktstammbaums nutzen. Da die Herstellung von Kraftstoffen und Chemikalien komplexe und kostenintensive Technologie erfordert, wird die Produktion in großen Anlagen (in einer Größenordnung von 500.000 bis 2.000.000 Tonnen Biomasseinsatz pro Jahr) erfolgen, um Skaleneffekte zu nutzen.

Im Zeithorizont bis 2030 werden zuerst Anlagen zur Biomassevergasung und Synthesegaserzeugung errichtet werden, die sich erst einmal entweder auf die Erzeugung von Strom und Wärme oder die Erzeugung von BtL-Kraftstoffen bzw. Chemikalien konzentrieren. Diese Konzepte sind anfangs noch keine Bioraffinerien. Erst wenn die grundlegenden Herausforderungen gelöst sind und die Vergasungstechnologie auf Basis von Biomasse etabliert ist, kann die Entwicklung von integrierten Konzepten zur gekoppelten stofflichen und energetischen Produktion von Materialien und Energie auf Basis von Synthesegas angegangen werden. Bis 2030 ist aber nur mit wenigen Synthesegas-Bioraffinerien zu rechnen, die eine umfangreiche stoffliche und energetische Produktvielfalt aufweisen.

6.5 Biogas-Bioraffinerie

Im Bereich der Biogas-Bioraffinerie ist derzeit festzustellen, dass sich die Potenziale dieser Plattform bisher (noch) nicht wirtschaftlich realisieren lassen. Bei Biogas steht derzeit nicht die Biogas-Bioraffinerie im Fokus, sondern die konventionelle Erzeugung von Strom und Wärme bzw. nach Biogasaufbereitung die Einspeisung oder Kraftstoffnutzung von Biomethan. Hier ist Deutschland weltweit Vorreiter und ist traditionell gut aufgestellt.

Das Teilsystem Biogaserzeugung (entweder zur Erzeugung von Strom und Wärme oder zur Erzeugung von Biomethan zur Einspeisung in das Erdgasnetz) ist für sich – unabhängig von der Eignung von Biogas als Plattform zur integrierten stofflichen und energetischen Nutzung – ein eigenständiger, zukunftsreicher Biomassenutzungspfad. Dies gilt auch für die Erzeugung von Biogas als Bioraffineriekomponente zur Verwertung von Bioraffinerie-Reststoffen. Bei Konzepten der Biogas-Bioraffinerie sind somit die Biogasproduktion und damit die Primärraffination im Wesentlichen Stand der Technik. Die Realisierung der Sekundärraffination beschränkt sich auf die energetische Nutzung, entweder die Verwendung von Biogas zur Bereitstellung von Strom und Wärme oder von Biomethan für Kraftstoffe. Stoffliche Nutzung von

Biogas am Standort der Biogasanlage erfolgt aktuell nicht. Derzeit erfolgt nur die Einspeisung von Biomethan für diese Verwendungen in das Erdgasnetz. Dies erlaubt eine Weiterverarbeitung an jedem Standort mit Pipelineanschluss und vermeidet mögliche Engpässe aus einer begrenzten standörtlichen Biogasproduktionskapazität. Bei energetischen Nutzungen (Strom, Wärme, Kraftstoff) von Biogas ist der Stand der Technik bereits recht weit fortgeschritten, so dass hier Optimierungen und Weiterentwicklungen im Fokus sind, die jedoch auch unabhängig von einem Bioraffineriekonzept betrachtet werden können. Der derzeitige Entwicklungsstand der Biogas-Bioraffinerie ist in Abbildung 37 veranschaulicht.

Die zukünftige Entwicklung hin zu einer Biogas-Bioraffinerie erfordert erst einmal die Lösung von grundlagen- und anwendungsorientierten Fragestellungen im Hinblick auf stoffliche Nutzungen von Biomethan bei der Sekundärraffination. Hier kann zwar auch auf die Erfahrungen aus der Erdgasverarbeitung zurückgegriffen werden. Ein großes Hemmnis bei der Verknüpfung von Biogasproduktion und Sekundärraffination liegt in der Abstimmung der Anlagenkapazitäten aufeinander. Wichtigstes Ziel ist es hier, auf die standörtliche Biogasproduktionskapazität angepasste stoffliche Anwendungen zu entwickeln, die wirtschaftlich realisierbar sind. Insofern ist es derzeit eine offene Frage, ob die vollständige Nutzung der Biomasse über die Plattform Biogas an verschiedenen Standorten für Chemikalien/Werkstoffe einerseits und Bioenergie andererseits nicht eine bessere Variante ist. Daher gibt es bislang wenig Forschung und Entwicklung zur gekoppelten energetischen und stofflichen Nutzung von Biogas. Eine detaillierte SWOT-Analyse erfolgt aufgrund der geringen Technologiereife nicht.

Aus heutiger Sicht ist nur unter eng begrenzten Rahmenbedingungen eine Biogas-Bioraffinerie vorstellbar. Die Integration einer konventionellen Biogasanlage in einem Chemiepark (bspw. zur Verwertung von biogenen Rest- oder Abfallstoffen) mit der Möglichkeit zur Einbindung in die standörtliche Wertschöpfungskette (bspw. Fermentation mit Biomethan als Kohlenstoffquelle zu einem vor Ort benötigten Zwischenprodukt) wäre ein solcher Fall. Die Integration einer stofflichen Nutzung von Biogas/Biomethan bei einer bestehenden Biogasanlage an einem Solitärstandort erscheint aus wirtschaftlicher Sicht und auch aus technologischen Aspekten beim derzeitigen Stand der Technik nicht sinnvoll.

Im Jahre 2030 sollte auf Basis der dann erreichten Technologiereife eine aktualisierte Bewertung und SWOT-Analyse der Biogas-Bioraffinerie erfolgen.

7 Handlungsbedarf

Die Entwicklung, Etablierung und Marktdurchdringung von Bioraffinerien erfordert umfangreiche Forschung, Entwicklung und Innovation sowie flankierende Maßnahmen. Die Lösung der damit zusammenhängenden Herausforderungen benötigt längere Zeiträume und ist nur durch gemeinsame Anstrengungen aller Akteure zu erreichen. Hierzu sollen einerseits die Kompetenzen aus Wissenschaft und Wirtschaft gebündelt und auf gemeinsame strategische Ziele ausgerichtet werden. Andererseits ist es Aufgabe der Wirtschaft, eigene Forschungs- und Entwicklungsarbeiten voran zu treiben und innovative Verfahren und Produkte zur Marktreife zu führen. Staatliche Hilfen können nur unterstützend wirken.

Hinsichtlich der stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse im Allgemeinen hat die Bundesregierung bereits in den entsprechenden Aktionsplänen^{1,2} und in der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“³ Handlungsfelder beschrieben und Leitlinien der Förderung und Unterstützung dargelegt. Bioraffineriekonzepte sind hier als ein möglicherweise interessanter Biomassenutzungspfad herausgestellt, mit dem – wo möglich und sinnvoll – durch die integrierte Koppelnutzung von Biomasse Effizienzvorteile realisiert werden könnten.



Die technologische, ökonomische und ökologische Analyse sowie die Einschätzungen und Erläuterungen in den vorhergehenden Kapiteln zeigen das Potenzial von Bioraffinerien auf. Zur Erschließung dieses Potenzials ergibt sich sowohl übergeordneter Handlungsbedarf für Bioraffinerien insgesamt als auch Handlungsbedarf für einzelne Elemente der Bioraffinerie. Darin eingeschlossen sind die Identifizierung und Priorisierung wichtiger und notwendiger Forschungsgebiete und Handlungsfelder sowie sonstiger Aktivitäten und Maßnahmen. Der Zeithorizont ergibt sich aus dem Reifegrad der Bioraffineriekonzepte (vgl. hierzu Kapitel 4.6 und Abbildung 32).

Natürlicherweise umfasst der Handlungsbedarf für Bioraffinerien auch Erfordernisse und Maßnahmen, die für verschiedene andere Nutzungspfade von Biomasse von Bedeutung sind und somit nicht nur Bioraffinerien betreffen. Ferner sind Aspekte der Grundlagenforschung (bspw. zu Pflanzenzüchtung oder zur nachhaltigen Agrarproduktion) sowohl für den Food- als auch den Non-Food-Sektor von Bedeutung.

Der nachfolgend beschriebene Handlungsbedarf richtet sich an Entscheidungsträger in universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, Unternehmen, Forschungsförderorganisationen, Verbänden sowie in der öffentlichen Verwaltung.

7.1 Handlungsbedarf für Forschung, Entwicklung und Implementierung

Der übergeordnete Handlungsbedarf für Bioraffineriekonzepte insgesamt und für die einzelnen Elemente der Bioraffinerie einschließlich begleitender Maßnahmen kann wie folgt zusammengefasst werden:

Bioraffinerie insgesamt:

Bioraffinerien bilden einen aussichtsreichen Ansatz für eine effiziente Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Hier kommt der verstärkten anwendungsorientierten Grundlagenforschung zur Entwicklung von geeigneten Bioraffineriekonzepten und deren rascher Überführung in kommerzielle Anlagen große Bedeutung zu, auch um die international gute Ausgangsbasis Deutschlands in diesem Bereich erfolgreich zu nutzen. In den Fällen hoher technologischer Reife von Bioraffineriekonzepten entsteht

ein Investitionsbedarf für den Bau und Betrieb von industriellen Referenzanlagen in Deutschland. Die mit den Vertretern von Politik, Wissenschaft und Wirtschaft erarbeitete „Roadmap Bioraffinerien“ zeigt aussichtsreiche Entwicklungswege für Bioraffinerien auf. Prioritäre Handlungsfelder sind:

- Intensivierung von Forschung, Entwicklung und Innovation entlang der gesamten Bioraffinerie-Wertschöpfungskette vom Rohstoff über die Verfahren und Prozesse der Primär- und Sekundärraffination bis zum Endprodukt
- Umwandlung und Umrüstung bestehender, geeigneter Biomassekonversionsanlagen zu Bioraffinerien mit integrierter stofflicher und energetischer Nutzung nachwachsender Rohstoffe
- Zusammenführung von Bioraffinerie-Entwicklungslinien mit dem Ziel, technisch verfügbare, nachhaltige Gesamtkonzepte zu entwickeln, die den sich verändernden Rahmenbedingungen Rechnung tragen
- Überführung von nachhaltigen Bioraffineriekonzepten vom Forschungsstadium in den Technikums-, Pilot-, Demonstrations- und Produktionsmaßstab mit dem Ziel der „Serienreife“ von kommerziellen Anlagen
- Verstärkung der Forschungsk Kooperation zur Entwicklung von Bioraffinerien auf europäischer und internationaler Ebene
- Unterstützung der Schaffung eines einheitlichen Standards und einer konsistenten Datenbasis für ökologische Lebensweganalysen für Bioraffinerien
- Entwicklung und Umsetzung geeigneter Kommunikationsstrategien zur Sicherstellung der gesellschaftlichen Akzeptanz von Bioraffinerien

Bioraffinerie – Rohstoffe:

Zur Sicherung der Rohstoffbasis kommt der nachhaltigen Steigerung von Erträgen hohe Bedeutung zu. Es sind alle verantwortbaren und geeigneten Ansätze zu nutzen, um Nutzungs- und Flächenkonkurrenzen zu reduzieren. Integrierte Konzepte, die die stoffliche und energetische Nutzung im Sinne einer optimalen nachhaltigen Rohstoffnutzung intelligent kombinieren, wie z. B. Nutzungskaskaden in Bioraffinerien sind besonders förderwürdig. Die Anwendung von Nutzungskaskaden soll durch Forschung und Entwicklung sowie Prüfung ordnungsrechtlicher Maßnahmen unterstützt werden. Prioritäre Handlungsfelder sind:

- Sicherung und Erweiterung der Rohstoffbasis in Deutschland sowie nachhaltige Gesamtertragsoptimierung auf der zur Verfügung stehenden Fläche
- Quantifizierung der regionalen und saisonalen

Verfügbarkeit von Biomasse, insbesondere organischer Reststoffe, in Deutschland in Hinblick auf Nachhaltigkeit und Zielkonflikte zwischen stofflicher und energetischer Nutzung sowie auf das Primat der Ernährungssicherheit

- Entwicklung und Verbesserung von industriellen Verfahren der Bereitstellung von qualitativ hochwertiger und kostengünstiger Biomasse für Bioraffinerien
- Erschließung und hochwertige Nutzung neuer oder alternativer, nachhaltiger Rohstoffquellen, einschließlich der Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen in einer Bioraffinerie
- Errichtung von neuen Bioraffinerie-Anlagen auf Basis neuer oder alternativer Rohstoffquellen

Bioraffinerie – Verfahren und Produkte der Primär- und Sekundärraffination:

- Verbesserung der Komponententrennung und des Aufschlusses von Biomasse in Bioraffinerien sowie der Optimierung der hierfür erforderlichen chemischen, biotechnologischen, thermischen und mechanischen Prozesse einschließlich deren Kombination
- Entwicklung neuer und optimierter thermochemischer, chemokatalytischer und biotechnologischer Konversionsverfahren (einschließlich deren Kombination) von land-, forstwirtschaftlichen und marinen Rohstoffen sowie biogenen Rest- und Abfallstoffen für Bioraffinerien
- Anpassung und Optimierung nachgeschalteter Verarbeitungs- und Recyclingprozesse für Produkte (z. B. für Biopolymere)

Bioraffinerie – Nachhaltigkeit:

Um die Nachhaltigkeit der stofflichen Nutzung sicherzustellen, bedarf es neben den Bemühungen um Normen und Standards auf europäischer Ebene der Schaffung internationaler Nachhaltigkeitsstandards. Hierzu gehören auch Standards für Lebensweganalysen zu Klima- und Umweltwirkungen. Mittel- und langfristig sind Instrumente zu entwickeln, um die positiven Schutzwirkungen durch einzelwirtschaftliche Anreize zu stärken. Prioritäre Handlungsfelder sind:

- Methodenentwicklung für die Nachhaltigkeitsbewertung von Bioraffinerien, insbesondere in Bezug auf die nachhaltige Bereitstellung und Konversion der Biomasse aber auch Identifizierung und Quantifizierung von Zielkonflikten wie Landnutzungsänderung, Rohstoffkonkurrenz, Preisdruck auf Nahrungsmittel, Wasserknappheit, etc. und darauf aufbauend
- Quantifizierung des in biobasierten Produkten gespeicherten Kohlenstoffs bzw. Energieeinspa-

- rungen durch deren Nutzung sowie des Beitrags von biobasierten Produkten zu den Zielen der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung
- Identifizierung und Quantifizierung von Zielkonflikten und darauf aufbauende Probleme wie
- Preisdruck auf Nahrungsmittel
 - Wasserknappheit
 - Landnutzungsänderungen
 - Ressourcenschutz
 - Natur-/Biodiversitätsschutz
 - Sozialverträglichkeit

7.2 Forschungspolitischer Handlungsbedarf, Verbesserung der Rahmenbedingungen

Die Bundesregierung hat bereits mit der „Hightech-Strategie 2020“, der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“⁴³ und dem „Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe“⁴⁴ für Deutschland einen geeigneten Rahmen für Forschung, Entwicklung und Innovation geschaffen, der aktuell und auch zukünftig durch Biomasse- sowie Bioraffinerie-orientierte Bekanntmachungen und Ausschreibungen einzelner Ressorts untersetzt wird. Im Chemiapark Leuna (Sachsen-Anhalt) wird im traditionellen Chemiedreieck Halle-Bitterfeld-Leipzig ein modernes Bioraffinerie-Forschungszentrum sowie in Straubing und Karlsruhe werden Demonstrationsanlagen entstehen, welche durch Bund und Land gemeinsam finanziert werden. Im Rahmen der Projekte sollen Verfahren entwickelt werden, um Biomasse für die integrierte Produktion von Chemikalien, Kraftstoffen, Strom und Wärme zu nutzen. Dabei werden sowohl Kooperationspartner aus Wirtschaft und Wissenschaft aus der unmittelbaren Nähe als auch aus anderen Teilen Deutschlands sowie dem Ausland einbezogen.

Um die Bioraffinerie-Technologie in Richtung Praxiseinführung voranzubringen, ist es erforderlich, dass die Bundesregierung die grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung zur stofflichen und energetischen Biomassenutzung auch weiterhin fördert. Im Sinne der Übersichtlichkeit und Klarheit der Förderlandschaft sollten die Bundesressorts ihre jeweiligen Förderaktivitäten und Schwerpunkte dabei weiterhin eng miteinander abstimmen.

Bioraffinerien, die aus verschiedenen Rohstoffen vielfältige Produkte fertigen können, stehen noch

am Anfang der Entwicklung. Die Weiterentwicklung der Konzepte benötigt **Forschungsförderung**. Dabei muss die **gesamte Entwicklungskette** von der Grundlagenforschung über die Prozess-, Technologie- und Produktentwicklung in Bioraffinerien gefördert werden. Im Rahmen der Verbundforschung oder Innovationsallianzen der Industrie mit der Wissenschaft ist die Förderung von Demonstrations- und Pilotprojekten zur Entwicklung von Produktionstechnologien notwendig, in denen die erstmalige Nutzung von neuen Technologien, die bereits im kleineren Maßstab erfolgreich erprobt wurden, unter Beweis gestellt wird. Darüber hinaus ist Forschungsförderung in der **Land- und Forstwirtschaft** erforderlich, um die nötige Verzahnung von Biomasseproduzenten und -abnehmern auszubauen.

Über die Prozess- und Technologieentwicklung hinaus benötigen Bioraffinerien gute **Rahmenbedingungen**, um in Deutschland und international am Markt erfolgreich sein zu können. Insbesondere müssen sie gut in die Wertschöpfungskette integriert sein: Dies betrifft die **Bereitstellung der Biomasse** und die nachgelagerte Wertschöpfung, d. h. die **Verarbeitung der Bioraffinerie-Produkte** in der chemischen und anderen Industrien ebenso wie den **Anlagenbau**. Idealerweise sollten sich die Bioraffinerieprodukte in die bestehenden und bewährten Prozessketten der Industrie integrieren lassen. Zusätzlich bieten sich auch Chancen, neue Produktlinien zu entwickeln.

Bioraffinerien können vielfältige Rohstoffe verarbeiten (z. B. Holz, Stroh, Grünmasse, Fette, organische Abfälle). Voraussetzung für eine wirtschaftliche Produktion ist die technische Machbarkeit ihrer Aufarbeitung und Raffination. Darüber hinaus muss die **Verfügbarkeit nachhaltig erzeugter nachwachsender Rohstoffe** in ausreichender Menge, Qualität und zu **wettbewerbsfähigen Preisen** sichergestellt sein. Hierbei sind Nutzungskonkurrenzen (z. B. Ernährung, Futter, stoffliche und energetische Nutzung, Naturschutz und Ökosystemdienstleistungen) sowie aktuelle Rahmenbedingungen zur Biomassenutzung (wie bspw. die Aktionspläne zur stofflichen und energetischen Biomassenutzung) zu berücksichtigen. Dieses muss in Einklang stehen mit der prioritären Bereitstellung ausreichender, gesunder und sicherer Lebensmittel.

In der von der Bundesregierung vorgelegten „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“⁴³ sowie im „Aktionsplan für die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe“⁴² ist unter anderem vorgesehen, dass Forschung und Entwicklung in der

Pflanzenzucht gefördert werden sollen, um den Einsatz von Biomasse in Deutschland zu verstärken. Die Züchtung optimierter Rohstoffpflanzen zur Steigerung des Biomasseertrags und zur Optimierung der Inhaltsstoffe erfordert alle Methoden der **modernen Pflanzenzüchtung und Pflanzenproduktion**, einschließlich der Pflanzenbiotechnologie. Sie bieten ggf. neue Möglichkeiten der Bereitstellung nachwachsender Rohstoffe bzw. von Biomasse. Dabei spielt sowohl die erreichbare Mengensteigerung als auch die gezielte Herstellung von benötigten Rohstoffen mit vorgegebener Zusammensetzung eine Rolle. Hierzu ist ein sachbezogener Umgang mit den Potenzialen der Grünen Gentechnik und eine verantwortungsbewusste Nutzung gentechnisch veränderter Pflanzen erforderlich.

Für eine ausreichende Rohstoffversorgung ist eine Steigerung der Agrarproduktion erforderlich. Diese muss mittels einer effizienten und ressourcenschonenden Bewirtschaftung erreicht werden, die mit der Bewältigung der Herausforderungen Klimawandel, Umwelt- und Klimaschutz, Wasserverfügbarkeit und Schutz der Biodiversität in Einklang steht.

Bioraffinerieprodukte stehen in Bezug auf Qualität, Wirtschaftlichkeit und Produkteigenschaften in Konkurrenz zu erdölbasierten Produkten. Wettbewerbsfähige Produkte aus Bioraffinerien müssen weiterverarbeitet und veredelt werden. Die chemische Industrie und ihre Abnehmerbranchen können diese wesentliche weitere Wertschöpfung in Deutschland nur bei geeigneten Rahmenbedingungen erzielen. Von der Bundesregierung wird erwartet, **verlässliche**

industriepolitische Rahmenbedingungen für einen wettbewerbsfähigen Standort Deutschland sicherzustellen. Von zentraler Bedeutung sind dabei geeignete Forschungsbedingungen, die Ausbildung von qualifiziertem Nachwuchs, eine wettbewerbsfähige nachhaltige Energie- und Rohstoffversorgung, der ressourceneffiziente Ausbau der Infrastruktur und der Abbau von Handelshemmnissen im In- und Ausland. Eine Ausgewogenheit bei den Rahmenbedingungen im Hinblick auf die energetische und stoffliche Biomassenutzung ist anzustreben.

Die Bundesregierung sollte die Prüfung ordnungsrechtlicher Vorschriften im Hinblick auf den Abbau von Innovationshemmnissen und Markteintrittsbarrieren entlang von Wertschöpfungsketten unter ausgewogener Berücksichtigung wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Belange kontinuierlich prüfen.

Das öffentliche Auftrags- und Beschaffungswesen in Bund, Ländern und Kommunen kann über den Vorbild- und Vorreitereffekt erheblich zur Nachfragesteigerung nach biobasierten Produkten beitragen.

Die Bundesregierung unterstützt über das BMWi die Exportmöglichkeiten der Wirtschaft für biobasierte Produkte und Technologien, bspw. durch das „Programm zur Erschließung von Auslandsmärkten“ sowie die „Exportinitiative Erneuerbare Energien“.⁸⁹ Ferner unterstützt die Bundesregierung über das BMU Forschungsaktivitäten im Bereich der Nachhaltigkeitsbewertung von Bioraffinerien. Zentrales Leitbild dabei ist die **Nachhaltigkeitsstrategie** der Bundesregierung sowie die dort enthaltenen Managementregeln.⁴

Mangelnde Information ist neben der teilweise noch nicht gegebenen Wettbewerbsfähigkeit ein zentrales Markteinführungshemmnis für biobasierte Produkte und Technologien. Daher werden laufende Maßnahmen von Bundesregierung und Wirtschaft fortgeführt und verstärkt. Die Bundesregierung stellt über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe und andere Kommunikationswege des BMELV und des BMBF bereits zahlreiche Beratungs- und Informationsangebote zu nachwachsenden Rohstoffen, zu biobasierten Produkten und Technologien sowie zu Bioraffinerien zur Verfügung, die – auch in Kooperation mit der Wirtschaft – kontinuierlich ausgebaut und verbreitet werden sollen. Die Bundesregierung sollte den Aufbau von Netzwerken zur Informationsvermittlung und zur Stärkung des Technologietransfers zwischen Industrie und Forschung weiter unterstützen.



8 Ausblick

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Globalisierung der Industrie und ihrer Dienstleistungen und der dadurch notwendig werdenden Flexibilisierung ist eine besondere Berücksichtigung von interdisziplinären und hochinnovativen Themen in der Forschungsförderung essenziell. Hierzu gehören die stoffliche und energetische Nutzung von Biomasse; darunter fällt auch die Umsetzung von Bioraffineriekonzepten. Nur durch gemeinsame und fokussierte Anstrengungen aller Beteiligten können diese Ideen zu Innovationen umgesetzt werden und damit einen Beitrag zur Stärkung des Wirtschaftsstandorts Deutschland leisten.

Deutschland als stark technologieorientiertes Land ist in besonderem Maße auf Innovationen angewiesen. Die Verwendung nachwachsender Rohstoffe und biogener Rest- und Abfallstoffe besitzt ein hohes Innovationspotenzial im Hinblick auf neue Technologien und neue Produkte. Dies ist verknüpft mit einer hohen Wertschöpfung durch Erzeugung, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse. Darüber hinaus leistet die nachhaltige Verwendung nachwachsender Rohstoffe sowie biogener Reststoffe und Abfälle wichtige Beiträge zum Klimaschutz, zur Sicherheit der Rohstoffversorgung und zur Ressourcenschonung in Deutschland. Schließlich hilft sie mit, Abfälle, die oftmals teuer zu entsorgen sind, zu vermeiden.

An die jahrzehntelang praktizierte Verarbeitung fossiler Rohstoffe gewöhnt, müssen viele Teile der Industrie den Nutzen nachwachsender Rohstoffe erst wieder erschließen. Technologien für die Verwendung von biogenen Rest- und Abfallstoffen müssen weiter entwickelt bzw. optimiert werden. Für neue Technologien sind Referenzanlagen zu errichten, um eine erfolgreiche Markteinführung zu gewährleisten. Herkömmliche Verarbeitungsmethoden müssen umgestellt und neu entwickelt werden – eine lohnende Aufgabe in Anbetracht der ökologischen Vorteile, aber auch der interessanten Märkte für Produkte auf der Basis von Biomasse. Die Pflanze als Rohstofflieferant gehört zu den als innovationspolitisch besonders wichtig identifizierten Zukunftsfeldern. Die deutsche Industrie, allen voran die chemische Industrie, verarbeitet heute in bedeutendem Umfang land- und forstwirtschaftliche Rohstoffe. Darüber hinaus ist die Holzverarbeitende Industrie ein bedeutender Wirtschaftszweig, der mit dem Rohstoff Holz eine hohe Wertschöpfung erzielt. Bioenergie ist gegenwärtig eine tragende Säule der erneuerbaren Energien.

Die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe ist ein wichtiges Element einer nachhaltigen Rohstoffversorgung. Sowohl ihre traditionelle Nutzung etwa im Holzbau oder in der Papierindustrie wie auch innovative neue Produkte können zum Klimaschutz, zur Einsparung fossiler Ressourcen, zur Sicherung der Rohstoffversorgung und zur Erhaltung und Steigerung von Wertschöpfung und Beschäftigung beitragen. Nachwachsende Rohstoffe bilden die einzige erneuerbare Kohlenstoffquelle, was für die auf kohlenstoffhaltige Rohstoffquellen angewiesene chemische Industrie von besonderem Interesse ist.

Wichtige Impulse, um sowohl die energetische Nutzung von Biomasse als auch die stoffliche Nutzung voranzubringen, sind die 2009 verabschiedeten Aktionspläne „Nationaler Biomasseaktionsplan“ zur energetischen Nutzung von Biomasse und „Aktionsplan der Bundesregierung zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe“.^{1,2} Die Aktionspläne bilden ein Gesamtkonzept sowohl für eine deutliche und anhaltende Steigerung des Biomasseanteils in der Industrie und Energiewirtschaft als auch für eine Verbesserung der Effizienz des Biomasseeinsatzes bei der Rohstoffversorgung in Deutschland unter Beachtung der Ziele und Anforderungen der Nachhaltigkeit. Damit soll zugleich die international führende Rolle Deutschlands bei der Nutzung nachwachsender Rohstoffe gesichert und ausgebaut werden. Als Teil der Aktionspläne der Bundesregierung ist die „Roadmap Bioraffinerien“ ein Baustein hin zu einer biobasierten Ökonomie und somit Teil der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“.³

Forschung und Entwicklung bleiben weiter von großer Bedeutung bei der Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Sie sind entlang der gesamten Wertschöpfungskette auf hohem Niveau fortzuführen. Die Bioraffinerie-Roadmap benennt die dabei prioritären Themen. Aktuell vorhandene Lücken, insbesondere in der erkenntnisorientierten Grundlagenforschung, sind zu schließen.

Bei allen Diskussionen zu Bioraffinerien muss klar betont werden, dass der Weg bis zu einer Realisierung von Bioraffinerien im Industriemaßstab – insbesondere nach dem *Top-Down*-Ansatz konzipierte Anlagen – noch lang ist (Abbildung 38). Die Umsetzung von vorhandenen Grundlagenkenntnissen zu einem in kleinem Maßstab realisierten Konzept über

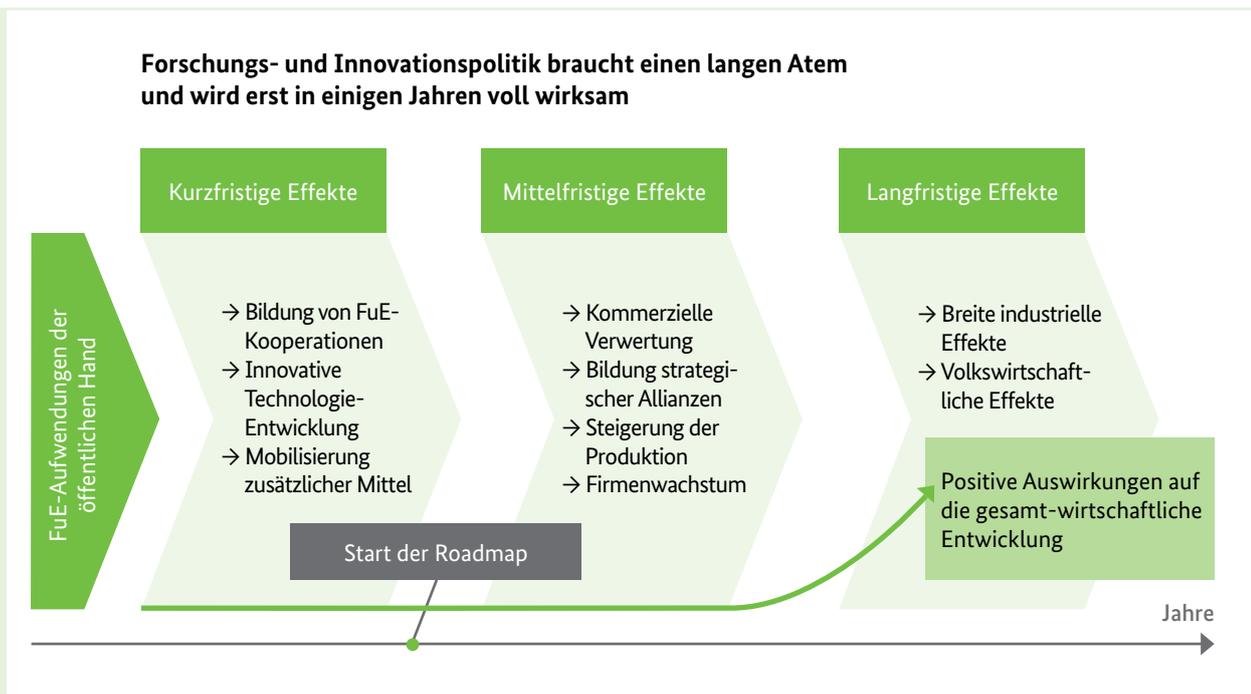


Abbildung 38: Schematischer Zeithorizont der Entwicklung von Bioraffinerien⁹⁰

eine Pilotanlage bis hin zu einer Großproduktion im mehr als 100.000 Tonnen-Maßstab erfordert einen langfristigen Zeithorizont. Die Roadmap zeigt, dass das Zeitfenster vom Konzept bis zur Umsetzung größer ist als fünf bis zehn Jahre.

Darüber hinaus muss auch deutlich gesagt werden, dass Bioraffinerien nur eine Variante der Konversion von Biomasse sind, die die vorhandenen Ansätze ergänzt und nicht ersetzt. „Klassische“ und andere neue innovative Ansätze der Konversion von Biomasse werden auch weiterhin ihre Bedeutung behalten. Alle Biomassenutzungspfade werden zukünftig parallel im Fokus von Forschung und Entwicklung stehen. Ihre Vor- und Nachteile werden evaluiert, die Chancen und Risiken geprüft und wo es sinnvoll ist, werden Bioraffinerien oder andere Biomassenutzungspfade umgesetzt.

Dabei darf nicht aus den Augen gelassen werden, dass auch Biomasse nicht unbegrenzt verfügbar ist. Damit müssen verschiedene Varianten der Biomassenutzung in den ökonomischen und ökologischen Wettbewerb treten. Nachhaltige Rohstoffversorgung bleibt eine grundsätzliche Herausforderung mit weiter zunehmender Bedeutung. Damit gewinnt die Frage nach einer Erschließung zusätzlicher Biomassequellen (u. a. KUP, Landschaftspflegeholz, Biomasse von Rekultivierungsflächen, Importe) ebenso an Bedeutung wie die Frage nach einer Effizienzsteigerung beim Einsatz von Biomasse (z. B. Leichtbau, Nutzungskaskaden nach dem Prinzip stofflicher vor energetischer Verwendung). Bioraffinerien bieten

mit Blick auf die Intensivierung von Nutzungskaskaden interessante Perspektiven.

Mit der „Roadmap Bioraffinerien“ sollen Grundlagen für die Entwicklung und Implementierung von Bioraffinerien gelegt werden. Auf Basis einer technologischen, ökonomischen und ökologischen Analyse wurden die Herausforderungen abgeleitet und prioritäre Handlungsfelder und Maßnahmen zu deren Lösung abgeleitet. Die Analyse hat aber auch gezeigt, dass in regelmäßigen Zeitabständen Anpassungen an aktuelle Entwicklungen erforderlich sein werden. Die Roadmap dient als Leitlinie für Entscheidungsträger in Politik und Industrie aber auch für die industrielle und öffentliche Forschung. Die Roadmap basiert auf den derzeitigen bzw. derzeit vorhersehbaren Rahmenbedingungen. Diese könnten sich mittelfristig ändern, z. B. durch Veränderung des „Treibstoffbedarfs“ aufgrund von Elektromobilität, Änderung der Konsum- und Essgewohnheiten von Verbrauchern oder andersartige Elektrizitätsproduktion (DESERTEC). Folglich sollte die Roadmap in regelmäßigen Abständen evaluiert und entsprechend den veränderten Rahmenbedingungen und den neu gewonnenen Erkenntnissen angepasst/präzisiert werden. Im Zeitraum 2015 bis 2020 wird daher auch eine umfassende Überprüfung und Anpassung der Roadmap erforderlich sein, wobei auch der derzeitige Zeithorizont 2030 erneut geprüft werden wird. Aufgrund des langfristigen Charakters von Forschung, Entwicklung und Innovation für Bioraffinerien stellt die vorliegende „Roadmap Bioraffinerien“ somit den ersten Schritt dar.

Anmerkungen

- 1 „Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland – Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung“, BMU, 2009,
<http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/45556/4593/>
- 2 „Aktionsplan der Bundesregierung zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe“, BMELV, 2009,
http://www.bmelv.de/cln_182/SharedDocs/Standardartikel/Landwirtschaft/Bioenergie-Nachwachsende-Rohstoffe/NachwachsendeRohstoffe/AktionsplanNaWaRo.html
- 3 „Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 – Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft“, BMBF, 2010,
<http://www.bmbf.de/de/1024.php>, <http://www.bmbf.de/pub/biooekonomie.pdf>
- 4 „Perspektiven für Deutschland“,
http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/nachhaltigkeit/DE/Nationale-Nachhaltigkeitsstrategie/Nationale-Nachhaltigkeitsstrategie.html?__site=Nachhaltigkeit, BMU, 2002
- 5 Dies können Wertprodukte oder Reststoffe sein.
- 6 Ein Hauptprodukt ist ein Stoff, der das Ergebnis eines Herstellungsverfahrens ist, dessen Hauptziel die Herstellung dieses Stoffes ist. Ein Nebenprodukt ist ein Stoff, der das Ergebnis eines Herstellungsverfahrens ist, dessen Hauptziel nicht die Herstellung dieses Stoffes ist. Koppelprodukte (bzw. Kuppelprodukte) sind zwei oder mehrere in einem gleichen Produktionsgang zwangsläufig und gleichzeitig anfallenden Produkte.
- 7 VDI-Richtlinie 6310 „Gütekriterien für Bioraffinerien“ (Arbeitstitel), derzeit in Bearbeitung, Entwurf in 2012 geplant,
<http://www.vdi.de/44392.0.html>
- 8 Positionspapier „Einsatz nachwachsender Rohstoffe in der chemischen Industrie“, Dechema, 2008,
http://www.dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/PP_in_der_chemischen_Industrie_final_DINA5.pdf
- 9 Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; Öko-Institut; Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik – UMSICHT, Projekt im Auftrag des BMU „Kopplung der stofflich/energetischen Nutzung von Biomasse: Analyse und Bewertung der Konzepte und der Einbindung in bestehende Bereitstellung- und Nutzungsszenarien (BioCouple)“,
http://www.wupperinst.org/projekte/proj/index.html?projekt_id=275&bid=163
- 10 IEA Bioenergy Task 42 „Biorefineries: Co-production of Fuels, Chemicals, Power and Materials from Biomass“,
<http://www.ieabioenergy.com/Task.aspx?id=42>
- 11 F. Cherubini, G. Jungmeier, M. Wellisch, T. Willke, I. Skiadas, R. Van Ree, E. de Jong „Toward a common classification approach for biorefinery systems“, *Biofpr* 3 (2009) 534–546
- 12 Durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) modifizierte und aktualisierte Elemente des Schemas der IEA Task 42¹¹ zur Klassifizierung von Bioraffinerien.
- 13 Im Falle von Biomasse umfasst rezent zeitlich einen Zeitraum von einigen Hundert Jahren und grenzt sich so vom Begriff fossil ab.
- 14 „Leitfaden Bioenergie“, FNR, 2005,
http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_189leitfaden_2005.pdf
- 15 Man spricht im englischen Sprachraum auch von material-driven biorefinery (stofflich getriebene Bioraffinerie) bzw. energy-driven biorefinery (energetisch getriebene Bioraffinerie)
- 16 Bei der überwiegenden Produktion von Nahrungs- oder Futtermitteln handelt es sich nicht um eine Bioraffinerie, sondern die Anlage ist dem Lebens- und Futtermittelbereich zuzuordnen und nicht dem technischen Bereich.
- 17 Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI); Stand: Februar 2010, prozentualer Anteil bezogen auf Tonnen Rohstoff
- 18 „Nachwachsende Rohstoffe in der Industrie“, FNR, 2008,
http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_228-bro_nr_industrie_dt_15072010_02_klein.pdf,
(Stand: Juli 2010)

- 19 in t_{atro} (Tonne absolut trocken), Umrechnungsfaktor $\text{m}^3/\text{t} = 0,5$
- 20 Erneuerbare Energien 2010, BMU, 2010,
http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_zahlen_2010_bf.pdf,
 (Stand: 23. März 2011)
- 21 Dieser Bioraffinerietyp ist aufgrund der involvierten drei Plattformen eigentlich systematisch als Cellulose/Hemicellulose/Lignin-Bioraffinerie zu bezeichnen, aber es hat sich die vereinfachte Form Lignocellulose-Bioraffinerie herausgebildet. Die Bezeichnung Lignocellulose ist hier also nicht explizit als Rohstoff gemeint, sondern steht synonym als Sammelbezeichnung für die drei separierten Bestandteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin.
- 22 Dieser Bioraffinerietyp ist aufgrund der involvierten Plattformen eigentlich als Pflanzenfaser/Presssaft-Bioraffinerie zu bezeichnen, aber es hat sich die vereinfachte Form Grüne Bioraffinerie (abgeleitet vom englischen Begriff „Green Biorefinery“) herausgebildet. Der Name leitet sich aus den englischen Bezeichnungen der separierten Bestandteile ab: green fiber und green juice.
- 23 C. Rupp-Dahlem, „The cereals-based biorefinery: today and tomorrow“,
http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/gp/gp_events/biorefinery/09_rupp-dahlem_en.pdf
- 24 H. Hofbauer, R. Rauch, S. Fürnsinn, Ch. Aichernig, TU Wien (2006) „Energiezentrale zur Umwandlung von biogenen Roh- und Reststoffen einer Region in Wärme, Strom, SNG und flüssige Kraftstoffe I“, „Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland – Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung“, BMU, 2009,
<http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/45556/4593/>
 und H. Hofbauer, R. Rauch, S. Fürnsinn, G. Bauer, TU Wien (2008) „Energiezentrale zur Umwandlung von biogenen Roh- und Reststoffen einer Region in Wärme, Strom, SNG und flüssige Kraftstoffe II“, Berichte für das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
- 25 SNG ist ein Erdgassubstitut, das auf der Basis von Kohle (SNG) oder Biomasse (Bio-SNG) über Synthesegas hergestellt wird (SNG = Synthetic Natural Gas).
- 26 <http://cordis.europa.eu/search/index.cfm>
- 27 <http://www.star-colibri.eu>
- 28 <http://www.cropenergies.com/de/Home/> und „Bioraffinerie2021: Energie aus Biomasse – Neue Wege zur integrierten Bioraffinerie“, <http://bioraffinerie2021.de/>
- 29 „Pilotprojekt Lignocellulose-Bioraffinerie“, <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22027405.pdf> und <http://www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/cms/webdav/site/lca/shared/Veranstaltungen/2006LcaWerkstatt/ArbeitsgruppeA/A6-Uihlein.pdf>
- 30 http://www.sud-chemie.com/scmcms/web/page_de_7440.htm und „Biofuels 2021: Innovative Biokraftstoffe aus der Bioraffinerie der Zukunft“, <http://foerderportal.bund.de/foekat/jsp/SucheAction.do?actionMode=view&fkz=0315419A>
- 31 <http://www.biowert.de/>
- 32 B. Kamm, P. Schönicke, M. Kamm, „Biorefining of Green Biomass - Technical and Energetic Considerations“, *Clean*, 37 (1) (2009) 27–30 und „Pilotvorhaben Grüne Bioraffinerie: Demonstrationsvorhaben im Havelland, Selbelang-Teltow“, <http://www.biopos.de/Pilotvorhaben%20Gr%FCne%20Bioraffinerie.doc>
- 33 <http://iwrwww1.fzk.de/bioliq/>
- 34 Dies gilt auch unter der Maßgabe, dass der Begriff Bioraffinerie international unscharf verwendet und teilweise breiter gefasst wird, als im Sinne der Charakterisierung und Klassifizierung in Kap 3.1. Oft wird unter dem Begriff Bioraffinerie jegliche Verarbeitungsanlage für Biomasse verstanden, die nicht dem Nahrungsmittel-/Futtermittelbereich zuzuordnen ist.
- 35 Der Begriff Zucker steht im agrarischen und im industriellen Sprachgebrauch als Synonym für Saccharose. Saccharose ist ein Disaccharid, das aus Glucose und Fructose besteht. Zuckerpflanzen sind demnach Pflanzen, die Saccharose enthalten. Unter Zuckerfolgeprodukten im industriellen, chemisch-technischen Sinne versteht man somit Saccharose und deren Folgeprodukte. Zucker bezeichnet hier also nicht wie in der chemischen Sprache generell Kohlenhydrate.
- 36 Prozesse wurden im Prinzipschema aus Vereinfachungsgründen weggelassen.

- 37 Stärke ist das häufigste Speicherkohlenhydrat in der Pflanzenwelt und ein Gemisch aus den Polysacchariden Amylose (10–30 %) und Amylopektin (70–90 %).
- 38 Der Grad der Hydrolyse der Stärke wird in Dextroseäquivalenten (Abkürzung DE vom englischen Begriff Dextrose Equivalent) angegeben. Dextrose ist eine ältere Bezeichnung für Glucose, die jedoch in der Stärkeindustrie noch eigenständig für glucosereiche Sirupe (> 80 %) verwendet wird.
- 39 DDGS = Dried Distillers Grains with Solubles (Trockenschlempe); Trockenschlempe wird durch Eindampfung, Trocknung und Pelletierung der proteinhaltigen Schlempe erzeugt.
- 40 Die beiden Stärkefraktionen werden anhand der Stärkekörnergröße eingeteilt. Stärkekörner mit einem Durchmesser von 25–50 µm werden als A-Stärke bezeichnet und solche mit 2–15 µm Durchmesser als B-Stärke, letztere enthält auch Pentosane und Hemicellulosen.
- 41 DDGS = Dried Distillers Grains with Solubles (Trockenschlempe); Trockenschlempe wird durch Eindampfung, Trocknung und Pelletierung der proteinhaltige Schlempe erzeugt
- 42 Pflanzenöle können flüssig oder fest sein. Als Pflanzenfett werden pflanzliche Öle bezeichnet, die bei Zimmertemperatur fest sind.
- 43 kurzkettige Fettsäuren = Fettsäuren mit einer Kettenlänge von 6–14 Kohlenstoffatomen, langkettige Fettsäuren = Fettsäuren mit einer Kettenlänge von 16–24 Kohlenstoffatomen
- 44 Wenn die Gewinnung von Pflanzenölen, d. h. die Primärraffination im Ausland erfolgt, können diese Pflanzenöle keine Plattform für eine Bioraffinerie in Deutschland sein (siehe hierzu Kapitel 3.1).
- 45 Lignocellulose besteht aus den drei Hauptkomponenten Cellulose (30–60 %, Hemicellulosen (20–40 %) und Lignin (10–30 %). Während Lignin ein phenolisches Polymer ist, handelt es sich bei den Kohlenhydraten Cellulose und den Hemicellulosen um Polysaccharide.
- 46 Die Hexosen stammen aus der Cellulose und sind monomere Kohlenhydrate mit sechs Kohlenstoffatomen; Pentosen stammen aus den Hemicellulosen und sind monomere Kohlenhydrate mit fünf Kohlenstoffatomen.
- 47 AFEX = Ammonia Fiber Explosion
- 48 Synthesegas ist ein Gasgemisch mit Kohlenmonoxid und Wasserstoff als Hauptkomponenten.
- 49 Als überschaubarer Zeitraum wird hier der Vorschauhorizont der Roadmap bis 2030 angesehen.
- 50 Ausgenommen ist hier auch die Umnutzung von Grünlandflächen, z. B. für den Anbau mehrjähriger Gräser.
- 51 „Statistisches Jahrbuch über Ernährung Landwirtschaft und Forsten“. BMELV, 2011
- 52 In globaler Sicht sind die schon genannten Potenziale zum Anbau von nachwachsenden Rohstoffen auf Flächen, die nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion stehen, zu beachten. Durch mehrjährige Kulturen auf solchen oft degradierten Flächen könnte längerfristig eine Rehabilitation erreicht werden, wobei die Kosten des Anbaus nachwachsender Rohstoffe auf diesen Flächen allerdings deutlich höher liegen als bei herkömmlichen Agrarflächen.
- 53 Statistisches Bundesamt, GENESIS-Online Datenbank, Stand: 12.01.2012
- 54 Vgl. Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung – Band 2, http://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Ver%C3%B6ffentlichungen/02_Basisinformationen_Reststoffe_web.pdf
- 55 B. Osterburg, persönliche Mitteilung, vTI Braunschweig, 2011
- 56 B. Lassen, „Milchproduktion in Deutschland und Europa nach der Liberalisierung – Abschätzung künftiger Entwicklungen mit unterschiedlichen analytischen Ansätzen“, Dissertation, Universität Göttingen, 211, <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2012/lassen/lassen.pdf>
- 57 „State of the World’s Forests“, Food and Agriculture Organization of the United Nations“, FAO, 2011
- 58 H. Polley, F. Kroiher (2006), „Struktur und regionale Verteilung des Holzvorrates und des potenziellen Rohholzaufkommens in Deutschland im Rahmen der Clusterstudie Forst- und Holzwirtschaft“, Arbeitsbericht des Instituts für Waldökologie und Waldinventuren, no. 3, Hamburg, 2006
- 59 U. Mantau et al., „EUwood – Real potential for changes in growth and use of EU forests“, Final Report, Hamburg, 2010

- 60 M. Dieter, P. Elsasser, J.-G. Küppers, B. Seintsch, „Rahmenbedingungen und Grundlagen für eine Strategie zur Integration von Naturschutzanforderungen in die Forstwirtschaft“, Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft 2008/2, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Hamburg, 2008
- 61 M. Fröhling, M. Haase, B. Himmelreich, F. Schultmann, J. Schweinle, H. Weimar, „Verbundvorhaben: Pilotprojekt Lignocellulose Bioraffinerie“, Gemeinsamer Endbericht, Arbeitspaket 4 „Ökonomische und ökologische Bewertung des Verfahrens“, Karlsruhe, 2009, <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22027405.pdf>
- 62 Statistisches Bundesamt, Fachserie 17, Reihe 1, Stand: 12.01.2012
- 63 Hierfür müssten aufgrund der hohen Komplexität der stofflichen Nutzung die derzeit existierenden Zertifizierungssysteme angepasst werden.
- 64 „Bodenschutz beim Anbau nachwachsender Rohstoffe“, Empfehlungen der Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt, <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3472.pdf>
- 65 Die Verarbeitung des Fruchtfleisches und der Kerne der Früchte von Ölpalmen findet gegenwärtig bevorzugt in den Anbau- und Ernteregionen für Palmfrüchte insbesondere in Malaysia und Indonesien statt. Die Palmkerne sind im Gegensatz zum Fruchtfleisch extrem hart und damit lagerfähig, so dass die Ölgewinnung nicht am Ernteort erfolgen muss. In Deutschland erfolgt gegenwärtig ausschließlich die Weiterverarbeitung von importiertem Palm- und Palmkernöl.
- 66 atro = absolut trocken
- 67 680 €/t Ethanol entsprechen ca. 54 €/ct/Liter Ethanol
- 68 Die angegebenen Strohpreise sind nicht als Abschätzungen der Unter- und Obergrenzen zu verstehen, sondern sollen den Einfluss des Preises auf die Ergebnisse verdeutlichen.
- 69 Ethanol fuel grade T2 FOB Rotterdam (Monatsdurchschnittswerte), „Erhebung statistischer Daten zu Preisen nachwachsender Rohstoffe“ (FKZ 22024507) im Auftrag des BMELV
- 70 Der Bereitstellungspreis entspricht hier den Produktionskosten für die Bereitstellung des Benzins inklusive der anzuwendenden Steuern. Die Daten stammen aus: U. R. Fritsche, R. Herrera, „Arbeitspapier zu Kennzahlen von Biomasse-Anbau- sowie Referenz-Systemen 2010–2030“, Darmstadt, 2011
- 71 Referenzsystem „Benzinbereitstellung und 100%-Nutzung in einem Mittelklasse-Pkw mit Ottomotor“ (vgl. GEMIS Version 4.8, www.gemis.de)
- 72 Die Kategorien sind als Beispiele ausgewählt, um Hinweise auf wesentliche Umweltwirkungen (Klimawandel, Luftverschmutzung und Ressourcenverbrauch) zu geben. Die Betrachtung weiterer Kategorien wäre wünschenswert, ist vor dem Hintergrund der Datenlage jedoch derzeit nicht möglich (vgl. weitere Ausführungen in Kapitel 5).
- 73 Funktionelle Einheit ist MJ
- 74 Die Berechnungen basieren auf dem Vorgehen bzw. den Wirkungsmodellen des IPPC 2007, der UNECE (für das Versauerungspotenzial) sowie GEMIS Version 4.8 für den KEV_{nichterneuerbar}
- 75 Datenbasis für die Vorketten und für die Nutzung der Produkte ist das Globale Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) in der Version 4.8 (vgl. GEMIS 2012). Die Anlagenemissionen wurden im Rahmen der Erstellung der Roadmap abgeschätzt. Die wesentlichen weiteren Annahmen werden im Text gegeben.
- 76 CML-Methode = Methode des Umweltinstituts (Centrum voor Milieukunde) der Universität Leiden
- 77 Programmbegleitung des BMU-Förderprogramms (Hrg.), „Energetische Biomassenutzung“, Methoden zur stoffstromorientierten Beurteilung für Vorhaben im Rahmen des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Fischer Druck, Leipzig u. DBFZ, Leipzig, 2010, S. 51 u. 53
- 78 Referenzsystem „Methanol fossil“ (Herstellprozess: Steamreforming von Erdgas mit Aufbereitung) (vgl. GEMIS Version 4.8, www.gemis.de)
- 79 Bereitstellung von Methanol ab Werk
- 80 Methanol aus der Synthesegas-Bioraffinerie wird als biogen betrachtet und die CO₂-Äquivalente der Verbrennungsreaktion nicht zu den Treibhausgasemissionen gezählt. Es wird hier nur die chemische Reaktion betrachtet ohne weitere Emissionen z. B. durch dazu benötigte elektrischer Energie.

- 81 Weitere Emissionen bei der Synthesegas-Bioraffinerie entstehen durch die Bereitstellung des Katalysators, sind aber aufgrund der Datenlage nicht berücksichtigt.
- 82 „BioCouple – Kopplung der stofflich/energetischen Nutzung von Biomasse. Endbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). FKZ 03 KB 006 A-C. Wuppertal Institut, Fraunhofer Umsicht, Öko-Institut, Wuppertal, Oberhausen, Darmstadt, 2011
- 83 Kalundborg Cellulosic Ethanol Project (KACELLE),
http://www.inbicon.com/Projects/KACELLE/Pages/KACELLE_Project.aspx
- 84 Technology Readness Level (TRL) = Technologiereifegrad: Einteilung basierend auf „European Commission, High Level Expert Group (HLG) on Key Enabling Technologies (KET), Final Report, June 2011“,
http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/files/kets/hlg_report_final_en.pdf
- 85 Entwicklungsstand für ein vollständig umgesetztes integriertes Bioraffineriekonzept in der jeweiligen Phase (Teilkomponenten können bereits im Entwicklungsstand weiter sein)
- 86 Anlagen zur Produktion von Biodiesel sind entweder alleinstehend oder in Ölmühlen integriert, aber in der Regel nicht weiter mit einer zusätzlichen Sekundärraffination zu stofflichen Produkten verknüpft. Die Prozesse zur stofflichen und energetischen Nutzung von Pflanzenölen haben sich eher dezentral entwickelt und stellen nicht die Realisierung von Bioraffineriekonzepten an einem Standort ausgehend vom Rohstoff dar.
- 87 In Deutschland ist eine entsprechende Anlage im Bau (Demonstrationsprojekt HKW Senden),
<http://www.swu.de/privatkunden/energie-wasser/waerme/waermegewinnung/holzgas-heizkraftwerk.html>
- 88 „Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe“, BMELV, 2008,
http://www.nachwachsenderohstoffe.de/fileadmin/fnr/pdf/Brosch_Foerderprogramm7_BMELV.pdf
- 89 BMWi, <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/aussenwirtschaft.html>, www.exportinitiative.bmwi.de
- 90 Graphik in Anlehnung an „Forschung und Innovation für Deutschland“, Abbildung auf S. 14, BMBF, 2010,
http://www.bmbf.de/pub/forschung_und_innovation_fuer_deutschland.pdf
- 91 Vollständige Bereitstellung durch thermische Verwertung von Nebenprodukten
- 92 Annahme der Fa. Süd-Chemie AG

Anhang

Lignocellulose-Bioraffinerie (Beispiel 7)

Tabelle 6: Kapitalabhängige Kosten von Beispiel 7 der Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis von Stroh

	€	€/t _{Produkt}
Anlage	63.000.000	1.056
Planung	7.000.000	117
Investitionssumme	70.000.000	1.173
Abschreibung (20 Jahre) ⁷⁷	3.500.000	59
kalkulatorische Zinsen (8 %) ⁷⁷	5.600.000	94
Summe kapitalabhängige Kosten	9.100.000	153

Tabelle 7: Verbrauchsabhängige Kosten von Beispiel 7 der Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis von Stroh

Stoff- und Energie	Einheit/a	€/Einheit	€/a	€/t _{Produkt}
Rohstoff	280.731 t/a	75	21.057.075	353
Hilfs- und Betriebsstoffe	33.745 t/a	151	5.095.495	85
Wasser (Kühl-, ...)	376.400 m ³ /a	0,14 €/m ³ ⁷⁷	52.696	1
Elektrische Energie	25.200 kWh/a	0 €/kWh ⁹¹	0	0
Abwasser	37.600 m ³ /a	2 €/m ³	752.000	13
Summe			26.957.266	452

Tabelle 8: Sonstige Kosten von Beispiel 7 der Lignocellulose-Bioraffinerie auf Basis von Stroh

	Faktoren	€/a	€/t _{Produkt}
Personalkosten (4 Schichten à 8 Personen)	50.000 €/a pro Person ⁷⁷	1.600.000	27
Wartung und Reinigung	2 % der Investitionssumme/a ⁹²	1.400.000	21
Verwaltung	0,5 % der Investitionssumme/a ⁷⁷	350.000	6
Versicherung	1 % der Investitionssumme/a ⁷⁷	700.000	12
Unvorhergesehenes	0,75 % der Investitionssumme/a ⁷⁷	525.000	9
Summe		4.435.000	74

Synthesegas-Bioraffinerie (Beispiel 10)

Tabelle 9: Kapitalabhängige Kosten von Beispiel 10 der Synthesegas-Bioraffinerie auf Basis von Holz

	€	€/t _{Produkt}
Investitionssumme I₀	255.099.000	1.173
Abschreibung (20 Jahre) ⁷⁷	12.754.950	86,52
kalkulatorische Zinsen (8 % I ₀) ⁷⁷	10.203.960	69,22
Summe kapitalabhängige Kosten	22.958.910	156

Tabelle 10: Verbrauchsabhängige Kosten von Beispiel 10 der Synthesegas-Bioraffinerie auf Basis von Holz

Stoff- und Energie	Einheit/a	€/Einheit	€/a	€/t _{Produkt}
Rohstoff	447.930 t/a	75 €/t _{atro}	33.594.750	227,88
Hilfs- und Betriebsstoffe			1.021.112	6,93
Wasser (Kühl-, ...)	3.553.524 m ³ /a	1,5 €/m ³ ⁷⁷	573.000	3,89
Elektrische Energie	101 GWh/a	0,12 €/kWh ⁷⁷	16.480.000	111,79
Summe			51.669.162	350

Tabelle 11: Sonstige Kosten von Beispiel 10 der Synthesegas-Bioraffinerie auf Basis von Holz

	Faktoren	€/a	€/t _{Produkt}
Personalkosten (30 Arbeitskräfte)	50.000 €/a pro Person ⁷⁷	5.750.000	39,00
Instandsetzung	2,5 % der Investitionssumme/a ⁷⁷	6.377.475	43,26
Wartung und Reinigung	3 % der Investitionssumme/a ⁷⁷	7.652.970	51,91
Verwaltung	0,5 % der Investitionssumme/a ⁷⁷	1.275.495	8,65
Versicherung	1 % der Investitionssumme/a ⁷⁷	2.550.990	17,30
Unvorhergesehenes	0,75 % der Investitionssumme/a ⁷⁷	1.913.243	12,98
Summe		19.142.698	173

Arbeitskreis „Roadmap Bioraffinerien“

Erstellt und erarbeitet von einem temporären Arbeitskreis unter Vorsitz von Prof. Dr. Kurt Wagemann, DECHEMA e.V., Frankfurt am Main

Mitglieder des Arbeitskreises:

- Tilman Benzing, Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt am Main
- Dr. Thomas Böhland, Evonik-Degussa GmbH, Marl
- Dr. Uwe R. Fritsche, Öko-Institut, Darmstadt
- Dr. Magnus Fröhling, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
- Arne Gröngröft, Deutsches Biomasse-Forschungszentrum, Leipzig
- Dr. Armin Guenther, Lurgi GmbH, Frankfurt am Main
- Jens Günther, Umweltbundesamt, Dessau
- Dr. Maximilian Hempel, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
- Andreas Hiltermann, InfraLeuna GmbH, Leuna
- Prof. Dr. Thomas Hirth, Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB), Stuttgart
- Dr. Norbert Holst, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow
- Dr. Bernd Horbach, Cargill Deutschland, Krefeld
- Dr. Ralf Jossek, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich
- Prof. Dr. Birgit Kamm, Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme e.V., Teltow
- Dr. Andre Koltermann, Süd-Chemie AG, München
- Daniel Maga, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT), Oberhausen
- Franziska Müller-Langer, Deutsches Biomasse-Forschungszentrum, Leipzig
- Dr. Dietmar Peters, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow
- Dr. Jürgen Puls, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Hamburg
- Dr. Jörg Rothermel, Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt am Main
- Kristin Sternberg, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow
- Dr. Heinz Stichnothe, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig
- Ragnar Strauch, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Frankfurt am Main
- Prof. Dr. Roland Ulber, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern
- Dr. Armin Vetter, Thüringische Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena
- Prof. Dr. Klaus Vorlop, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig
- Dr. Wolfgang Wach, Südzucker AG, Mannheim
- Dr. Markus Wolperdinger, Linde Engineering Dresden GmbH, Dresden

Der Arbeitskreis bedankt sich für sachdienliche Hinweise und Anmerkungen bei zahlreichen weiteren Kollegen aus Forschung und Industrie, die bei einigen Fragestellungen zusätzlich hinzugezogen wurden.

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Ernährung,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)
Wilhelmstraße 54
10117 Berlin
www.bmelv.de

Bundesministerium für Bildung und
Forschung (BMBF)
Hannoversche Straße 28-30
10115 Berlin
www.bmbf.de

Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Stresemannstraße 128-130
10117 Berlin
www.bmu.de

Bundesministerium für Wirtschaft und
Technologie (BMWi)
Scharnhorststraße 34-37
10115 Berlin
www.bmwi.de

Text/Redaktion

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)
OT Gülzow, Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen
Tel.: +49 3843/6930-0
Fax: +49 3843/6930-102
info@fnr.de • www.fnr.de

Stand

Mai 2012

Gestaltung/Realisierung

www.tangram.de, Rostock

Bildnachweis

Titel: Fotolia
Sofern nicht am Bild vermerkt:
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)

Druck

www.druckerei-weidner.de, Rostock

