

BioCouple – Kopplung der stofflich/energetischen Nutzung von Biomasse

Analyse und Bewertung der Konzepte und der Einbindung
in bestehende Bereitstellungs- und Nutzungsszenarien



Endbericht

FKZ-Nr. für das Projekt BioCouple: 03 KB 006 A - C

Vorwort

Der weitere Ausbau der Bioenergie sowie die Entscheidung über präferierte Nutzungspfade ist hochkomplex und von verschiedenen Faktoren abhängig zu machen. Die ausgewählten heutigen und zukünftigen Konversionstechniken sollten soweit möglich die größtmögliche Effizienz aufweisen, und die entsprechenden Stoffströme müssen beherrschbar und steuerbar sein. Schließlich muss das resultierende Bio- Energiesystem einen insgesamt höheren Nutzen als das Vergleichssystem besitzen.

Grundsätzlich wird es dabei nicht ausreichen, einzelne Nutzungsrouten in sich zu optimieren. Mit Blick auf die vielfältigen Nebenprodukte und Nachnutzungen ist eine integrierte Bewertung von energetischen und stofflichen Nutzungen erforderlich, wie es im Konzept der Bioraffinerie explizit angelegt ist.

Ziel des Projekt ist es zu prüfen, inwieweit sich das Konzept eignet, Bioenergieträger, Energie und Stoffe/Materialien gekoppelt und effizient bereit zu stellen und wie es sich in vorhandene Energiesysteme optimal integrieren lässt. Es sind folgende Schwerpunkte bearbeitet worden:

- **Stoffstromanalyse:** Erhebung von Daten zu ökologischen und ökonomischen Effekten der Produkte einer Bio-Raffinerie (Öko-Institut)
- **Analyse der Konversionstechniken:** technisch-wirtschaftliche Untersuchung von bestehenden und zukünftigen Bioraffinerie-Konzepten (Fraunhofer UMSICHT)
- **Energiesystemanalyse:** Abschätzung der klima- und energiepolitischen Auswirkungen und Möglichkeiten zur Systemintegration (Wuppertal Institut)
- **Entwicklung einer Teilstrategie:** Ableitung von Erfolgsfaktoren und Integration von Konzepten zur gekoppelten Nutzung in eine übergeordnete Biomassestrategie

Das Verbundprojekt BioCouple ist im Rahmen des BMU-Förderprogramms "Energetische Biomassenutzung" durchgeführt worden.

Wuppertal, Oberhausen, Darmstadt, Juni 2011

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Dipl.-Ing. Karin Arnold (Koordination)
Dipl.- Ing. Thomas Targiel
Dipl.- Biol. Christoph Zeiss

Döppersberg 19
42103 Wuppertal
Internet: www.wupperinst.org
Email: Karin.arnold@wupperinst.org

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik

UMSICHT

Dipl. Landschaftsökologe Daniel Maga
Volker Knappertsbusch
Dr. Hartmut Pflaum

Osterfelder Straße 3
46047 Oberhausen
Internet: www.umsicht.fraunhofer.de
Email: daniel.maga@umsicht.fraunhofer.de

Öko-Institut e. V.

Institut für angewandte Ökologie

Uwe Fritsche
Katja Hünecke
Kirsten Wiegmann
Klaus Hennenberg
Lothar Rausch

Büro Darmstadt
Rheinstr. 95
D-64295 Darmstadt
Internet: www.oeko.de
Email: U.Fritsche@oeko.de

1	EINLEITUNG.....	1
2	AKTUELLE FORSCHUNGSPROJEKTE ZU BIORAFFINERIEN.....	2
3	GENERISCHE BIORAFFINERIEKONZEPTE	6
3.1	Definition und Klassifikation von Bioraffinerien	6
3.1.1	Bestehende Bioraffineriekonzepte	10
3.1.2	Auswahl generischer Bioraffineriekonzepte.....	14
3.2	Beschreibung der fünf generischen Bioraffineriekonzepte	16
3.2.1	Typ I: Ein-Plattform (Stärke) Bioraffinerie für Bioethanol und Tierfutter aus stärkehaltigem Getreide.....	17
3.2.2	Typ II: Ein-Plattform (Öl) Bioraffinerie für Biodiesel, Tierfutter und Glycerin aus ölhaltigen Pflanzensamen	19
3.2.3	Typ III: Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe, Strom und Naphtha aus Restholz/KUP	21
3.2.4	Typ IV: Drei-Plattform (Hemizellulose, Zellulose und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh.....	23
3.2.5	Typ V: Zwei-Plattform "grüne" (organische Säfte und Presskuchen) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras	26
3.3	Zwischenfazit: Überblick über die betrachteten Bioraffinerien	29
4	DYNAMISCHE ENTWICKLUNG DER BIORAFFINERIEKONZEPTE IM AUSBLICK BIS 2030 30	
4.1	Referenzsysteme	30
4.1.1	Energiesystem: Leitszenario 2009.....	30
4.1.2	Stoffsysteme bis 2030	32
4.2	Abschätzung der Marktentwicklung von Bioraffinerien	34
4.2.1	Definition des zeitlichen Ablaufs der Anlagenentwicklung.....	35
4.2.2	Definition einer Wachstumskurve für kommerzielle Anlagen.....	36
4.3	Zwischenergebnis	38
4.4	Abgleich der Produktspektren und Märkte.....	39
5	STOFFSTROMANALYSE	43
5.1	Methodik der Stoffstromanalyse	43
5.2	Grunddaten für die Stoffstromanalyse	43
5.3	Stoffstromkenndaten der Bioraffinerie-Systeme	44
5.4	Kenndaten der Referenzsysteme	46
5.4.1	Energetische Referenzsysteme.....	47

5.4.2	Stoffliche Referenzsysteme	48
5.5	Bilanzierung Bioraffinerien versus Referenzsysteme	49
5.5.1	Bruttobilanzen der Referenzsysteme.....	50
5.5.2	Bilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme	51
5.6	Absolute Effekte durch Bioraffinerien.....	54
6	ENTWICKLUNG EINER TEILSTRATEGIE ZUM WEITEREN AUSBAU VON BIORAFFINERIEEN.....	56
6.1	<i>Lessons learned</i> – Erfolgsfaktoren für Bioraffinerien	57
6.1.1	Verfügbarkeit der Biomasse-Feedstocks	57
6.1.2	Wahl des geeigneten Standortes.....	57
6.1.3	Marktfähigkeit aller Produkte	58
6.2	Technischer Optimierungsbedarf.....	60
6.2.1	Optimierung bestehender Prozesse	60
6.2.2	Technische Weiterentwicklung	61
7	AUSBLICK UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF	62
7.1	Anlagenkonfiguration und Produkteigenschaften	62
7.2	Politische Zielsetzung	63
7.3	Offene Fragen und Forschungsbedarf.....	63
8	LITERATUR.....	65
9	ANHANG	70
9.1	Beschreibung der Bioraffinerie-Techniken.....	70
9.1.1	Typ I: Ein-Plattform (C6-Zucker) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier-Futter aus stärkehaltigem Getreide	70
9.1.2	Typ II: Ein-Plattform (Öl) Bioraffinerie für Biodiesel, Tierfutter und Glycerin aus ölhaltigen Pflanzensamen	71
9.1.3	Typ III: Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe, Strom und Naphtha aus Restholz/KUP	73
9.1.4	Typ IV: Drei-Plattform (C5-, C6-Zucker und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh.....	79
9.1.5	Typ V: Zwei-Plattform “grüne” (organische Säfte und Biogas) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras. 81	
9.2	Protokolle der Stakeholder-Workshops	83
9.2.1	Ergebnis-Protokoll des 1. Workshop am 23. 11. 2009 in Berlin	84
9.2.2	Ergebnis-Protokoll des 2. Workshop am 26. 09. 2010 in Berlin	89
9.2.3	Ergebnis-Protokoll des 3. Workshop am 07. 12. 2010 in Berlin	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Technische Parameter zur Beschreibung der Bioraffinier-Typen	16
Tabelle 3-2: Technische Parameter der untersuchten Ein-Plattform (Stärke) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier- Futter aus stärkehaltigem Getreide	18
Tabelle 3-3: Kosten der untersuchten Ein-Plattform (Stärke) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier- Futter aus stärkehaltigem Getreide	19
Tabelle 3-4: Technische Parameter der untersuchten Ein-Plattform (Öl) Bioraffinerie für Biodiesel, Tierfutter und Glycerin aus ölhaltigen Pflanzensamen	20
Tabelle 3-5: Kosten der untersuchten Ein-Plattform (Öl) Bioraffinerie für Biodiesel, Tierfutter und Glycerin aus ölhaltigen Pflanzensamen	21
Tabelle 3-6: Technische Parameter der untersuchten Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe, Strom und Naphtha aus Restholz/KUP	22
Tabelle 3-7: Kosten der untersuchten Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe, Strom und Naphtha aus Restholz/KUP	23
Tabelle 3-8: Technische Parameter der untersuchten Drei-Plattform (Hemizellulose, Zellulose und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh.....	25
Tabelle 3-9: Kosten der untersuchten Drei-Plattform (Hemizellulose, Zellulose und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh	25
Tabelle 3-10: Technische Parameter der untersuchten Zwei-Plattform "grüne" (organische Säfte und Presskuchen) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras	27
Tabelle 3-11: Kosten der untersuchten Zwei-Plattform "grüne" (organische Säfte und Presskuchen) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras	28
Tabelle 3-12: Technische und ökonomische Kenndaten der betrachteten Bioraffinerien.....	29
Tabelle 4-1: Mengen an fossilen Referenzprodukten im Ausblick bis 2030 (inklusive energetischen Bioraffinerieprodukten).....	31
Tabelle 4-2: Stofflichen Bioraffinerieprodukten und Mengen an fossilen Referenzprodukten im Ausblick bis 2030	34
Tabelle 4-3: Entwicklungsphasen bei verschiedenen Biomasse-Anlagen	35
Tabelle 4-4: Ermittelte Markteintritts-Zeitpunkte der fünf Bioraffinerietypen	36
Tabelle 4-5: Ermittelte lineare Wachstumsfaktoren der Bioraffinerien	37
Tabelle 5-1: Kenndaten der Bioraffinerietypen im Jahr 2020	44
Tabelle 5-2: Kenndaten der Bioraffinerietypen im Jahr 2030	45
Tabelle 5-3: Kenndaten zu Kraftwerksanteilen im Kraftwerkspark, 2010 – 2030.....	47
Tabelle 5-4: Kenndaten der energetischen Referenzsysteme im Jahr 2020	48
Tabelle 5-5: Kenndaten der energetischen Referenzsysteme im Jahr 2030	48
Tabelle 5-6: Kenndaten der stofflichen Referenzsysteme im Jahr 2020.....	49
Tabelle 5-7: Kenndaten der stofflichen Referenzsysteme im Jahr 2030.....	49
Tabelle 5-8: Bruttobilanz der Referenzsysteme im Jahr 2020	50

Tabelle 5-9: Bruttobilanz der Referenzsysteme im Jahr 2030	51
Tabelle 5-10: Spezifische Bilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme im Jahr 2020	52
Tabelle 5-11: Relative Bilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme im Jahr 2020	52
Tabelle 5-12: Spezifische Bilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme im Jahr 2030	53
Tabelle 5-13: Relative Bilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme im Jahr 2030	53
Tabelle 5-14: Mengengerüst für Bioraffinerien im Jahr 2030	54
Tabelle 5-15: Absolute Emissionsbilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme im Jahr 2030	54

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Aktuelle Forschungsprojekte zum Thema Bioraffinerie in Clustern	2
Abbildung 3-1: Prozessschema einer Bioraffinerie	7
Abbildung 3-2: Verarbeitungsprozesse in Bioraffinerien	8
Abbildung 3-3: Darstellungsweise von Bioraffinerien entsprechend der Klassifikation.....	9
Abbildung 3-4: Drei-Plattform (Hemizellulosen, Zellulose, Lignin) Bioraffinerie für Futtermittel, Ethanol und Aromaten von Holz.....	10
Abbildung 3-5: Drei-Plattform (Hemizellulosen, Zellulosen, Lignin) Bioraffinerie für Papier, Strom, Wärme und Chemikalien aus Holz.....	12
Abbildung 3-6: Zwei-Plattform (Öl, Algenbiomasse) Bioraffinerie für Omega3-Fettsäuren, Glycerin, Biodiesel, Biogas, Strom, Wärme und Dünger aus Mikroalgen	13
Abbildung 3-7: 2-Plattform (Polysaccharide, Proteine) Bioraffinerie für Bioethanol, Futtermittel und Pharmaprodukte aus Mikroalgen.....	14
Abbildung 3-8: Ein-Plattform (Stärke) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier- Futter aus stärkehaltigem Getreide.....	17
Abbildung 3-9: Ein-Plattform (Öl) Bioraffinerie für Biodiesel, Tierfutter und Glycerin aus ölhaltigen Pflanzensamen	19
Abbildung 3-10: Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe, Strom und Naphtha aus Restholz/KUP	22
Abbildung 3-11: Drei-Plattform (Hemizellulose, Zellulose und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh.....	24
Abbildung 3-12: Zwei-Plattform "grüne" (organische Säfte und Presskuchen) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras.....	26
Abbildung 4-1: Beitrag erneuerbarer Energien zur Deckung des Kraftstoffbedarfs (inklusive regenerativen Stroms für Elektromobilität)	32
Abbildung 4-2: Entwicklung der Produktion von Biodiesel, Bioethanol und Biogas in Deutschland.....	36
Abbildung 4-3: Ideale Wachstumsverläufe für generische Bioraffinerien.....	37
Abbildung 4-4: Kumulierte Produktionsmenge der Bioraffinerien im Ausblick bis 2030.....	38
Abbildung 4-5: Berechnete Anzahl der generischen Bioraffineriekonzepte im Ausblick bis 2030.....	39
Abbildung 4-6: Mengen-Vergleich des Bioraffinerieprodukts Bioethanol mit fossilem Benzin im Ausblick bis 2030	40
Abbildung 4-7: Mengen-Vergleich des stofflichen Bioraffinerie-Produkts Naturfaserverstärkte Kunststoffe mit fossil-basierten Kunststoffen im Ausblick bis 2030	41
Abbildung 4-8: Mengen-Vergleich des Bioraffinerie-Nebenprodukts Lignin mit fossil basiertem Phenol im Ausblick bis 2030	41
Abbildung 9-1: Prozessschema einer Ein-Plattform (C6-Zucker) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier- Futter aus stärkehaltigem Getreide	70
Abbildung 9-2: Prozesskette Methylesterherstellung	73
Abbildung 9-3: Produktverteilung des Fischer-Tropsch-Rohproduktes für eine Kettenwachstumswahrscheinlichkeit von 0,85	78

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Verknappung fossiler Ressourcen hat insbesondere die energetische Nutzung von Biomasse verstärkt an Aufmerksamkeit gewonnen, während die stoffliche Nutzung bislang kaum diskutiert wird. Es ist aber zu erwarten, dass auch dieser Bereich an Bedeutung gewinnt - nicht zuletzt unter dem Gesichtspunkt einer nachhaltigen Chemikalienbereitstellung z.B. aus Koppelprodukten der Bioenergieerzeugung. Gleichzeitig nehmen kritische Stimmen zu, die auf die Konkurrenz des Nahrungs- und Futtermittelsektors zur energetischen und stofflichen Nutzung von Biomasse hinweisen und dabei die begrenzt verfügbare Fläche sowie Folgen für Arten- und Naturschutz thematisieren.

Es ist daher notwendig, die begrenzte Ressource so effizient wie möglich einzusetzen. Zahlreiche Studien sind mit der Strategiefindung zum Einsatz von Biomasse in den verschiedenen Sektoren befasst. Die Verbindung der beiden *non-food*-Bereiche (stoffliche und energetische Nutzung) ist bisher noch nicht in den Vordergrund der Überlegungen gestellt worden. Auch die Anbindung von Konzepten zur gekoppelten Nutzung an bereits bestehende Systeme der Rohstoffbereitstellung und Nutzung wurde noch nicht intensiv bearbeitet ebenso wenig wie die potenzielle Verringerung der Nutzungskonkurrenzen um Biomasse durch die Bereitstellung von Futtermitteln durch gekoppelte Konversion von Biomasse.

Die Entscheidungen über künftig präferierte Pfade für Biomasse im Bereich der energetischen und/oder stofflichen Nutzung ist hochkomplex und von verschiedenen Faktoren abhängig. Die zukünftigen Konversionstechniken sollten die größtmögliche Effizienz aufweisen, um Nutzungskonkurrenzen um die insgesamt zwar erneuerbare aber doch begrenzte Ressource Biomasse und die entsprechenden Stoffströme zu reduzieren.

Grundsätzlich wird es dabei nicht ausreichen, einzelne Nutzungsrouten in sich zu optimieren. Mit Blick auf die vielfältigen Nebenprodukte und denkbaren Nachnutzungen ist eine integrierte Bewertung von energetischen und stofflichen Nutzungen erforderlich, wie es im Konzept der Bioraffinerie explizit angelegt ist.

Ziel des Projekt BioCouple war es zu prüfen, inwieweit sich das Konzept der „Bioraffinerie“ eignet, Bioenergieträger, Energie und Stoffe/Materialien gekoppelt und effizient bereit zu stellen und wie es sich in vorhandene Energiesysteme optimal integrieren lässt.

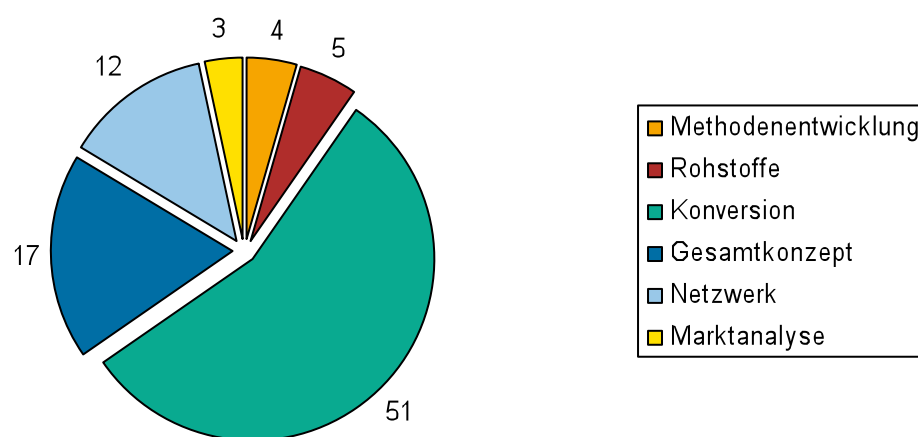
Im Projekt sind in Kooperation von Wuppertal Institut, Öko-Institut und Fraunhofer UMSICHT folgende Schwerpunkte bearbeitet worden:

- **Analyse der Konversionstechniken:** technisch-wirtschaftliche Untersuchung von bestehenden und zukünftigen Bioraffinerie-Konzepten (Kapitel 3)
- **Energiesystemanalyse:** Abschätzung der klima- und energiepolitischen Auswirkungen und Möglichkeiten zur Systemintegration (Kapitel 4)
- **Stoffstromanalyse:** Erhebung von Daten zu ökologischen und ökonomischen Effekten der Produkte einer Bio-Raffinerie (Kapitel 5)
- **Entwicklung einer Teilstrategie:** Ableitung von Erfolgsfaktoren und Integration von Konzepten zur gekoppelten Nutzung in eine übergeordnete Biomassestrategie (Kapitel 6 und 7)

2 Aktuelle Forschungsprojekte zu Bioraffinerien

Dieses Kapitel zeigt auf in welchen Bereichen zum Thema Bioraffinerien gegenwärtig geforscht wird. Grundlage der Recherche ist das „Biorefinery Research Portal“, welches im Rahmen des durch die EU Kommission geförderten Projekts StarColibri erstellt wurde. Die Datenbank ist unter der Internetseite http://www.star-colibri.net/wiki/Main_Page abrufbar. Gesucht wurden Projekte, die einen Bezug zum Thema Bioraffinerie aufweisen. Insgesamt wurden 92 Forschungsprojekte identifiziert, die einen Bezug zur Bioraffinerie aufweisen. Diese 92 Projekte wurden geclustert nach den Forschungsschwerpunkten: Methodenentwicklung, Rohstoffbereitstellung, Konversion, Gesamtkonzeptentwicklung sowie Förderung von Netzwerkaktivitäten und Marktanalysen. Die Verteilung der Projekte hinsichtlich der Zuordnung zu den Forschungsschwerpunkten zeigt Abbildung 2-1.

Abbildung 2-1: Aktuelle Forschungsprojekte zum Thema Bioraffinerie in Clustern



Quelle: eigene Darstellung

Wie der Abbildung 2-1 zu entnehmen ist, werden gegenwärtig vor allem Projekte gefördert, in denen Konversionsverfahren entwickelt oder optimiert werden. Weitere Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung von Gesamtkonzepten (vom Biomasseanbau bis hin zum Endprodukt) und das Arbeiten in Netzwerken.

Im Folgenden werden die Themencluster und bedeutende Bioraffinerieprojekte näher dargestellt.

Cluster Methodenentwicklung

Unter Methodenentwicklung wird die Entwicklung von Methoden zur Beurteilung und Darstellung von Bioraffineriekonzepten verstanden. Hierbei ist insbesondere das EU-Projekt **Pro-suite** (PROspective SUSTainability assessment of Technologies) zu nennen, welches eine standardisierte Methode und Software zur Nachhaltigkeitsbewertung von Technologien entwickelt und diese frei zur Verfügung stellen wird. Weiterhin werden in diesem Cluster auch

Projekte eingeschlossen, die der Modellierung von Bioraffinerieszzenarien dienen. Zu nennen ist hier z. B. das finnische Projekt **BioScen** (Modelling of Biorefinery Scenarios), das eine Optimierung von Bioraffinerieprozessen bezüglich Energieeffizienz und Kostensenkung untersucht. Diesem ganzheitlichen Vorhaben gehen Projekte wie **JoBi** (Risk mitigation and production flexibility in integrated forest biorefinery) voraus, deren Fokus auf Szenarioanalysen und Risikominimierung insbesondere in der Beschaffungskette lag.

Cluster Rohstoffe

Ein weiteres Themenfeld sind die Rohstoffe für Bioraffinerien. Die Forschung wendet sich hier der Optimierung der Ertragsausbeute bei der Biomasseproduktion zu. Das Projekt **Bioenergy and Biorefinery Competence Centre** in Irland und Großbritannien untersucht hierzu die Eignung von Rohstoffen wie Gras, Algen und Papierreststoffe zur Herstellung und Optimierung der energetischen Ausbeute von Biokraftstoffen der nächsten Generation. **WINSEAFUEL** (Biomethane and other bioproduct from offshore seaweed culture) ist ein französisches Projekt zur nachhaltigen und ertragsoptimierten Produktion von Seetang und dessen möglicher bioenergetische Nutzung. Weitere Projekte zur Optimierung der Biomasseerträge sind beispielsweise **Bioimprove** (Better trees for bioenergy and material production) in Finnland, bei dem insbesondere auch mit genetisch veränderten Baumarten geforscht wird und das deutsche Projekt **Greenergy** (Cultivation of short rotation trees on grassland rotation trees on grassland locations for the increase of raw material supply for energetical utilization of wood). Ein weiteres Projekt ist das Projekt **RENEWAL** (Improving cell walls for use as a renewable industrial feedstock), das sich auf die genetische Veränderung von Zellwänden hinsichtlich einer verbesserten Zuckerausbeute bezieht.

Cluster Konversion

Das Hauptforschungsfeld im Bereich Bioraffinerien ist die Entwicklung und Optimierung von Konversionsverfahren. Projekte wie **CLIB2021** (Cluster Industrial Biotechnology) oder **Cluster: Bio-Catalysis 2021** (Sustainable Bio-Catalysis breaking new ground) fokussieren sich auf die Weiterentwicklung von Biokatalysatoren, Mikroorganismen und Produktionsmethoden für die Herstellung von Monomeren und Polymeren. Andere Projekte beschäftigen sich mit der Konditionierung von Biomasse.

Projekte wie **Bio Sos** (Sustainable Biorefinery) untersuchen mögliche nachhaltige Konversionspfade zur Weiterverarbeitung von Pflanzenrückständen. Das Projekt **Future Biorefinery** untersucht unterschiedliche Nutzungspfade (Konversionswege) von Holz. Die Nutzung von Lignozellulose als Rohstoff und die Entwicklung geeigneter Konversionspfade ist Untersuchungsgegenstand von Projekten wie **AFORE** (Added-value from chemicals and polymers by new integrated separation, fractionation and upgrading technologies). Weitere Projekte wie **NILE** (New Improvements for Ligno-cellulosic Ethanol) oder **KACELLE** (Kalungborg Cellulosic Ethanol Project) oder **Futurol** spezialisieren sich auf die Konversion von Lignozellulose zu Bioethanol und intendieren eine verbesserte Zuckerfermentierung zu entwickeln. Das Projekt **KACELLE** schließt auch die Untersuchung der Nutzung des Bioethanols in Kraftfahrzeugen ein.

Mögliche Nutzungspfade von Mikroalgen werden in Projekten wie **EtaMax** (Biogas from waste and microalgae through combined bio/ hydro-thermal gasification) und **IIPBA** (Integration of process improvements for production of biodiesel from algae), **All-Gas** (Industrial scale

demonstration of sustainable algae cultures for biofuel production) oder **LIPIDO** (Optimizing Lipid Production by planktonic Algae) untersucht. Im Projekt **EtaMax** werden Biomassereststoffe aus Kommunen und Industrie zu Biogas fermentiert und das dabei freigesetzte CO₂ zur Produktion von Mikroalgen genutzt. Die Rückstände der Fermentation werden vergast. Die Projekte **IPIPBA** und **LIPIDO** untersuchen hingegen die Extraktion von Ölen und Fetten aus Mikroalgen und deren Synthese zu Biodiesel.

Neben der Weiterentwicklung von verschiedenen Konversionsprozessen richtet die Forschung ihr Augenmerk ebenfalls auf die Anpassung von konventionellen Raffinerien für die Mitnutzung und Weiterverarbeitung von Biomasse. Das Projekt **Biocoup** versucht hierbei die Integration von Industrien (Energie, Papier und Nahrungsmittel) als zusätzliche Rohstoffquelle für die konventionelle Mineralölindustrie.

Ferner wird im Projekt **Hyvolution** (Non-thermal production of pure hydrogen from biomass) die Herstellung von Wasserstoff mit Hilfe von thermophilen und phototrophischen Bakterien untersucht.

Pyrolyseverfahren werden beispielhaft im Projekt **The Bio-oil Refinery** erforscht. Über eine Schnellpyrolyse (fast pyrolysis) sollen hier aus Pyrolyseöl grüne Chemikalien, Kraftstoffe und Energie produziert werden.

Des Weiteren werden auch Konversionsverfahren zur Nutzung von Stoffen wie Glycerol getestet. **Glyfinery** (Sustainable and integrated production of liquid biofuels, bioenergy and green chemicals from glycerol in biorefineries) setzt dabei auf die Entwicklung neuer, genetisch modifizierter Biokatalysatoren um einen hoch effizienten Fermentierungsprozess für Glycerol zu entwickeln.

Gesamtkonzept

Mehrere Projekte richten ihr Augenmerk auf die Demonstration und Konzeptionen integrierter Bioraffinerien von der Biomassegewinnung hin zur Vermarktung von Endprodukten. Oftmals werden unterschiedliche Rohstoffe getestet und nach gängigen Effizienz- und Nachhaltigkeitsgesichtspunkten bewertet. Im Projekt **Biofuels 2021** (Innovative Biokraftstoffe aus der Bioraffinerie der Zukunft) wird die Verarbeitung von LignoZellulose zu Biokraftstoffen unter Variierung verschiedener Prozessgrößen und –faktoren getestet, um ein integriertes Konzept für eine LignoZellulose verwendende Bioraffinerie zu entwickeln. Das EU Projekt **BIOCORE** (BIOCOmmodity REfining) untersucht neben der Erzeugung von Energie z.B. in Form von Biotreibstoffen aus Lignozellulose verstärkt die Weiterverarbeitung von Agrar- und Holzrohstoffen zu Bulk-Chemikalien, Polymeren und Spezialchemikalien. **Bio4Energy** entwickelt ausgehend von der Zellstoffindustrie eine integrierte Bioraffinerie. Andere EU Projekte wie **BIOLYFE** fokussieren sich hingegen auf die Prozessoptimierung von Versuchsanlagen. **BIOLYFE** optimiert die gesamte Beschaffungskette sowie die Konversionsprozesse für eine Produktionsanlage mit einer jährlichen Produktion von 40.000 Tonnen Bioethanol aus Lignozellulose. **ProEthanol2G** untersucht die weitere Optimierung des Inbicon Prozesses insbesondere hinsichtlich der stofflichen Nutzung von Koppelprodukten.

Netzwerk

Netzwerkprojekte zielen vorwiegend auf die wissenschaftliche Vernetzung von Ländern, Instituten oder industriellen Vertretern. Beispielhaft für länderübergreifende Kooperationen und Netzwerke sind die Projekte **BioSynergie** und **EuroBioRef**. **BioSynergie** zielt auf die Pro-

duktion von Biomasse für die wettbewerbsfähige und umweltfreundliche Synthese von Bioprodukten und Produktion von Sekundärenergieträgern nach dem Bioraffinerieprinzip ab. Dieses beinhaltet die Anwendung eines innovativen und voll integrierten, synergetischen Bioraffineriekonzepts um technische Neuerungen und Verbesserungen voranzutreiben und europaweites Biomassepotential besser zu nutzen. **EuroBioRef** (European Multilevel Integrated Biorefinery Design for Sustainable Biomass Processing) betrachtet die komplette Transformation von Biomasse zu kommerziellen Produkten in einem kollaborativen europaweitem Netzwerk von wissenschaftlichen und industriellen Partnern verschiedenster Stufen. Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines hoch integrierten und diversifizierten Konzepts das verschiedene Biomassequellen, Konversionsprozesse und Endprodukte inkorporiert und die Fragmentierung der Biomasseindustrie und ihrer Partner überwindet. Neben der aktuellen Verbundforschung bezwecken Projekte wie **Star-Colibri** (Strategic Targets for 2020 - Collaboration Initiative on Biorefineries) insbesondere die Nutzung von Synergien im Hinblick auf den Austausch von Forschungsergebnissen, um die Marktreife neuer Entwicklungen zu beschleunigen und der europaweiten Fragmentierung der Forschung entgegenzuwirken. Das **BIOMAP** Projekt führt diese Idee in Form einer integrierten Datenbank und interaktiven Karte weiter, die Informationen zu Forschungsprojekten und industriellen Akteuren mit legislativen Rahmenbedingungen visualisiert und in Verbindung zu bringen sucht.

Marktanalyse

Im Zuge der Entwicklung von Bioraffinerien gewinnen auch die Analyse der Rohstoffmärkte und die Vermarktung von Bioraffinerieprodukten zunehmend an Relevanz. Die Marktanalyse kann von der Offenlegung von Marktpotentialen und passenden Unternehmensstrategien bis zu einer ganzheitlichen Betrachtung unter Berücksichtigung technischer, sozialer und ökologischer und politischer Faktoren reichen. So wurde im EU-Projekt **BIOPOL**, welches 2009 abgeschlossen wurde, eine ganzheitliche Szenariobewertung verschiedener Bioraffineriekonzepte vorgenommen. Das 2010 abgeschlossene **ValueWaste** Projekt in Finnland hingegen fokussiert sich auf die Bewertung der Sozialverantwortlichkeit von betriebswirtschaftlichen Möglichkeiten bei der Weiterverarbeitung von Bioabfällen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Wesentlichen in der Entwicklung, Evaluation und Demonstration von Gesamtkonzepten, um der Bioraffinerie zum industriellen Durchbruch zu verhelfen.

3 Generische Bioraffineriekonzepte

3.1 Definition und Klassifikation von Bioraffinerien

Gegenwärtig existiert eine Fülle an verschiedenen Definitionen für das Konzept Bioraffinerie. Im Rahmen eines durch das Projekt initiierten Workshops wurde in Zusammenarbeit mit Stakeholdern aus Forschung, Politik und Wirtschaft folgende Definition erarbeitet: Eine Bioraffinerie verwendet als hauptsächlichen Input Biomasse (im Sinne der Definition laut § 2 (1) der Biomasseverordnung (BiomasseV)). Die Verarbeitung beinhaltet in jedem Fall eine Separation von Stoffströmen, die nicht nur rein physikalisch erfolgen sollte. Die Verarbeitung kann zwei Prinzipien folgen: zum einem dem Auftrennen des Feedstocks bis auf Molekularebene, zum anderen können aber auch bestehende Strukturen und Bindungen genutzt werden. Es wird mehr als ein Endprodukt mit hoher Wertschöpfung generiert: neben der Erzeugung von Netto-Energie wird auch ein Hauptprodukt stofflich genutzt. Diese ursprünglich in Rahmen dieses Projekts entwickelte eigene Bioraffinerie-Definition wurde im Laufe des Projekts zugunsten der Definition der Internationalen Energie Agentur (IEA) Task42 aufgegeben, da diese inzwischen aufgrund ihres weiten Charakters in verschiedenen nationalen und internationalen Gremien und Stakeholdergruppen akzeptiert ist: *“Biorefining is the sustainable processing of biomass into a spectrum of marketable products and energy”*¹, wobei folgende Schlüsselwörter die Definition weiter präzisieren:

- Sustainable: Maximierung der Wirtschaftlichkeit und sozialer Aspekte, Minimierung von Umweltschadeinflüssen, Substitution von fossilen Rohstoffen, Schließung von Kreisläufen wie der Kohlenstoff-, Stickstoff- und weitere Nährstoffkreisläufe
- Processing: upstream processing, Transformation, Fraktionierung, thermochemische und biochemische Konversion, Extraktion, Separation, downstream processing
- Biomass: Anbaubiomasse, Holzbiomasse, Reststoffe, aquatische Biomasse
- Spectrum: mehrere energetische und stoffliche Produkte
- Marketable: kann heute und zukünftig vermarktet werden (nach Volumen und Preis)
- Products: sowohl Zwischenprodukte (Plattformen) als auch Endprodukte wie: Futter- und Nahrungsmittel, Materialien, Chemikalien, Treibstoffe, elektrische Energie und Wärme

Als weiteres Kriterium zur Abgrenzung von Bioraffinerien von konventionellen Anlagen zur Konversion von Biomasse wurde von der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) das Kriterium des Vorhandenseins von „Primär- und Sekundärraffination“ eingeführt (Peters, 2011).

¹ Die Definition der IEA Task 42 ist abrufbar unter: <http://edepot.wur.nl/142932>

Unter Primärraffination wird per Definition die verfahrenstechnischen Schritte zur Auftrennung der Biomassekomponenten in einer Bioraffinerie verstanden. Als Sekundärraffination werden die nach der Primärraffination folgenden Konversions- und Veredlungsschritte in einer Bioraffinerie bezeichnet (VDI 6310, in Bearbeitung).

Nach einer Primärraffination, die der Erzeugung von Plattformen dient, werden in einer Bioraffinerie im Zuge einer Sekundärraffination aus der/den Plattform/en zuerst Halbfabrikate erzeugt, die ganz oder teilweise Vorprodukt bzw. Zwischenprodukt sind und dann - überwiegend am Standort der Bioraffinerie - über weitere Prozessschritte ganz oder teilweise zu Produkten (Fertigfabrikaten) weiterverarbeitet werden (EU 2011). In konventionellen Anlagen zur Konversion von Biomasse hingegen erfolgt in der Sekundärraffination die direkte Umwandlung in ein Hauptprodukt, das in der Regel ein Fertigfabrikat ist. (vergleiche Abbildung 3-1).

Abbildung 3-1: Prozessschema einer Bioraffinerie

Verarbeitungsstufe	Rohstoff	Plattform	Halbfabrikat (Zwischen-Produkt, Vorprodukt)		Produkt
Prozess	Biomassekonditionierung	Primärraffination	Sekundärraffination		Vermarktung
			Konversion	Veredlung	

Quelle: nach European Biorefinery 2030 Vision Document (Peters 2011)

Der Definition der IEA sowie der Erweiterung nach Peters wird innerhalb dieses Projektes gefolgt, da sowohl auf deutscher Ebene als auch auf europäischer Ebene hier Konsens besteht. Sowohl in der deutschen als auch in der gegenwärtig in Entwicklung begriffenen europäischen Roadmap zu Bioraffinerien, wird auf diese Definition zurückgegriffen. Zusätzlich wurden ergänzend zur Definition im Vision Dokument im Sinne einer weiteren Abgrenzung Anlagen beschrieben, die keine Bioraffinerien sind (Peters 2011).

Bioraffinerien lassen sich durch ihre Rohstoffe (Feedstocks), die sie verarbeiten, die Verarbeitungsprozesse, ihre Plattformen (Zwischenprodukte nach einer primären Raffination) sowie durch ihre Endprodukte charakterisieren. Eine Plattform wird hier abweichend vom Klassifikationsansatz der Task42 definiert als ein Zwischenprodukt nach der primären Raffination und nicht als Zwischenprodukt zwischen Rohstoff und Produkt (Cherubini, Jungmeier et al. 2009).

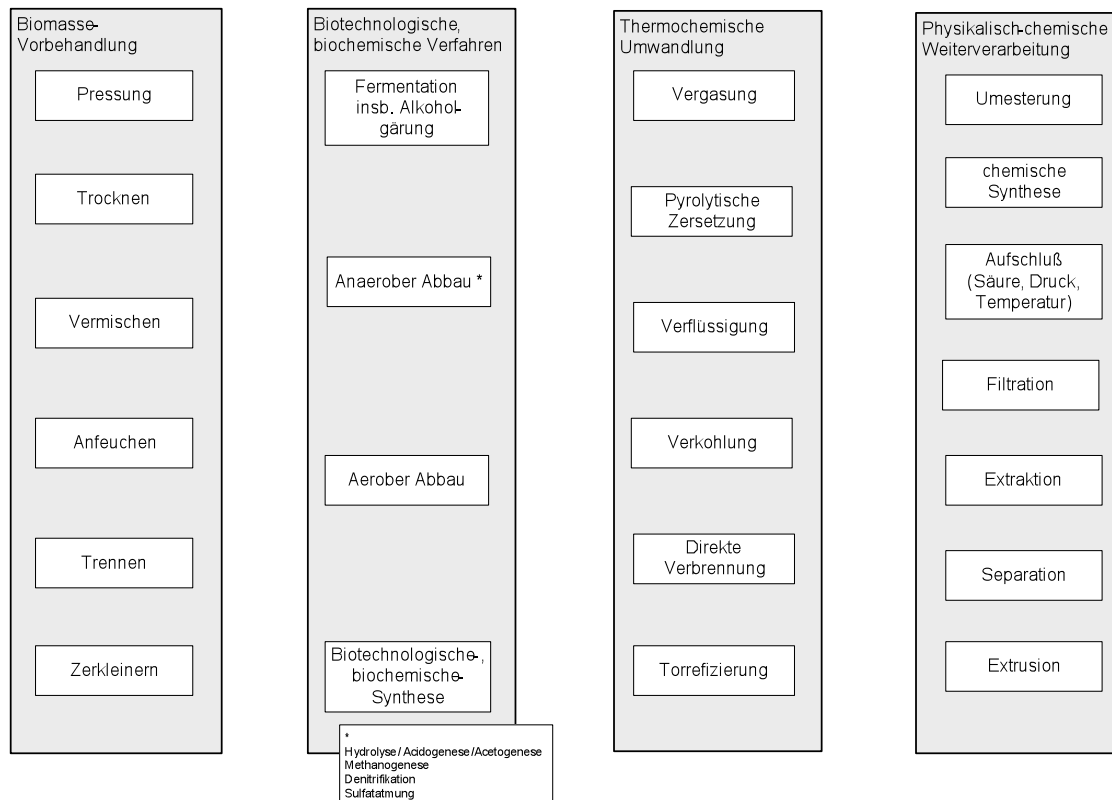
Als Rohstoffe kommen prinzipiell in Frage:

- Anbaubiomasse: z. B. Ölpflanzen, Stärkepflanzen, Zuckerpflanzen, Gräser
- Holzbiomasse: z. B. Waldholz, Kurzumtriebsplantagen Holz
- Aqua-Biomasse: z. B. Algen, Marine Biomasse

- Reststoffe: z. B. Erntereste, biogene Reststoffe der Verarbeitung, Bioabfall

Verarbeitungsprozesse, die in Bioraffinerien eingesetzt werden können, lassen sich prinzipiell gliedern in Vorbehandlung, biotechnologische und biochemische Verfahren, thermochemische Umwandlung und physikalisch-chemische Weiterverarbeitung. Einen Überblick über mögliche Verarbeitungsprozesse in Bioraffinerien zeigt Abbildung 3-2.

Abbildung 3-2: Verarbeitungsprozesse in Bioraffinerien



Quelle: eigene Darstellung

Als Plattformen kommen niedermolekulare Kohlenhydrate (z. B. Lactose, Saccharose), polymere Kohlenhydrate (z. B. Stärke, Inulin, Pektin), Öle wie Pflanzenöle, Pyrolyseöl oder Lipide, Gase wie Biogas oder Synthesegas, organische Säfte, Lignozellulose (Lignin, Zellulose, Hemizellulose), Proteine, Pflanzenfasern oder auch Algenbiomasse in Frage.

Allgemein lassen sich Produkte aus Bioraffinerien den Kategorien stoffliche Produkte, Futter- und Lebensmittel sowie energetische Produkte zuordnen. Unter stoffliche Produkte werden Chemikalien und Werkstoffe zusammengefasst. Energetische Produkte können Treibstoffe wie Biodiesel, Bioethanol, Biomethan, synthetische Treibstoffe, aber auch elektrische Energie oder Wärme sein. Laut IEA Definition, die der Bearbeitung im Projekt zugrunde liegt, ist die Produktion von mindestens einem energetischen als auch mindestens einem stofflichen Produkt notwendig, um als Bioraffinerie zu gelten.

Die Anzahl an Produkten, die eine Bioraffinerie herstellen können, ist fast unbegrenzt. Allein in einer von der NREL veröffentlichten Studie wurden über 300 potentielle Chemikalien, die

aus Zucker und Synthesegas hergestellt werden können, identifiziert (Aden, Bozell et al. 2004). Davon erscheinen insbesondere Ethanol, Furane, Glycerin, Kohlenwasserstoffe, Milchsäure, Bernsteinsäure, Hydroxypropionsäuren, Lävulinsäure, Sorbitol und Xylit zur Produktion in Bioraffinerien geeignet (Bozell and Petersen 2010).

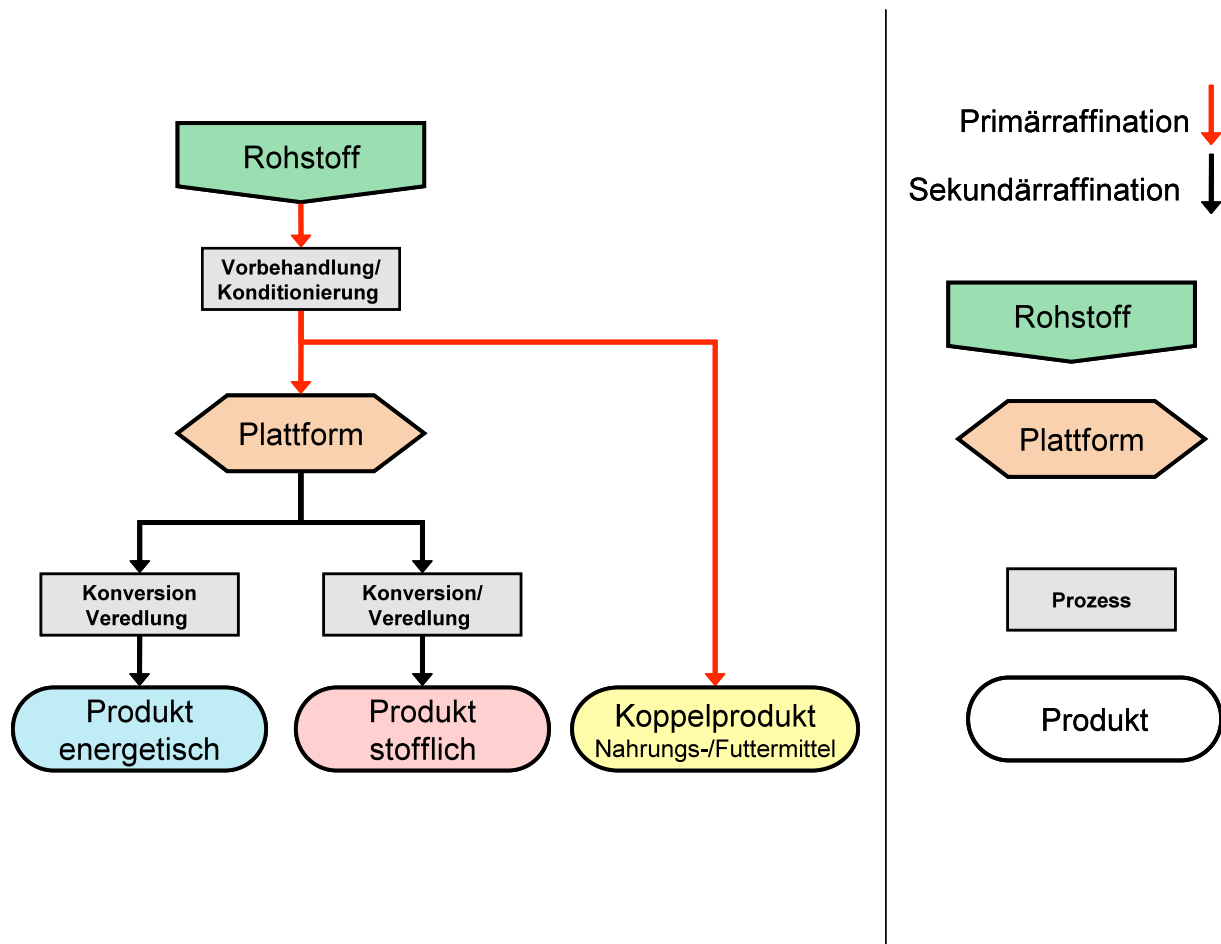
Der modifizierte Klassifikationsansatz der IEA Task 42 klassifiziert nun Bioraffinerien:

1. nach Anzahl und Bezeichnung ihrer Plattformen,
2. nach ihren Produkten und
3. nach ihren Rohstoffen.

Gegebenenfalls kann zusätzlich als viertes Kriterium der Prozess ergänzt werden.

Die prinzipielle Darstellungsweise zeigt Abbildung 3-3. Die rote Pfeile symbolisieren eine Primärraffination, die schwarzen Pfeile eine Sekundärraffination.

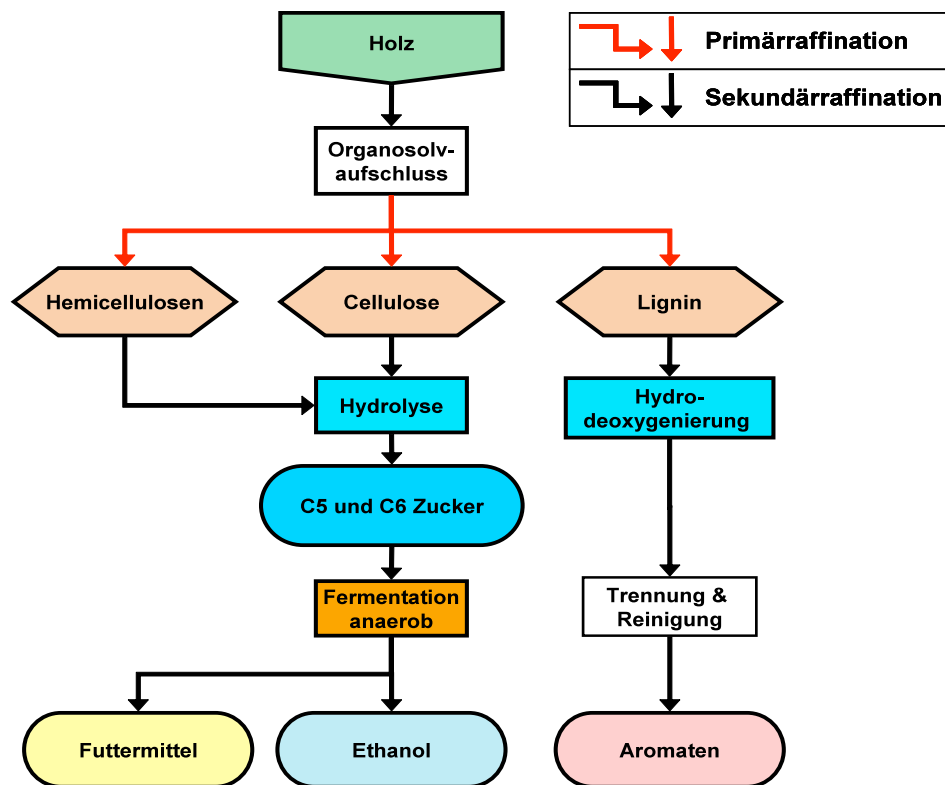
Abbildung 3-3: Darstellungsweise von Bioraffinerien entsprechend der Klassifikation



Quelle; nach Willke, Peters und Jungmeier, 2010

Beispielsweise würde eine Bioraffinerie, die Holz verarbeitet zu Futtermittel, Ethanol und Aromaten entsprechend Abbildung 3-4 bezeichnet werden als: „Drei-Plattform (Hemizellulosen, Zellulose, Lignin) Bioraffinerie für Futtermittel, Ethanol und Aromate aus Holz“.

Abbildung 3-4: Drei-Plattform (Hemizellulosen, Zellulose, Lignin) Bioraffinerie für Futtermittel, Ethanol und Aromaten von Holz



Quelle: nach Willke, Peters und Jungmeier, 2010

3.1.1 Bestehende Bioraffineriekonzepte

Gegenwärtig befinden sich in Deutschland folgende Bioraffinerien in der Entwicklung:

- Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe, Strom und Chemikalien aus Holz der Firma Choren in Freiberg (Sachsen)²,
- Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe und Chemikalien aus Stroh des KIT in Karlsruhe (Baden-Württemberg)³,
- Ein-Plattform (Stärke) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier- Futter aus stärkehaltigem Getreide der Firma Südzucker/CropEnergies in Zeitz (Sachsen-Anhalt)⁴,

² Siehe: <http://www.choren.com/de>, letzter Zugriff am 22. Juni 2011

³ Ein dreistufiges Verfahren bestehend aus Schnellpyrolyse, Flugstromvergasung und Synthesekraftsofferzeugung: <http://www1.fzk.de/biolig/konzept.html> ; letzter Zugriff am 22. Juni 2011

⁴ Siehe: <http://www.cropenergies.com/de/Home> ; letzter Zugriff am 22. Juni 2011

- Zwei-Plattform (organische Säfte und Presskuchen) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras der Firma Biowert in Brensbach (Hessen)⁵,
- Zwei-Plattform (organische Säfte und Grasfaser) Bioraffinerie für Futter, Kosmetik, Biogas, Milchsäure und Lysin aus Gras der Firma biopos in Selbelang (Brandenburg) (Kamm, Schönicke et al. 2009)⁶.
- Drei-Plattform (Zellulose, HemiZellulose, Lignin) Bioraffinerie für Glukose, Xylose und Werkstoffe aus Holz, entwickelt durch ein Konsortiums unter Koordination der Dechema in Leuna (Sachsen Anhalt)⁷,
- Drei-Plattform (Zellulose, Hemizellulose und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien aus Stroh der Firma Süd-Chemie in München (Bayern)⁸,

Neben den hier genannten Bioraffinerien gibt es Anlagen, die stärkehaltige Früchte wie Mais, Weizen, Kartoffeln, Erbsen oder Mikroalgen verarbeiten. Eine solche Anlage wird z. B. in Frankreich von Roquette Frères⁹ betrieben und wird nach Klassifikationsschema bezeichnet als „Ein-Plattform (Stärke) Bioraffinerie für Stärke, Chemikalien und Tierfutter von stärkehaltigen Früchten“ (siehe dazu auch (de Jong, Langeveld et al. 2007)). Da keine energetischen Produkte erzeugt werden, ist sie aber nach Definition der IEA keine Bioraffinerie.

Eine weiteres Bioraffinerie- Konzept ist durch den Ausbau von Papierfabriken gegeben, in denen neben dem Hauptprodukt Papier weitere energetische Produkte (Strom, Wärme, Treibstoffe) und eventuell weitere stoffliche Produkte (Chemikalien) erzeugt werden (Dale and Kim 2010). Zum einen besteht die Möglichkeit, überschüssigen Zucker in der Schwarzlauge zu Alkoholen zu fermentieren, zum anderen können die Ligninbestandteile des Holzes verbrannt und zu Wärme und Strom transformiert werden. Das Verbrennen des Ligninanteils, welches von der Schwarzlauge abgetrennt wird, ist bereits Stand der Technik und wird z. B. in der Zellstoff Stendal GmbH¹⁰ angewendet. Neben der Erzeugung von überschüssigem Strom, werden in Stendal zusätzlich in geringen Mengen Tallöl und Terpentin gewonnen. Eine solche Bioraffinerie würde bezeichnet als „Drei-Plattform (Hemizellulosen, Zellulosen, Lignin) Bioraffinerie für Papier, Strom, Wärme und Chemikalien aus Holz“. Abbildung 3-5 visualisiert eine solche papierherstellende Bioraffinerie. Denkbar ist auch die Fermentation von Hemizellulosen zu Alkoholen. Eine solche Anlage ist noch nicht Stand der Technik; ein erstes Konzept für eine solche Anlage hat die Firma M-real Hallein AG in Österreich entwic-

⁵ Siehe: <http://www.biowert.de> ; letzter Zugriff am 22. Juni 2011

⁶ Siehe auch "Pilotvorhaben Grüne Bioraffinerie: Demonstrationsvorhaben im Havelland, Selbelang-Teltow" unter <http://www.biopos.de/Pilotvorhaben%20Gr%FCne%20Bioraffinerie.doc> ; letzter Zugriff am 22. Juni 2011

⁷ "Pilotprojekt LignoZellulose-Bioraffinerie" unter <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22027405.pdf> ; letzter Zugriff am 22. Juni 2011

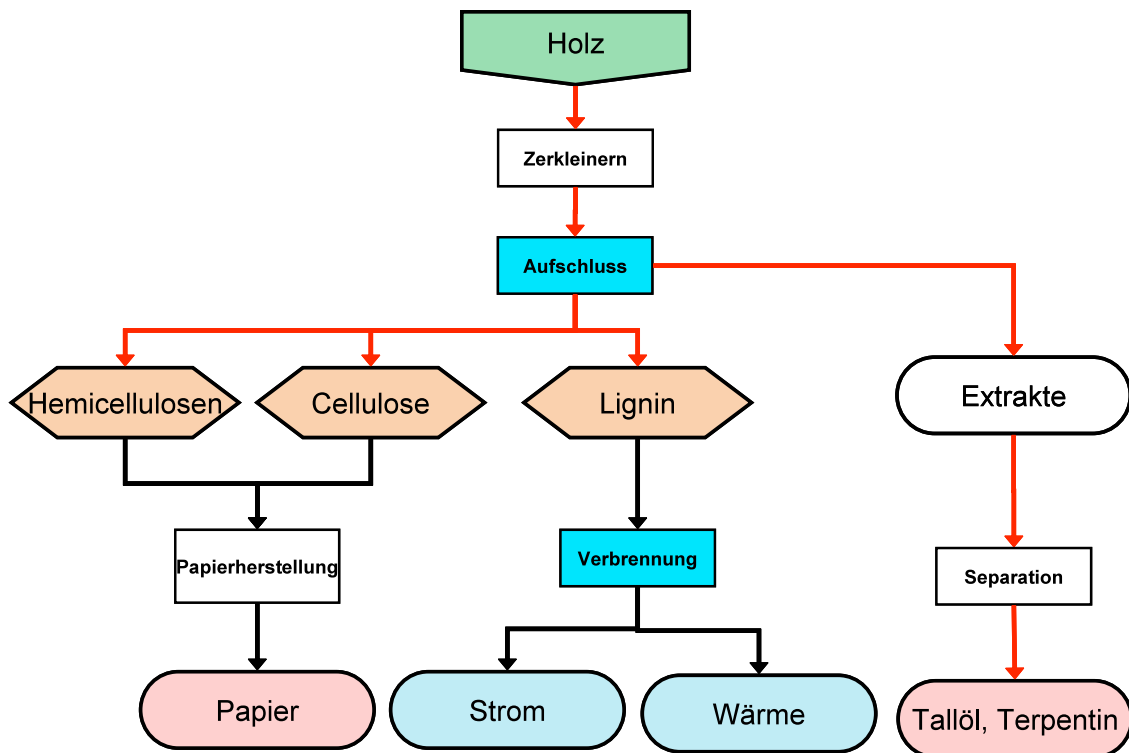
⁸ Siehe: http://www.sud-chemie.com/scmcms/web/page_de_7440.htm ; letzter Zugriff am 22. Juni 2011

⁹ Siehe: www.roquette.com ; letzter Zugriff am 22. Juni 2011

¹⁰ Siehe: <http://www.zellstoff-stendal.de/> ; letzter Zugriff am 22. Juni 2011

kelt. Interessant erscheint auch die stoffliche Nutzung von Lignin. Dies ist in der Regel aufgrund von Verunreinigungen im Zusammenhang mit dem technischen Aufschluss nicht möglich. Neue Verfahren werden gegenwärtig entwickelt¹¹, die eine Abtrennung von qualitativ höherwertigem Lignin erlauben.

Abbildung 3-5: Drei-Plattform (Hemicellulosen, Zellulosen, Lignin) Bioraffinerie für Papier, Strom, Wärme und Chemikalien aus Holz



Quelle: eigene Darstellung, orientiert an Zellstoff Stendal GmbH

Neben den beschriebenen Konzepten befinden sich gegenwärtig Bioraffinerien zur Verarbeitung von Mikroalgen in der Entwicklung. Dieses Konzept erscheint deshalb vielversprechend, da Mikroalgen im Vergleich mit Landpflanzen hinsichtlich der Photosyntheseleistung einen wesentlich höheren Wirkungsgrad erzielen können (Schenk, Thomas-Hall et al. 2008). Unter optimalen Wachstumsbedingungen können Mikroalgen bis zu 5 % der Sonnenenergie in chemische Energie umwandeln, Landpflanzen hingegen nur 0,5 – 1 %. Auf Basis der hohen Ausbeuten haben erste Potenzialstudien ergeben, dass Biodiesel aus Algen theoretisch fossile Treibstoffe vollständig substituieren könnte (Chisti 2008). Ein weiterer Vorteil der Nutzung von Algen ist, dass sie ganzjährig angebaut werden können und, dass zur Schonung von Frischwasserreserven auch Salz- oder Abwasser eingesetzt werden können (Schenk, Thomas-Hall et al. 2008). Zudem ermöglichen Mikroalgen prinzipiell die Herstellung nicht

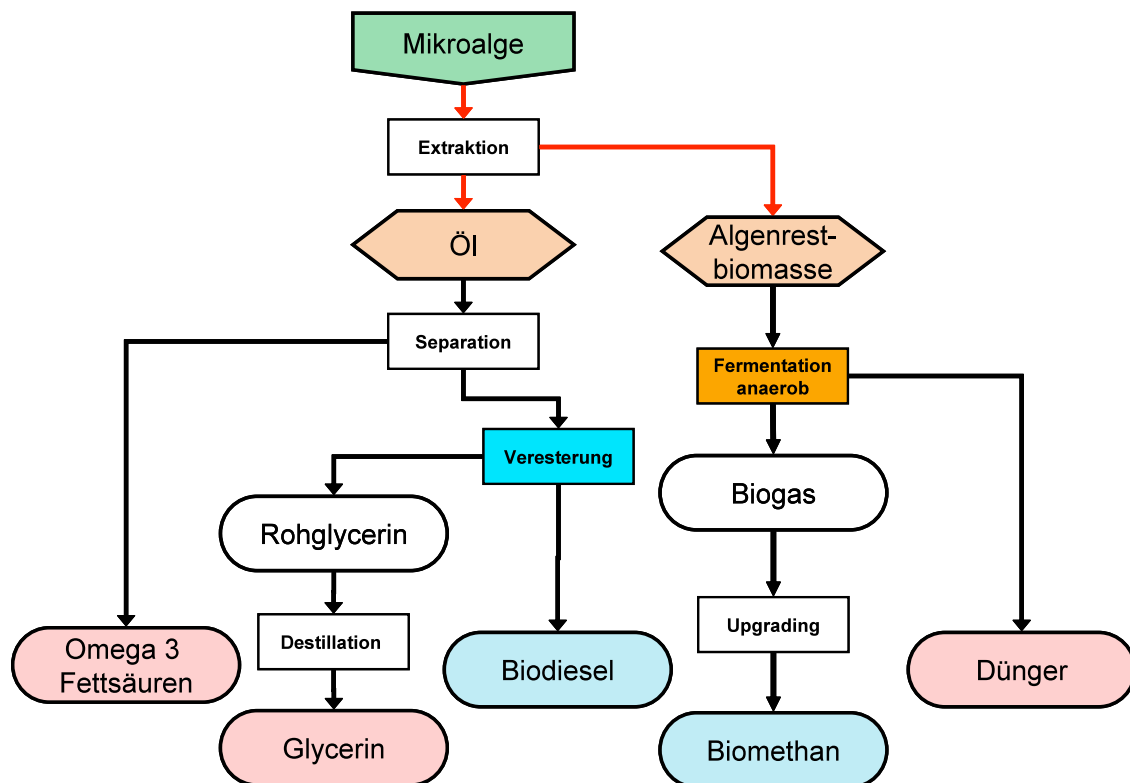
¹¹ Die Firma Metso hat z. B. einen solchen Prozess entwickelt:
http://www.metso.com/pulpandpaper/recovery_boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090513-22575-6FE87?OpenDocument ; letzter Zugriff am 22. Juni 2011

toxischer und biologisch abbaubarer Biotreibstoffe. Einige Algenarten können auch direkt Wasserstoff produzieren (Das and Veziroglu 2001).

Die theoretisch hohen Erträge werden jedoch meistens nicht erreicht, da das Wachstum von vielen Faktoren wie Temperatur, Fluidodynamik, Gasaustausch, Massentransfer, Lichtverhältnisse, Wasserqualität (pH-Wert, Salinität), Verfügbarkeit von Mineralstoffen und Kohlenstoff und Zelleigenschaften abhängt.

Vorstellbar sind Bioraffinerien, welche die Ölbestandteile der Algen zu Biodiesel (Mata, Martins et al. 2010) und den Kohlenhydratanteil (Restalgenbiomasse) zu Biogas (Mussnug, Klassen et al. 2010) verarbeiten. Eine mögliche Konfiguration: „Zwei-Plattform (Öl, Biogas) Bioraffinerie für Omega3-Fettsäuren, Glycerin, Biodiesel, Biogas, Strom, Wärme und Dünger aus Mikroalgen“ ist in Abbildung 3-6 dargestellt.

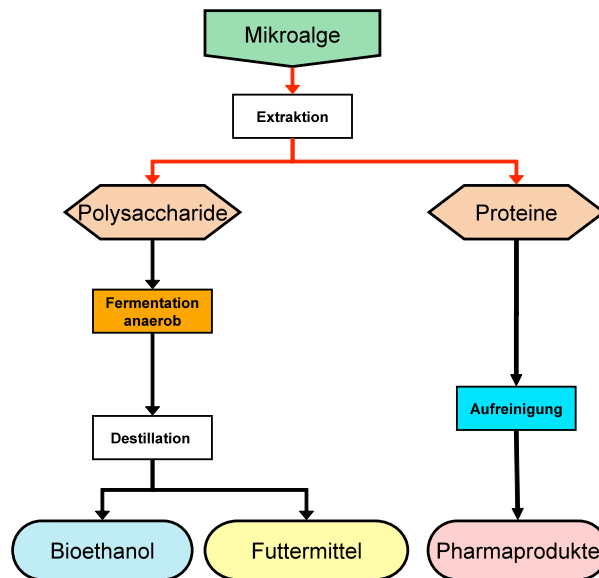
Abbildung 3-6: Zwei-Plattform (Öl, Algenbiomasse) Bioraffinerie für Omega3-Fettsäuren, Glycerin, Biodiesel, Biogas, Strom, Wärme und Dünger aus Mikroalgen



Quelle: eigene Darstellung

Ebenfalls denkbar ist z. B. eine „Zwei-Plattform (Polysaccharide, Proteine) Bioraffinerie für Bioethanol, Futtermittel und Pharmaprodukte aus Mikroalgen“ (siehe Abbildung 3-7), die hauptsächlich Alkohole durch Fermentation aus Polysacchariden erzeugt. Nach Destillation fallen Bioethanol als energetisches und Futtermittel als stoffliches Produkt an. Zusätzlich werden aus der Mikroalge im ersten Schritt Proteinbestandteile extrahiert, die etwa als Pharmaprodukte genutzt werden können.

Abbildung 3-7: 2-Plattform (Polysaccharide, Proteine) Bioraffinerie für Bioethanol, Futtermittel und Pharmaprodukte aus Mikroalgen



Quelle: eigene Darstellung

Eine solche Bioraffinerie würde dann bezeichnet werden als 2-Plattform (Polysaccharide, Proteine) Bioraffinerie für Bioethanol, Futtermittel und Pharmaprodukte aus Mikroalgen.

3.1.2 Auswahl generischer Bioraffineriekonzepte

Es ist gezeigt worden, dass sich eine Vielzahl von Bioraffinerie-Konzepten in unterschiedlichen Stadien der Forschung und Entwicklung befindet. Aufgrund der strategischen Ausrichtung des Projektes hinsichtlich der Integration von Bioraffinerien in das deutsche Energiesystem werden hier nur solche Bioraffinerien näher untersucht,

- deren Technologien kurz- bis mittelfristige zur Verfügbarkeit stehen werden
- für deren Haupt- und Nebenprodukte es relevante Märkte gibt
- die aufgrund geographischer Gegebenheiten in Deutschland sinnvoll erscheinen.

Somit werden keine Bioraffinerien untersucht, deren Feedstock in Deutschland entweder aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen nicht bezogen werden kann.

Die im Folgenden aufgeführten Konzepte stehen dabei generisch für den jeweiligen Anlagentyp. Die genaue Ausführung der Anlagen wird sich in der Praxis von der hier beschriebenen unterscheiden, so dass insbesondere in der Stoffstromanalyse (vgl. Kapitel 5) abweichende Ergebnisse bei zukünftigen realen Anlagen zu erwarten sind. Die Beschreibung der technischen und Kostendaten, sowie die resultierenden Mengenströme und Emissionen sind als typische Werte für das beschriebene Konzept zu verstehen.

Bereits heute Stand der Technik und weit verbreitet sind Anlagen zur Herstellung von Biodiesel und Bioethanol. Ebenfalls kommerziell betrieben wird eine Grasveredlungsanlage, die

sich in Brensbach befindet. Für alle drei Typen bestehen relevante Märkte für ihre Nebenprodukte (Glycerin, Tierfutter, Dämmmaterialien, Kunststoffe).

Noch nicht im kommerziellen Status befinden sich Bioraffinerien, die Lignozellulose verarbeiten (obwohl die Vergasungstechnologie zur Erzeugung von Synthesegas bereits heute angewandt wird), sowie die Fischer-Tropsch-Synthese zur Erzeugung von synthetischen Treibstoffen, die bereits heute Stand der Technik ist. Die Produkte der Fischer-Tropsch-Synthese sind Kohlenwasserstoffe wie Flüssiggase, Naphtha, Benzin, Kerosin und Paraffine. Paraffine lassen sich in Kohlenwasserstoffe mit kürzerer Kettenlänge spalten, so dass ausschließlich Treibstoffe, Naphtha und Gase entstehen. Von einer Beschränkung dieser Produkte durch den Markt ist nicht auszugehen, da eine große Nachfrage nach Treibstoffen besteht und Naphtha eine Ausgangssubstanz für die Petrochemie ist.

Der Aufschluss von Lignozellulose, die Hydrolyse von Zellulose und Hemizellulose sowie die Fermentation von Zuckern sind bereits heute Stand der Technik. Andererseits existiert weltweit noch keine kommerziell betriebenen Anlagen, deren Produkte nicht ausschließlich energetisch sind. Aufgrund etlicher Forschungsaktivitäten in diesem Bereich (Michels and Wagemann 2010)¹², ist aber davon auszugehen, dass in naher Zukunft ein Markt für Lignin bestehen wird und die entsprechende Technologie zur Bereitstellung zur Verfügung stehen wird (siehe dazu auch Abschnitt 6.1 und 6.2).

Weiter entwickelte Papierfabriken erzeugen neben dem Hauptprodukt Zellstoff nur in geringen Mengen Nebenprodukte wie Chemikalien, etwa Tallöl oder Aromate, die quantitativ betrachtet nicht marktrelevant sind. Deshalb wird dieser Typ Bioraffinerie im Rahmen dieser Studie nicht näher untersucht. Algenbioraffinerien sind gegenwärtig in der Entwicklung und es ist noch nicht klar, wann diese wirtschaftlich betrieben werden können.

Aufgrund der oben beschriebenen Kriterien werden die folgenden Bioraffinerien innerhalb dieser Studie näher betrachtet:

- Typ I: Ein-Plattform (Stärke) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier-Futter aus stärkehaltigem Getreide
- Typ II: Ein-Plattform (Öl) Bioraffinerie für Biodiesel, Tierfutter und Glycerin aus ölhaltigen Pflanzensamen
- Typ III: Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe, Strom und Naphtha aus Restholz/KUP
- Typ IV: Drei-Plattform (Hemizellulose, Zellulose und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh
- Typ V: Zwei-Plattform "grüne" (organische Säfte und Presskuchen) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras

¹² In den USA fördert das Department of Energy die Weiterentwicklung: siehe dazu: <http://genomicscience.energy.gov/biofuels/#page=news> ; letzter Zugriff am 22. Juni 2011

Die Auswahl wurde in Zusammenarbeit mit einem interdisziplinären Expertenteam aus Wissenschaft, Politik und Industrie im Rahmen eines Stakeholderworkshops abgestimmt (siehe Anhang, Kapitel 9.2).

3.2 Beschreibung der fünf generischen Bioraffineriekonzepte

Im Folgenden werden die fünf generischen Bioraffineriekonzepte anhand ihrer Klassifikationsschemata beschrieben, sowie die technischen und Kostendaten dargestellt. Für die Darstellung wird das Basisjahr 2020 als Ausgangspunkt gewählt, da davon ausgegangen wird, dass alle betrachteten Bioraffinier-Typen zu diesem Zeitpunkt kommerziell verfügbar sind.

Zudem wird ein Ausblick bis 2030 angestellt. Dazu werden die technischen und Kostendaten der Bioraffineriekonzepte anhand von Lernkurven fortgeschrieben. Die zugrunde liegende Methodik wird in Kapitel 5 detailliert beschrieben. Um einen Überblick über die Entwicklung im Vergleich zum Ausgangszustand zu bekommen, werden die Ergebnisse der Berechnungen bereits in diesem Kapitel vorgestellt.

Die Jahreszahlen 2020 und 2030 sind weniger wörtlich als solche zu verstehen, sondern markieren vielmehr den Ausgangszustand bzw. die Weiterentwicklung der beschriebenen Technologien.

Folgende technische Parameter werden zur Charakterisierung der generischen Bioraffinerien verwendet (Tabelle 3-1):

Tabelle 3-1: Technische Parameter zur Beschreibung der Bioraffinier-Typen

Technische Parameter	Einheit	Beschreibung
Energiegehalt Input	MWh/a	Unterer Heizwert der eingesetzten Biomasse pro Jahr
Biomasse Input	t/a	Masse der Biomasse pro Jahr
Energiegehalt Output	MWh/a	Unterer Heizwert des energetischen Hauptprodukts pro Jahr
Leistung Input	MW	Energiegehalt Input / typ. Auslastung
Leistung Output	MW	Energiegehalt Output / typ. Auslastung
Effizienz bez. auf Hauptprodukt	%	Energiegehalt Output / Energiegehalt Input
typ. Auslastung	h/a	Stunden pro Jahr, die die Anlage läuft
Lebensdauer	Jahre	Anzahl der Jahre, die die Anlage in Betrieb ist

Quelle: eigene Darstellung

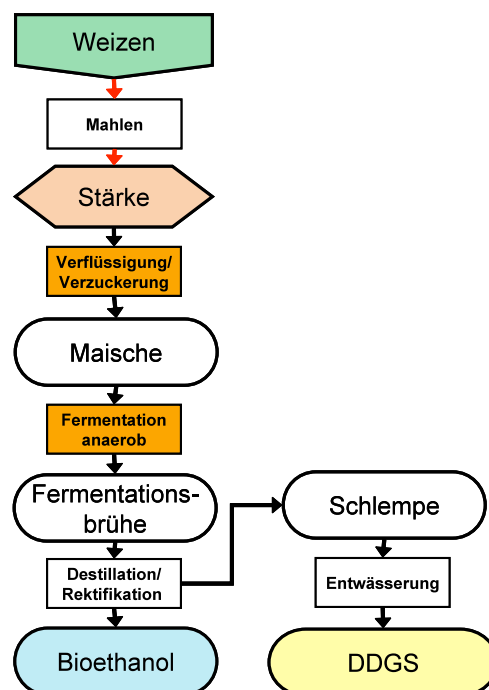
3.2.1 Typ I: Ein-Plattform (Stärke) Bioraffinerie für Bioethanol und Tierfutter aus stärkehaltigem Getreide

In diesem Typ Bioraffinerie wird Weizen zu Bioethanol und Tierfutter verarbeitet. Der Prozess ist ausgereift und wird in vielen Anlagen in Deutschland kommerziell eingesetzt. Es wird eine typische Anlage (bezüglich etwa der Größenordnung und technischen Daten) beschrieben.

3.2.1.1 Prozess und technische Kenndaten

Entsprechend des Klassifikationsschema ergibt sich eine Darstellung einer solchen Bioraffinerie wie in Abbildung 3-8 abgebildet.

Abbildung 3-8: Ein-Plattform (Stärke) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier- Futter aus stärkehaltigem Getreide



Quelle: eigene Darstellung

Für die Produktion von Bioethanol aus Weizen wird zunächst von einer Jahresproduktion von 91.000 t Ethanol ausgegangen, was einem Bedarf von ca. 240.000 t Weizen oder einem energetischen Gehalt von ca. 1.100.000 MWh pro Jahr entspricht. Dieser Wert stimmt in etwa mit den durchschnittlichen Kapazitäten deutscher Ethanolanlagen überein (Schmitz, Henke et al. 2009). Als Koppelprodukt der Ethanolerzeugung entstehen ca. 10 Liter Schlempe pro Liter Ethanol, die durch Trocknung und Pelletierung zu „*dried distillers grains and solubles*“ (DDGS) verarbeitet werden. Das Gewicht des DDGS entspricht dann ca. dem Gewicht des Ethanols (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung 2007).

Für 2030 wird angenommen, dass die Effizienz der Anlage (bezogen auf das Hauptprodukt) sich von 60,9 % auf 65 % verbessert, was einer Erhöhung der Ethanolproduktion um ca. 6000 t pro Jahr und Anlage entspricht. Eine Zusammenstellung der für die Bioraffinerie angenommen technischen Parameter ist in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Technische Parameter der untersuchten Ein-Plattform (Stärke) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier- Futter aus stärkehaltigem Getreide

Technische Parameter	Einheit	2020	2030
Energiegehalt Input	MWh/a	1.112.020	1.112.020
Biomasse Input	t/a	236.600	236.600
Energiegehalt Output	MWh/a	677.380	722.813
Leistung Input	MW	139	139
Leistung Output	MW	85	90
Effizienz bez. auf Hauptprodukt	%	61	65
typ. Auslastung	h/a	8000	8000
Lebensdauer	Jahre	20	20
Ethanol	t/a	91.000	97.100
DDGS	t/a	91.000	97.100

Quelle: eigene Berechnungen

Eine detaillierte Beschreibung der untersuchten Bioraffinerie sowie des Standes der Technik befindet sich im Anhang.

3.2.1.2 Kostenstruktur der untersuchten generischen Bioraffinerie

Die Investitionen einer Anlage, wie sie hier beschrieben ist, werden für den Ausgangszustand in 2020 auf 66 Millionen Euro geschätzt. Dies entspricht -bezogen auf das Hauptprodukt Ethanol - spezifische Investitionskosten in Höhe von 775 €/kW_{out}.

Die Fixkosten einer solchen Anlage werden entsprechend des im BMU-Förderprogramms erarbeiteten Methodenhandbuchs (Thrän, Fischer et al. 2010) in Abhängigkeit von der Höhe der Investition berechnet. Es wird angenommen, dass jährlich für Wartung und Reinigung 2 % der Investition, für die Verwaltung 0,75 %, für die Versicherung ohne Bau 1 % und für „Unvorhergesehenes“ 0,5% der Investition anfallen. Die jährlichen Personalkosten werden mit 50.000 €/Jahr und einem Bedarf an 0,25 Angestellte/MW_{output} ermittelt. Für diesen Anlagentyp ergeben sich somit jährliche Fixkosten in Höhe von ca. 3,8 Mio. € pro Jahr. Umgelegt auf das Hauptprodukt entspricht das rund 45 €/kW*a⁻¹.

Die variablen Kosten ohne die Kosten für das Getreide werden auf 5 €/MWh geschätzt und resultieren hauptsächlich aus dem Strombedarf der Anlage.

Für 2030 wird angenommen, dass sich die Investitionen auf 54 Mio. € verringern und die jährlichen Fixkosten auf 2,5 % der Investitionen reduziert werden können. Die spezifischen Investitionskosten für Ethanol betragen 750 €/kW_{out}. Zudem wird eine Arbeitskraft aufgrund von besserer Prozessautomatisierung eingespart. Dies führt zu einer Reduktion der jährlichen Fixkosten in 2030 auf ca. 2,5 Mio. €. Bezogen auf die Leistung der Anlage (Bezug Ethanol) entspricht dies 45 €/kW*a⁻¹ in 2020 und 19 €/kW*a⁻¹ in 2030.

Tabelle 3-3: Kosten der untersuchten Ein-Plattform (Stärke) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier- Futter aus stärkehaltigem Getreide

Kosten	Einheit	2020	2030
spezifische Investition	€/kW _{out}	775	750
Investition	Mio €	66	64
Fixkosten	€/a	3.847.309	2.587.610
Angestellte	Anzahl	21	20
Fixkosten in Bezug auf Leistung Output	€/kW*a	45,4	18,6
variabel Kosten o. Haupt-Input	€/MWh	5,0	5,0

Quelle: eigene Berechnungen

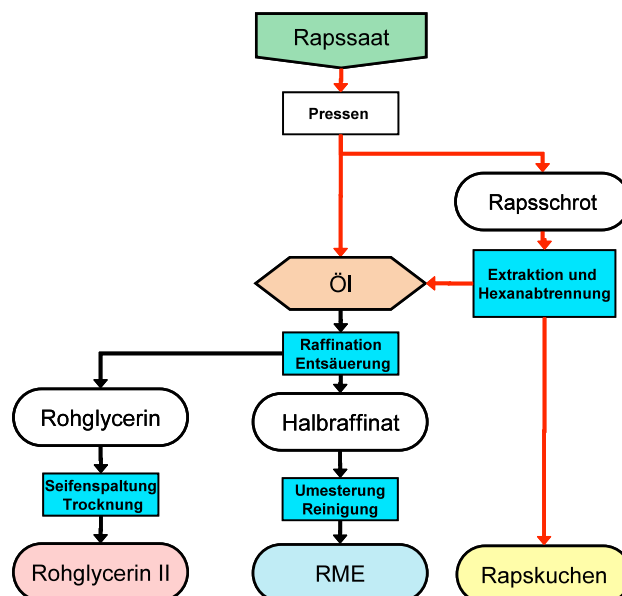
3.2.2 Typ II: Ein-Plattform (Öl) Bioraffinerie für Biodiesel, Tierfutter und Glycerin aus ölhaltigen Pflanzensamen

Dieser generische Bioraffinerietyp verarbeitet Rapssaat zu Rapsmethylester (Biodiesel), Rohglycerin und Rapskuchen. Auch dieser Prozess ist derzeit bereits kommerziell verfügbar und wird in Deutschland an vielen Standorten eingesetzt.

3.2.2.1 Prozess und technische Kenndaten

Die hier untersuchte Bioraffinerie lässt sich entsprechend der Abbildung 3-9 veranschaulichen.

Abbildung 3-9: Ein-Plattform (Öl) Bioraffinerie für Biodiesel, Tierfutter und Glycerin aus ölhaltigen Pflanzensamen



Quelle: eigene Darstellung

Für diese Bioraffinerie wird angenommen, dass im Ausgangszustand pro Jahr in der Anlage ca. 580.000 t/a Rapssaat zu rund 240.000 t Biodiesel (RME), 24.000 t/a Rohglycerin II und 350.000 t/a Rapskuchen verarbeitet werden. Zur Umesterung des Öls zu RME sind jährlich weitere 28.000 t Methanol notwendig. Zusätzlich wird zur Extraktion des Öls aus dem Rapschrot Hexan benötigt, zur Raffination Bleicherde, zur Entschleimung Salzsäure und zur Entsäuerung NaOH.

Die Effizienz erhöht sich im Ausblick von 63 % auf 67 %, was zu einer erhöhten Produktion von RME von rund 255.000 t/a führt (siehe Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Technische Parameter der untersuchten Ein-Plattform (Öl) Bioraffinerie für Biodiesel, Tierfutter und Glycerin aus ölhaltigen Pflanzensamen

Technische Parameter	Einheit	2020	2030
Energiegehalt Input	MWh/a	3.924.319	3.924.319
Biomasse Input	t/a	576.635	576.635
Energiegehalt Output	MWh/a	2.472.248	2.629.294
Leistung Input	MW	491	491
Leistung Output	MW	309	329
Effizienz bez. auf Hauptprodukt	%	63%	67%
typ. Auslastung	h/a	8000	8000
Lebensdauer	Jahre	20	20
Biodiesel (RME)	t/a	239.880	255.118
Rohglycerin II	t/a	23.988	27.132
Rapskuchen	t/a	352.120	374.487

Quelle: eigene Berechnungen

3.2.2.2 Kostenstruktur der untersuchten generischen Bioraffinerie

Laut einer Studie des Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München (ifo) belaufen sich die Investitionen einer solchen Anlage (Ölmühle und Biodieselerstellung) bezogen auf die Gesamtkapazität der Anlage auf ca. 400 €/t Biodiesel (ifo 2009). Für die hier angenommene Anlage ergeben sich somit Investitionen von 96 Mio. €.

Die Fixkosten einer solchen Anlage werden ebenfalls entsprechend des im BMU-Förderprogramms erarbeiteten Methodenhandbuchs (Thrän, Fischer et al. 2010) in Abhängigkeit von der Höhe der Investition berechnet. Es wird angenommen, dass jährlich für Wartung und Reinigung 2 % der Investition, für die Verwaltung 0,75 %, für die Versicherung ohne Bau 1 % und für Unvorhergesehenes 0,5% der Investition anfallen. Die jährlichen Personalkosten werden mit 50.000 €/Jahr und einem Bedarf an 0,25 Angestellte/MW_{output} ermittelt. Für diesen Anlagentyp ergeben sich somit jährliche Fixkosten in Höhe von ca. 8 Mio. € in 2020. Die variablen Kosten resultieren vor allem aus den Kosten für den Katalysator und das

Betriebsmittel Methanol. Der Katalysator verursacht ca. 2 % der Kosten für das Rapsöl, für das Methanol wird mit Kosten in Höhe von 295 €/t gerechnet. Daraus ergeben sich variable Kosten ohne Biomassekosten von ca. 22 €/kWh.

Es wird keine Reduktion der Investitionen im Verlauf der Zeit unterstellt, so dass diese für 2030 ebenfalls auf 96 Mio. € geschätzt werden. Im Hinblick auf die Auslastung der Anlage wird für 2030 auch mit 8000 Stunden pro Jahr gerechnet, so dass sich für 2030 spezifische Investitionen in der Höhe von 155 €/KW_{out} ergeben. Zu bedenken ist, dass der Auslastungsgrad der Biodieselanlagen in Deutschland 2008 nur bei ca. 56 % lag¹³, was deutlich höhere spezifische Investitionen bedeutet. Es wird angenommen, dass die jährlichen Fixkosten auf 2,5 % der Investitionen reduziert werden können und, dass der Personalbedarf mit 77 Angestellten konstant bleibt. Somit ergeben sich Fixkosten in Höhe von 6,2 Mio. Euro in 2030.

Tabelle 3-5: Kosten der untersuchten Ein-Plattform (Öl) Bioraffinerie für Biodiesel, Tierfutter und Glycerin aus ölhaltigen Pflanzensamen

Kosten	Einheit	2020	2030
spezifische Investition	€/kW _{out}	165	155
Angestellte	Anzahl	77	77
Fixkosten in Bezug auf Leistung Output	€/kW*a	25,7	12,7
variabel Kosten o. Haupt-Input	€/MWh	21,9	21,9

Quelle: eigene Berechnungen

3.2.3 Typ III: Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe, Strom und Naphtha aus Restholz/KUP

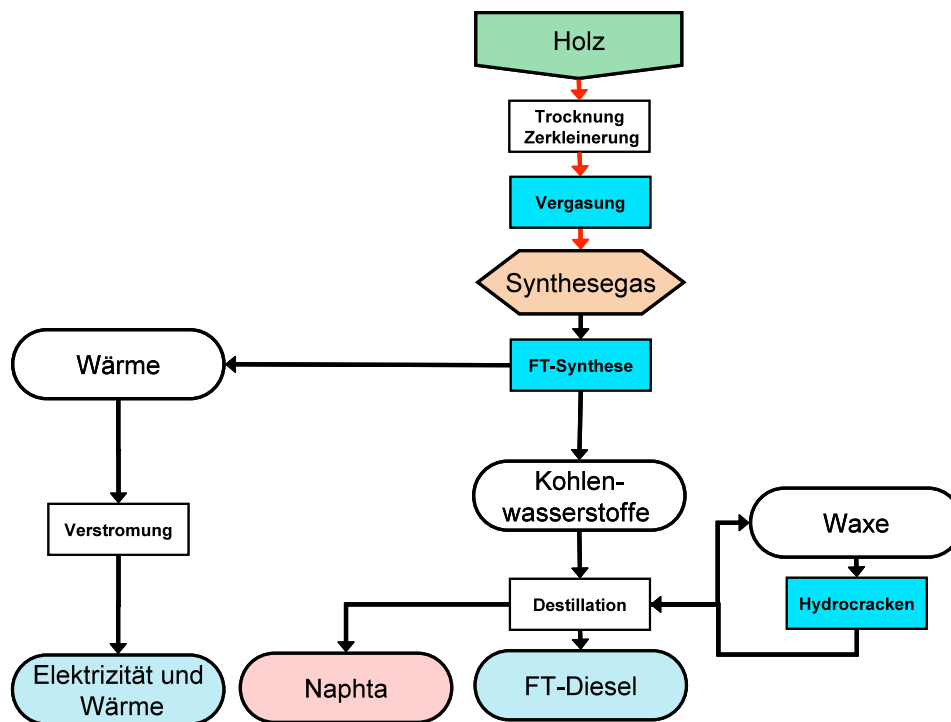
Die hier vorgestellte Anlage verarbeitet Holz zu synthetische Biokraftstoffe, Strom und Naphtha. Der Prozess ist noch nicht kommerziell verfügbar, sondern es ist derzeit in Deutschland nur eine Demonstrationsanlage in Betrieb.

3.2.3.1 Prozess und technische Kenndaten

Dieser generischer Typ Bioraffinerie verarbeitet im Ausgangszustand ca. 1,08 Mio. t Holz. Diese Menge an Biomasse entspricht 3,9 Mio. MWh/a in 2020. Auf der Produktseite wird angenommen, dass 2020 jährlich ca. 140.000 t synthetischer Diesel, 29.000 t Naphtha und 81 GWh elektrischer Strom produziert werden.

¹³ Siehe dazu Biodieselsatz und Produktionskapazitäten in Deutschland unter <http://www.biokraftstoffverband.de/de/biodiesel/marktdaten.html>

Abbildung 3-10: Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe, Strom und Naphtha aus Restholz/KUP



Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 3-6: Technische Parameter der untersuchten Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe, Strom und Naphtha aus Restholz/KUP

Technische Parameter	Einheit	2020	2030
Energiegehalt Input	MWh/a	3.885.000	8.000.000
Biomasse Input	t/a	1.080.000	2.154.012
Energiegehalt Output	MWh/a	1.714.167	4.000.000
Leistung input	MW	518	1.000
Leistung output	MW	229	500
Effizienz bez. auf Hauptprodukt	%	44,1%	50%
typ. Auslastung	h/a	7.500	8.000
Lebensdauer	Jahre	20	20
FT-Diesel	t/a	140.250	372.250
Naphta	t/a	28.800	59.300
Elektrizität	GWh/a	81	300

Quelle: eigene Berechnungen

Aufgrund technischer Weiterentwicklung der Anlage (siehe Kapitel 4) erhöht sich der energetische Wirkungsgrad der Anlage in Bezug auf FT-Diesel von 44 % in 2020 auf 50 % in

2030. Zudem wird angenommen, dass aufgrund der technischen Reife die typische Auslastung der Anlage von anfangs 7500 h/a auf 8000 Jahresstunden in 2030 ansteigt. Im Ausblick wird die Anlage deutlich größer, es wird mehr Biomasse (2,15 Mio. t) zu mehr Output verarbeitet. Die technischen Kenndaten sind Tabelle 3-6 zu entnehmen.

3.2.3.2 Kostenstruktur der untersuchten generischen Bioraffinerie

Die Investitionen eines solchen Bioraffinerietyps werden auf 940 Millionen Euro geschätzt. Die Fixkosten werden nach Absprache mit dem Anlagenbetreiber [Choren, 2010 für 2020 auf 3 % der Investitionen geschätzt - zuzüglich der Personalkosten in Höhe von jährlichen Kosten von 50.000 € für 70 Arbeitskräfte. Die variablen Kosten werden beeinflusst durch den Verbrauch von Katalysatoren sowie weiterer Betriebs- und Hilfsstoffe und werden auf Basis von Kostenkalkulationen des Betreibers auf 65 % der Biomassebereitstellungskosten und somit ca. 15 €/MWh geschätzt.

Mit steigender Anlagengröße steigen auch die Investitionen von 940 Mio € auf 1.250 Mio. € in 2030 an. Für das Jahr 2030 werden für die Fixkosten 2,5 % der Investitionen angesetzt zusätzlich 60 Personen mit jeweils 50.000 € Kosten. Die Reduzierung des Personalbedarfes ergibt sich aus einer zunehmenden Automatisierung der Anlagen.

Tabelle 3-7: Kosten der untersuchten Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Biokraftstoffe, Strom und Naphtha aus Restholz/KUP

Kosten	Einheit	2020	2030
spezifische Investition	€/kW _{out}	4.102	2.500
Angestellte	Anzahl	70	60
Fixkosten in Bezug auf Leistung Output	€/kW*a	138,4	34
variabel Kosten o. Haupt-Input	€/MWh	15	15

Quelle: eigene Berechnungen

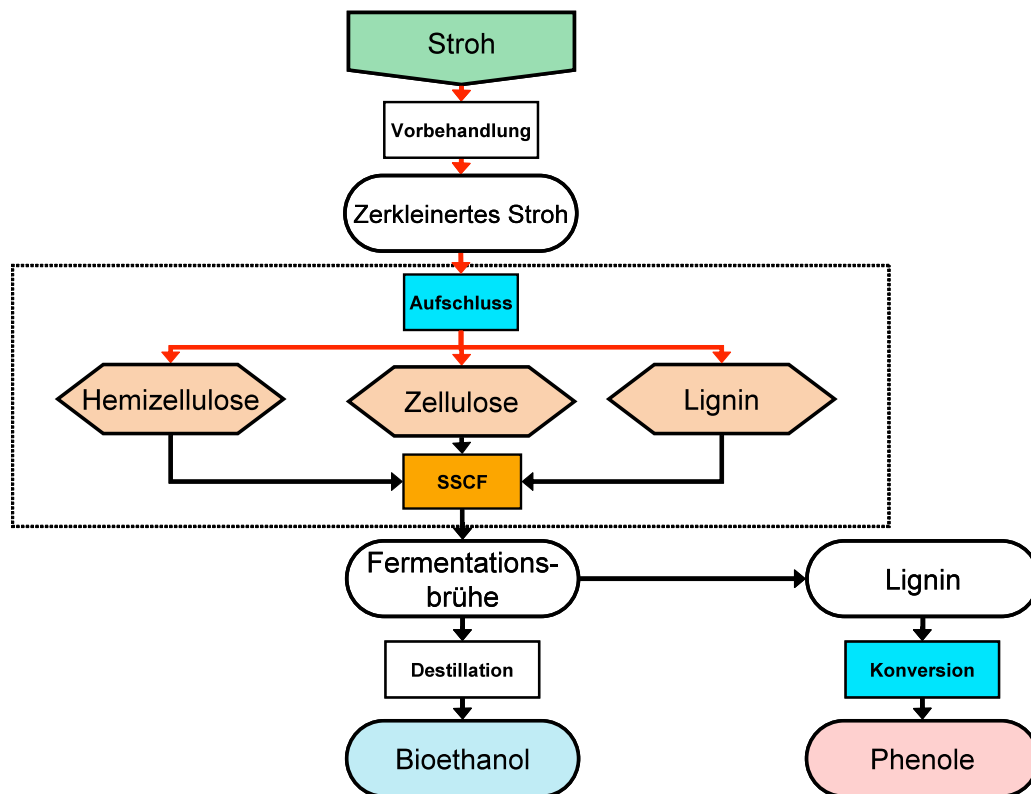
3.2.4 Typ IV: Drei-Plattform (Hemizellulose, Zellulose und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh

Dieser Anlagentyp verarbeitet Stroh zu Bioethanol und phenolische Verbindungen, die als Rohstoff für die Synthese von Duromeren eingesetzt werden. Konkrete Anwendungen sind Phenolharz-Bindemittel für Anwendungen in Holzwerkstoffen wie z.B. MDF, Spanplatten oder Sperrholz (Ehrich, Michels et al. 2009). Eine andere Möglichkeit der stofflichen Nutzung von Lignin ist z. B. die Compoundierung von Polymilchsäure (PLA) mit einer Ligninfraktion mit Maleinsäure als Koppler. Für die generische Bioraffinerie wird angenommen, dass das Dampfexplosionsverfahren zur Vorbehandlung des Strohs verwendet wird.

3.2.4.1 Prozess und technische Kenndaten

Für den sich zurzeit sich noch in Entwicklung befindlichen Bioraffinerietyp IV wird für 2020 angenommen, dass ca. 440.000 t Stroh TM jährlich verarbeitet werden. Als Produkt entstehen 100.000 t Bioethanol und 30.000 t Phenole. Der Energiebedarf kann durch die Nutzung des nicht stofflich genutzten Lignins völlig gedeckt werden.

Abbildung 3-11: Drei-Plattform (Hemizellulose, Zellulose und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh



Quelle: eigene Darstellung

Für 2030 wird angenommen, dass ca. 520.000 t Stroh TM jährlich verarbeitet werden. Die Effizienz der Anlage steigt von 43 % auf 50 %. Die zunehmende technische Reife spiegelt sich zudem in der höheren Jahresstundenzahl (8.000 h/a in 2030 statt 7.000 h/a in 2020) sowie der verlängerten Lebensdauer wieder. Alle technischen Daten sind Tabelle 3-8 zu entnehmen.

Tabelle 3-8: Technische Parameter der untersuchten Drei-Plattform (Hemizellulose, Zellulose und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh

Technische Parameter	Einheit	2020	2030
Energiegehalt Input	MWh/a	1.739.965	2.000.000
Biomasse Input	t/a	438.278	516.529
Energiegehalt Output	MWh/a	750.000	1.000.000
Leistung Input	MW	232	250
Leistung Output	MW	100	125
Effizienz bez. auf Hauptprodukt	%	43,1%	50%
typ. Auslastung	h/a	7500	8000
Lebensdauer	Jahre	15	20
Bioethanol	t/a	100.756	134.341
Phenole	t/a	29.628	34.917

Quelle: eigene Berechnungen

3.2.4.2 Kostenstruktur der untersuchten generischen Bioraffinerie

Die Kosten der Strohbereitstellung hängen stark ab von der Größe des Einzugsgebietes, das nötig ist in ausreichenden Mengen Stroh zu liefern. Zusätzlich ist zu bedenken, dass Stroh nur saisonal anfällt, so dass hohe Kosten zur Lagerung der Biomasse entstehen können.

Die Kosten der Ethanolherstellung aus Lignozellulose werden insbesondere beeinflusst durch die Wahl des Inputmaterials, der Größe der Ethanolfabrik, der Konversionseffektivität und der Höhe der Investitionskosten (Gnansounou and Dauriat 2010). Die gesamten Produktionskosten setzten sich zusammen aus 50-55 % für das Inputmaterial, 30-40 % für die Investitionskosten und 10 % für die variablen Kosten (Gnansounou and Dauriat 2010). Die variablen Kosten werden insbesondere von den Kosten der Enzyme dominiert.

Tabelle 3-9: Kosten der untersuchten Drei-Plattform (Hemizellulose, Zellulose und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh

Kosten	Einheit	2020	2030
spezifische Investition	€/kW _{out}	4.272	3.000
Angestellte	Anzahl	50	50
Fixkosten in Bezug auf Leistung Output	€/kW*a	207	48
variabel Kosten o. Haupt-Input	€/MWh	21	15

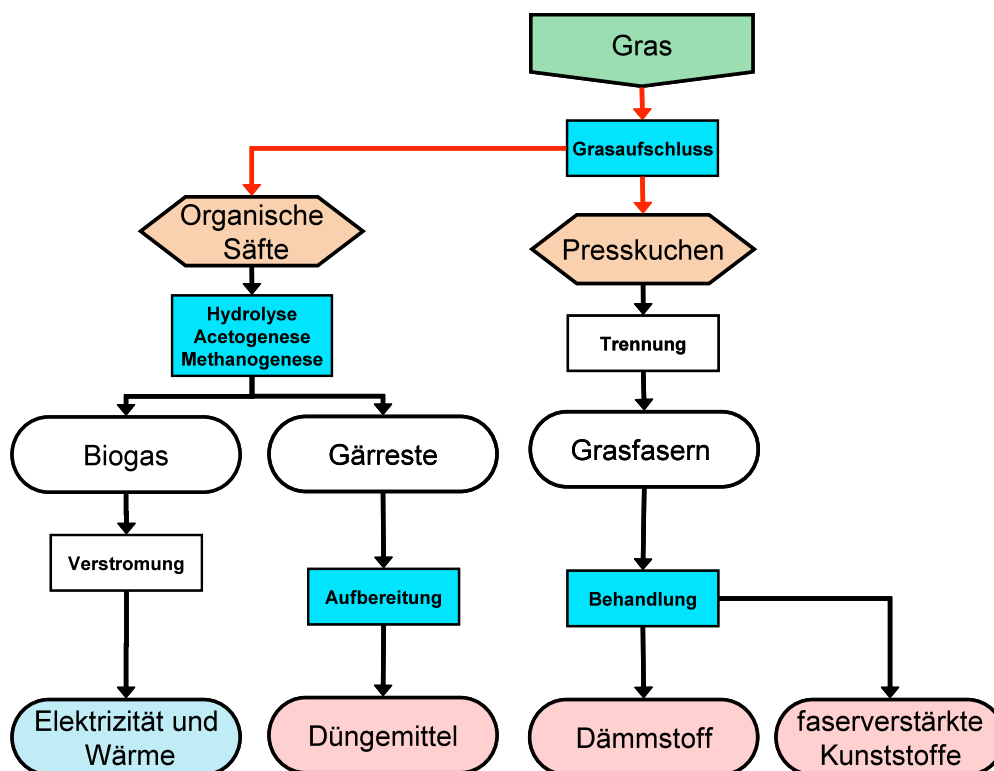
Quelle: eigene Berechnungen

3.2.5 Typ V: Zwei-Plattform "grüne" (organische Säfte und Presskuchen) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras

Dieser generische Bioraffinerietyp verarbeitet Gras zu Dämmstoff aus Grasfasern, Naturfaser verstärktem Kunststoff, Düngemittel aus Gärgut und Strom und Wärme ab Blockheizkraftwerk. Bei diesem Bioraffinerietyp stehen im Gegensatz zu den anderen hier betrachteten Bioraffinerietypen die stofflichen Produkte im Vordergrund, welche aus den Grasfasern erzeugt werden.

3.2.5.1 Prozess und technische Kenndaten

Abbildung 3-12: Zwei-Plattform "grüne" (organische Säfte und Presskuchen) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras



Quelle: eigene Darstellung

In diesen Bioraffinerietyp werden jährlich ca. 20.000 t Gras (Feuchtmasse), was ca. 7.000 t Trockenmasse entspricht, 10.000 t Rindergülle und 15.000 t Bioabfälle verarbeitet. Dies entspricht einem Energiegehalt von ca. 50.000 MWh/a. Energetische Produkte sind Wärme und elektrischer Strom, die durch ein BHKW bereitgestellt werden. Der energetische Output der Anlage in Form von elektrischer Energie beträgt im Ausgangsjahr 10.300 MWh/a. Dies entspricht einer Effizienz im Bezug auf Strom von 20,6 %. Der größere Anteil der Energie wird stofflich genutzt. Insgesamt werden jährlich ca. 2.500 t Naturfaser verstärkte Kunststoffe, 1.400 t Dämmstoffe und 11.000 t Dünger (davon 10.000 t Flüssigdünger und 1.300 t fester

Dünger) produziert. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Bioraffinerietyp mit 8000 Stunden pro Jahr betrieben wird.

Für 2030 wird angenommen, dass die gleiche Menge an Biomasse verarbeitet wird. Von einer Steigerung kann nicht ausgegangen werden, da Gras nicht beliebig weit rentabel transportiert werden kann. Im Hinblick auf die Effizienz der Kofermentationsanlage, in der organische Säfte, Rindergülle und Bioabfälle vergärt werden, wird angenommen, dass aufgrund von verbesserter Sensortechnik und weiteren technischen Optimierungen die Biogasausbeute gesteigert werden kann. Die technische Entwicklung der Kofermentationsanlage führt dazu, dass 2030 eine 23 %ige Effizienz im Bezug auf Strom erzielt wird. Die Mengen der stofflichen Produkte bleiben unverändert.

Tabelle 3-10: Technische Parameter der untersuchten Zwei-Plattform "grüne" (organische Säfte und Presskuchen) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras

Technische Parameter	Einheit	2020	2030
Energiegehalt Input	MWh/a	49.928	49.928
Biomasse Input	t/a	45.000	45.000
Energiegehalt Output	MWh/a	10.300	11.484
Leistung input	MW	6,2	6,2
Leistung output	MW	1,3	1,4
Effizienz bez. auf Hauptprodukt	%	20,6%	23%
typ. Auslastung	h/a	8000	8000
Lebensdauer	Jahre	20	20
Faserverstärkte Kunststoffe (NFK)	t/a	2500	2500
Dämmstoffe	t/a	1.410	1.410
Düngemittel	t/a	11.300	11.300
Elektrizität	GWh/a	10,3	10,3

Quelle: eigene Berechnungen

3.2.5.2 Kostenstruktur der untersuchten generischen Bioraffinerie

Die Investitionen einer solchen Anlage bestehend aus Grasveredlungsanlage und Kofermentationsanlage werden für 2020 auf 10 Millionen Euro und für 2030 auf 7 Millionen Euro geschätzt. Die Fixkosten werden auf 625.000 €/Jahr geschätzt, zusammengesetzt aus vier Angestellte a 50.000 € sowie weiteren 5,25 % auf die Investitionen für Wartung, Reinigung, Versicherung, Verwaltung und „Unvorhergesehenes“. Die variablen Kosten in Höhe von ca. 160 €/MWh ergeben sich aus den Stromkosten sowie Kosten für PE Granulat, welches zur Herstellung von Naturfaser verstärkten Kunststoffen benötigt wird.

Tabelle 3-11: Kosten der untersuchten Zwei-Plattform "grüne" (organische Säfte und Presskuchen) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras

Kosten	Einheit	2020	2030
spezifische Investition	€/kW _{out}	7767	5.000
Angestellte	Anzahl	4	4
Fixkosten in Bezug auf Leistung Output	€/kW*a	485	264
variabel Kosten o. Haupt-Input	€/MWh	158	142

Quelle: eigene Berechnungen

3.3 Zwischenfazit: Überblick über die betrachteten Bioraffinerien

Tabelle 3-12 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die wichtigsten technischen und ökonomischen Kenndaten der fünf betrachteten generischen Bioraffinerie-Typen. Es sind die Daten für das Basisjahr bzw. den Ausgangsstatus in 2020 sowie stellenweise kursiv die Daten für den Ausblick bis 2030 aufgeführt.

Tabelle 3-12: Technische und ökonomische Kenndaten der betrachteten Bioraffinerien

Typ-Nr.			I	II	III	IV	V
Input / Output	Biomasse Input		Stärke, Zucker	Ölfrucht	Lignozellulose		Grünschnitt
			Weizen	Raps	KUP	Getreide-Stroh	Grassilage, Speisereste & Gülle
	energ. Hauptprodukte		EtOH	FAME	BtL	EtOH	Elektrizität
	stoffl. Hauptprodukte		DDGS	Glycerin	Naphta	Lignin	Dämmmaterial
technische Kenndaten	Energiegehalt Input	MWh/a	1.112.020	3.924.319	3.885.000	1.739.965	49.928
		t/a	236.600	576.635	1.080.000	438.278	45.000*
	Energiegehalt Output	MWh/a	677.380	2.472.248	1.714.167	750.000	10.300
	Leistung Input	MW	139	491	518	232	6,2
	Leistung Output	MW	85	309	229	100	1,3
	Effizienz Hauptprodukt 2020 / 2030	%	61 / 65	63 / 67	44 / 50	43 / 50	21 / 23
	typ. Auslastung	h/a	8.000	8.000	7.500	7.500	8.000
	Lebensdauer	a	20	20	20	15	20
ökonomische Kenndaten	Invest (spez.) 2020 / 2030	€/kW _{out}	775 / 750	165 / 155	4.102 / 2.500	4.272 / 3.000	7.767 / 5.000
	Invest 2020 / 2030	Mio €	66 / 64	96 / 96	938 / 1.250	427 / 375	10 / 7
	Fixkosten	€/a	3.847.309	7.940.848	31.626.870	20.655.651	625.000
	Fixkosten (pro Leistung Output)	€/kW*a	45	26	139	207	485
	Anzahl Angestellte		21 / 20	77 / 77	70 / 60	50 / 50	4 / 4
	variabel o. Haupt-Input	€/MWh	5	22	15	21	158

* 20.000 t Grassilage + 15.000 t Speisereste + 10.000 m³ Gülle

4 Dynamische Entwicklung der Bioraffineriekonzepte im Ausblick bis 2030

Im vorangegangenen Kapitel 3 sind die verschiedenen Bioraffineriekonzepte bezüglich ihrer technischen und ökonomischen Daten beschrieben worden. Dabei ist bereits ein Ausblick bis etwa zum Jahr 2030 erfolgt, um die Entwicklung der derzeit teilweise noch nicht ausgereiften Technologien zu berücksichtigen.

Sowohl die angenommene Entwicklung als auch die daran anschließende Bewertung der verschiedenen Konzepte kann aber nicht unabhängig von der Entwicklung der Referenzsysteme vorgenommen werden. Da es sich bei den Bioraffinerien per Definition um Konzepte zur gekoppelten Erzeugung von energetischen und stofflichen Produkten handelt, sind folglich auch jeweils ein energetisches als auch ein stoffliches Referenzsystem zu betrachten. Diese werden im folgenden Abschnitt vorgestellt, bevor auf die Größen- und Mengenentwicklung der Bioraffinerien eingegangen wird.

4.1 Referenzsysteme

Bioraffinerien sind von der Auslegung her technische Anlagen mit einer Lebensdauer von etwa zwanzig Jahren. Ein Ausblick erfolgt daher über ungefähr eine Lebensspanne einer Anlage bis etwa zum Jahr 2030. Sowohl für die energetischen als auch die stofflichen Produkte ergeben sich daher folgende Fragen:

- Wie verändern sich die Rahmenbedingungen, die durch das Energie- und Stoffsystem gegeben werden zwischen 2020 und 2030?
- Wie verhält sich die Nachfrage nach den Produkten der Bioraffinerien?
- Wie ist die Produktion bezüglich der Energieeinsätze und Emissionen zu bewerten?

Die ersten beiden Fragen werden in den Abschnitten 4.1 bis 4.2 bearbeitet, die dritte im folgenden Kapitel 5.

4.1.1 Energiesystem: Leitszenario 2009

Bezogen auf das Energiesystem ist die Energiesystemanalyse das geeignete Werkzeug, um sich einer Antwort auf die oben genannte Fragestellungen zu nähern. Sie beruht ihrerseits auf Energieszenarien, die mögliche Entwicklungen des Energiesystems abbilden. Dabei handelt es sich nicht um Prognosen, die in einem Zeitraum bis z.B. zum Jahr 2030 immer nur von begrenzter Sicherheit und Aussagekraft sein können. Energieszenarien dienen vielmehr der Abschätzung von Entwicklungen unter bestimmten angenommenen Voraussetzungen („Wenn ... - dann ...“).

Für das vorliegende Projekt BioCouple wird das „Leitszenario 2009“ als Referenzsystem herangezogen, das in dem Bericht (BMU, 2009) vorgestellt wird. Das Leitszenario stellt ein ambitioniertes Klimaschutzszenario dar, das beschreibt, wie ein Umbau des Energiesystems aussehen sollte, wenn eine Minderung der CO₂-Emissionen um 80 % bis 90 % bis zum Jahr 2050 gegenüber den Emissionen aus dem Jahr 1990 angestrebt wird. Diese Zielsetzung

ergibt sich aus der Notwendigkeit, die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu stabilisieren und den globalen Anstieg der Mitteltemperatur auf 2°C zu begrenzen. Das Leitszenario folgt damit den Empfehlungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) aus dem Jahr 2007 (IPCC, 2007)

Es fokussiert dabei auf die Betrachtung der Kohlendioxidemissionen als dem aufgrund von menschlicher Aktivitäten mengenmäßig bedeutsamsten Treibhausgas. Insbesondere für eine Betrachtung und Bewertung des Treibhausgas-Emissionspotenzials aus Bioenergie ist diese Vereinfachung im Gegensatz zum gesamten Energiesystem jedoch **nicht** zulässig: bei der Bereitstellung (Anbau) und Umwandlung von Biomasse spielen z.B. Methan- und Lachgasemissionen eine nicht unerhebliche Rolle und müssen daher mit in die Bewertung einfließen. Diese beiden Emissions-Kategorien sind aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht nur für Bioenergie, sondern für alle Energieträger aus dem Leitszenario ergänzt worden, so dass im Folgenden nicht nur CO₂-, sondern eine Summe an Treibhausgasemissionen (THG) behandelt werden. In der Referenzbetrachtung werden ebenfalls THG-Emissionen bilanziert. Die Modellierung der Emissionen erfolgte durch die Anwendung des Softwareinstruments GEMIS (vgl. Kapitel 5.2).

Um das ambitionierte Ziel der 80 %- bis 90%igen THG-Minderung bis 2050 zu erreichen, sind konzentrierte Anstrengungen in allen Bereichen notwendig (Prognos/ÖKO 2009). Aus diesem Grund muss nicht nur der Ausbau der erneuerbaren Energien forciert, sondern auch der Energieverbrauch insgesamt erheblich zurückgefahren werden. Alle Effizienzpotenziale sind daher im Leitszenario zu weiten Teilen ausgeschöpft. Im Leitszenario mit dem ambitionierten Klimaschutzziel ist der Stromsektor – als bisheriger Hauptverursacher von THG-Emissionen – ein entscheidender Hebel zur Erreichung des 80 % Minderungsziels. Dem Stromsektor kommt daher beim notwendigen Umbau des Energiesystems eine besondere Bedeutung zu. Aber auch im Verkehrssektor werden Einschränkungen bzw. Alternativen zu den gängigen fossilen Energieträgern notwendig. So geht bereits der Endenergieverbrauch im Personen- und Güterverkehr von 2.474 PJ/a in 2010 über 2.351 PJ/a (2020) bis auf 2.092 PJ/a in 2030 zurück. Die weitere Verbrauchsreduktion bis 2050 fällt im weiteren Ausblick bis 2050 noch stärker aus.

Tabelle 4-1: Mengen an fossilen Referenzprodukten im Ausblick bis 2030 (inklusive energetischen Bioraffinerieprodukten)

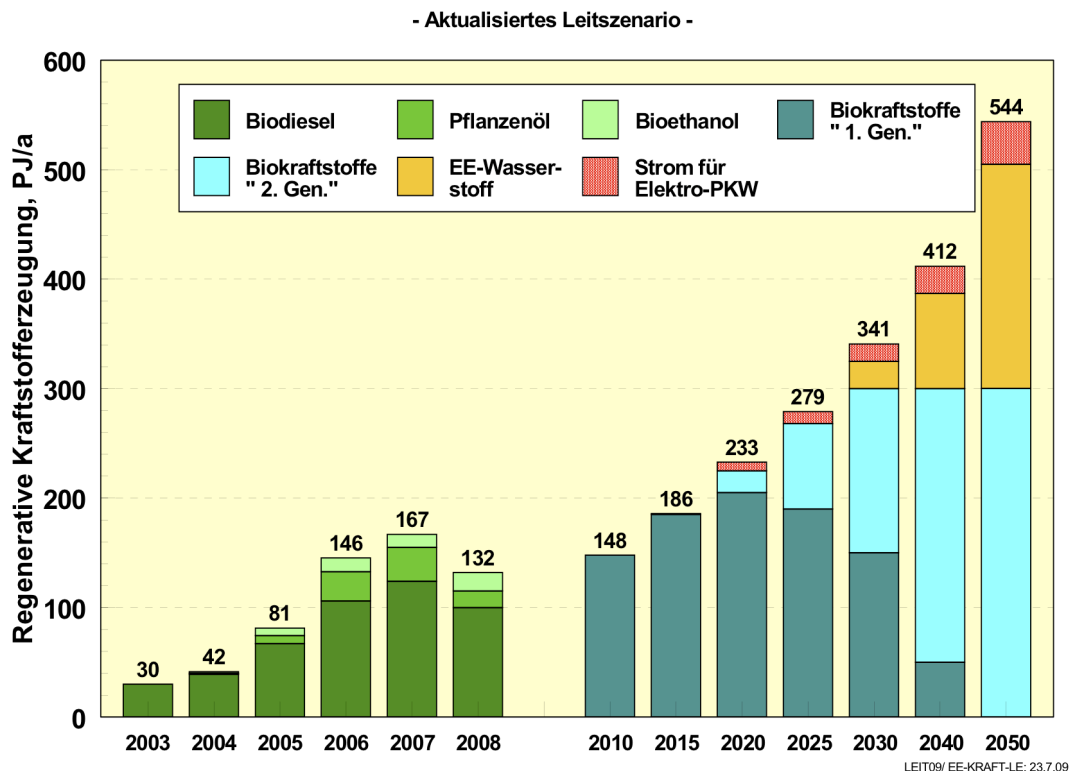
GWh	2010	2020	2030	Substitut
Benzin	250.000	165.000	105.000	Ethanol
Diesel	305.000	310.000	280.000	Biodiesel / BTL
Methan	840.000	805.000	685.556	Biogas

Quelle: (BMU, 2009)

Mit dem Jahr 2030 werden neben (flüssigen) Biokraftstoffen auch regenerativ erzeugter Wasserstoff sowie (bereits ab 2020) zunehmend regenerativer erzeugter Strom für Elektro-

mobilität eingesetzt. Bis 2030 sind die gängigen Biokraftstoffe aber das vorrangige Medium, um die spezifischen THG-Emissionen des Verkehrssektors zu reduzieren. Entsprechend steigt der Anteil der Biokraftstoffe der ersten Generation zunächst an, bis in 2020 mit rund 186 PJ/a ein Peak erreicht ist. Die erste Generation wird in den folgenden Dekaden zunehmend von der zweiten Generation sowie regenerativem Strom abgelöst (siehe Abbildung 4-1).

Abbildung 4-1: Beitrag erneuerbarer Energien zur Deckung des Kraftstoffbedarfs (inklusive regenerativen Stroms für Elektromobilität)



Quelle: (BMU, 2009)

Im vorliegenden Projekt wird davon ausgegangen, dass das Verhältnis zwischen Biodiesel und Bioethanol der ersten Generation konstant bleibt (75 % RME, 25 % EtOH). Abweichend von der zitierten Quelle (BMU, 2009) wird angenommen, dass der inländisch produzierte Biokraftstoff der ersten Generation bereits ab 2030 durch importierten Kraftstoff ersetzt wird. Dies liegt in den z.T. günstigeren Produktionsverhältnissen und resultierend geringeren Herstellungskosten in anderen Regionen der Welt begründet (ÖKO/DLR, 2009; IEA, 2011). Somit sind in 2030 und 2040 zwar noch Mengen an RME und Bioethanol auf Basis von Zucker und Stärke im deutschen Kraftstoffmix vorhanden, diese werden aber nicht mehr in Deutschland produziert.

4.1.2 Stoffsysteme bis 2030

Ähnlich wie im Energiesektor muss auch bei den produzierten Materialien die dynamische Weiterentwicklung der (fossil basierten) Referenzprodukte betrachtet werden. Ein - analog

zum Energiesystem - „Stoffsystem“ sowie eine übergeordnete Stoffsystemanalyse liegen jedoch nicht vor. Daher müssen die relevanten Referenzstoffe, die durch die Produkte aus den Bioraffinerien ersetzt werden können, jeweils für sich betrachtet bzw. ihre Weiterentwicklung im Ausblick abgeschätzt werden. Dazu werden im Wesentlichen Nachfrageprognosen der jeweiligen Fachverbände herangezogen. Die getroffenen Annahmen werden im Folgenden erläutert.

Mischfutterproduktion

Als typischer Futtermix in Deutschland wird je zu einem Drittel Rapspresskuchen, Mais und Soja verwendet. Basierend auf den Angaben des Deutschen Verbandes Tiernahrung (Deutscher Verband Tiernahrung, 2010) wird die Nachfrage aus dem Jahr 2010 im Ausblick bis 2030 konstant bleiben. Eine Steigerung scheint nicht plausibel, wenn von einem rückläufigen Fleischkonsum als Folge einer sinkenden Bevölkerung in Deutschland ausgegangen wird (Heiskanen et al, 2009).

Glycerin und Phenol

Glycerin kommt im Wesentlichen als Pharmarohstoff oder Rohglycerin für verschiedene Anwendungen (wie zur Vergärung in Biogasanlagen als Biogasbooster, als chemisches Vorprodukt, zur Abwasserreinigung etc.) vor. Im Folgenden wird nur Rohglycerin betrachtet, das ausschließlich bei der Biodiesel-Produktion anfällt. Dabei bleiben die Mengen unberücksichtigt, die bei der Produktion von Tensiden sowie der Verarbeitung von Palmölimporten anfallen. Aufgrund dieser Annahme wird die Produktion von Rohglycerin mit der inländischen Produktion von Biodiesel aus Raps verknüpft.

Die Nachfrage nach Phenol sind aus den Angaben des führenden Herstellers für Anlagenkapazität der Werke in Leuna und Gladbeck sowie einer Auslastungseinschätzung der Anlagen vom 19.02.2009 ermittelt worden. Es kann angenommen werden, dass der Markt bis 2030 stabil bleibt.

Naphtha

Die aktuellen Daten zur Produktion von Naphtha sind beim Mineralölwirtschaftsverband (MWV) abgefragt worden (Mineralölwirtschaftsverband, 2006). Die Fortschreibung der Nachfrage bis 2030 beruht ebenfalls auf einer Prognose des MWV.

Dämmstoffe

Die Nachfrage nach Mineralwolle als Dämmstoff ist durch eigene Berechnungen aus Daten des Fachverbands Wärmedämm-Verbundsysteme (Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme, 2009) abgeleitet. Es wird angenommen, dass sich der Markt aufgrund verstärkter Anstrengungen zur Wärmedämmung bis 2020 verdoppelt. Dieser Wert wird in der nächsten Dekade bis 2030 konstant gehalten. Erst danach kann die Nachfrage sinken, wenn Sanierungsarbeiten zum großen Teil abgeschlossen sind bzw. in größerem Maße auf weniger CO₂-intensive Dämmstoffe zugegriffen wird.

Kunststoffe

High-Density-Polyethylen (HDPE) wird im Wesentlichen als Verpackung, aber auch im Baubereich eingesetzt (Consultic, 2009)¹⁴ Auf Basis der genannten Studie ist die Nachfrage nach HDPE abgeschätzt worden. Es wird angenommen, dass der Markt bis 2030 auf dem gleichen Niveau bleibt.

Die stofflichen Produkte der verschiedenen Bioraffinerien sowie die substituierten, fossil-basierten Referenzprodukte sind in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Tabelle 4-2: Stofflichen Bioraffinerieprodukten und Mengen an fossilen Referenzprodukten im Ausblick bis 2030

Typ BR	stoffliches Produkt	substituiert	Mengenentwicklung des Referenzprodukts		
			2010	2020	2030
I	DDGS*	Futtermix	21	21	21
II	Glycerin (bio)	Glycerin	0,3	0,3	0,3
III	Naphta (bio)	Naphta	19	20	20
IV	Lignin	Phenol	0,4	0,4	0,4
V	Dämmstoffe (bio)	Mineralwolle	0,9	1,9	1,9
V	NFK**	HDPE***	1,35	1,35	1,35

* Distillers Dried Grain with Solubles

** Naturfaserverstärkte Kunststoffe

*** High-Density-Polyethylen

4.2 Abschätzung der Marktentwicklung von Bioraffinerien

Um die Konzepte der Bioraffinerien im sich dynamisch entwickelnden Stoff- und Energiesystem zu betrachten, muss auch die Weiterentwicklung der Technologie abgeschätzt werden. Die spezifischen, generischen Daten für den Ausblick bis 2030 der fünf untersuchten Typen sind jeweils in den Abschnitten in Kapitel 3 vorweggenommen worden. Die Trendfortschreibungen beruhen auf dem Ansetzen von Lernkurven, die wiederum auf einer angenommenen Marktentwicklung basieren.

Für diese Betrachtung wird zunächst allgemein der zeitliche Ablauf der Entwicklung innovativer Technologien untersucht und daraus ein Startzeitpunkt für den kommerziellen Einsatz der generischen Bioraffinerien abgeleitet. Es wird eine Definition für die Wachstumskurve kommerzieller Anlagen erstellt. Im nächsten Schritt folgt die Projektion der Anlagenzahlen

¹⁴ Consultic (2009): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland <http://www.plasticseurope.de/Document/studie-zu-produktion-verbrauch-und-verwertung-von-kunststoffen-in-deutschland-2009---kurzfassung.aspx> ; letzter Zugriff am 22. Juni 2011

und der resultierenden Produktmengen im Ausblick bis 2030. Für die Bioraffinerie vom Typ III und IV werden Lernfaktoren (progress ratio; PR) von 0,85; sowie für die Bioraffinerie V ein PR von 0,9 festgelegt. Diese Werte werden mit der Größe der sich ebenfalls entwickelnden Produktmärkte der fossilen Referenzprodukte abgeglichen (vgl. Tabelle 4-2).

4.2.1 Definition des zeitlichen Ablaufs der Anlagenentwicklung

Bei der Entwicklung einer innovativen Technologie lassen sich grundsätzlich unterschiedlichen Entwicklungsstadien unterscheiden, nämlich

- Grundlagenforschung
- Aufbau und Betrieb von Pilotanlagen
- Aufbau und Betrieb von Demonstrationsanlagen
- Kommerzielle Phase

Aus der Entwicklung bzw. des Zeitraums, in dem diese vier Phasen durchlaufen werden, kann der Zeitpunkt des kommerziellen Markteintritts abgeschätzt werden. Die erste Phase, in der die Grundlagen für die jeweilige Technik gelegt werden, ist dabei am stärksten variabel und meist nicht in einem engen Zeitrahmen zu begrenzen. Daher können hieraus in der Regel nicht in gleicher Weise Schlüsse gezogen werden, wie aus den anderen Phasen.

Tabelle 4-3: Entwicklungsphasen bei verschiedenen Biomasse-Anlagen

Technologie-Beispiel	Pilotanlage [a]	Demonstrationsanlage [a]	Eintritt in die kommerzielle Phase (Jahr)
Choren	5	10	Ab 2020
IOGEN		10	Ab 2015
INBICON	5	Ab 2010	?
Neste Oil		7	Ab 2015
Typisch	5	10	

Quelle: (Bacovsky, Dallos, & Wörgetter, 2010)

Tabelle 4-3 gibt einen Überblick über die Dauer unterschiedlicher Phasen bei untereinander vergleichbaren Technologien sowie einen aus diesen abgeleiteten typischen Wert. Dieser wird auf die hier betrachteten Bioraffinerien übertragen und beträgt rund fünf Jahre für Pilotanlagen, sowie rund zehn Jahre für den Betrieb von Demonstrationsanlagen. Ausgehend von dem derzeitigen Grad der Kommerzialisierung werden auf dieser Grundlage die Zeitpunkte für den Markteintritt der fünf Bioraffinerien ermittelt. Diese sind in Tabelle 4-4 dargestellt.

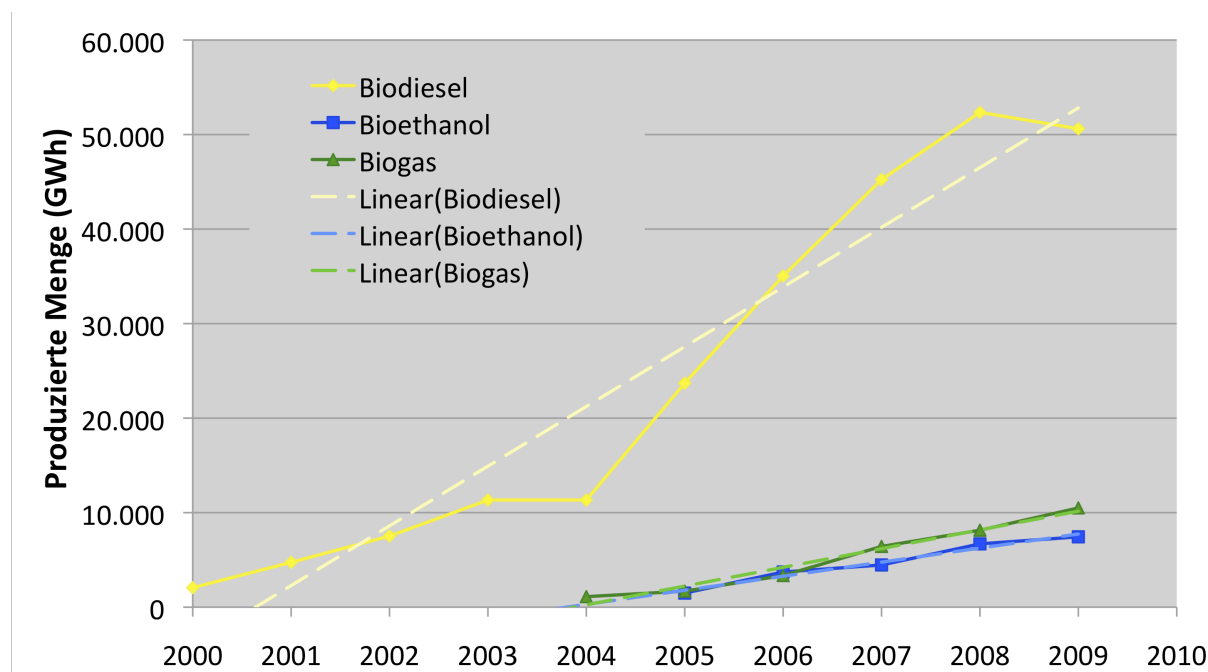
Tabelle 4-4: Ermittelte Markteintritts-Zeitpunkte der fünf Bioraffinerietypen

Bioraffinerie-Typ	BR I	BR II	BR III	BR IV	BR V
Energetisches Hauptprodukt	Ethanol	Biodiesel	BtL	Ethanol	Biomethan
Konversions-technik	Fermentation	Veresterung	Vergasung und FT-Synthese	Enzymatischer Aufschluss	Pressung / Fermentation
Stand der Entwicklung	kommerziell	Kommerziell	Demonstration	Demonstration	Kommerziell
Markteintritt	2005	2000	2014	2020	2010

4.2.2 Definition einer Wachstumskurve für kommerzielle Anlagen

Analog zur Ableitung des Markteintritts werden auch für die Ermittlung der Wachstumskurven Technologien betrachtet, die zu den Bioraffinerien ähnlich sind, insbesondere also die Entwicklung von Biodiesel, Bioethanol und Biomethan in Deutschland.

Abbildung 4-2: Entwicklung der Produktion von Biodiesel, Bioethanol und Biogas in Deutschland

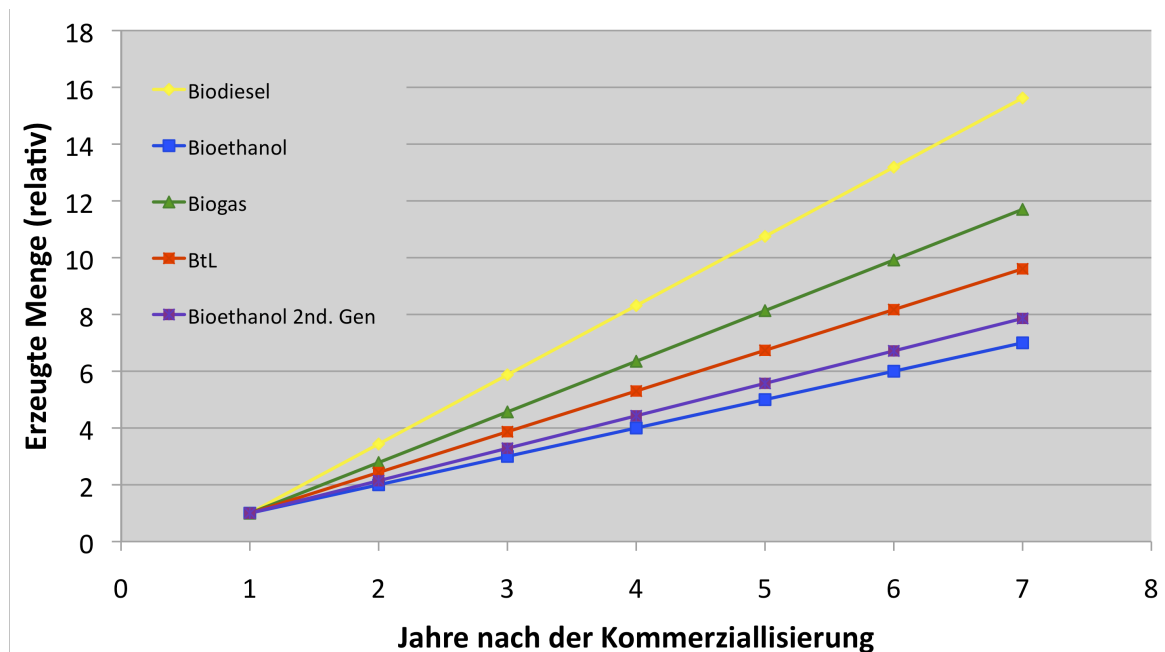


Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf (UFOP, 2009), Leitszenario (BMU, 2009) und (FNR)

Die in Abbildung 4-2 dargestellten Kurven bilden den Best-Case ab und die hindurch gelegten Geraden stellen Durchschnittswerte für die ungehinderte Entwicklung dar. Die Steigung

der Geraden repräsentiert näherungsweise den jährlichen Zuwachs an installierter Leistung eines Bioraffinerietyps. Aus diesen Steigungen lassen sich ideale Wachstumsverläufe für die generischen Bioraffinerien ableiten (siehe Abbildung 4-3). Dargestellt sind die relativen Mengen, gemessen an der im ersten Jahr nach der Kommerzialisierung erzeugten Menge, wenn diese mit „1“ also 100% angenommen wird.

Abbildung 4-3: Ideale Wachstumsverläufe für generische Bioraffinerien



Dabei ist für die angenommene erzeugte Menge an Biokraftstoff, insbesondere der zweiten Generation, auf das Szenario aus der eingangs beschriebenen Leitstudie (BMU, 2009) zurück gegriffen worden. Vereinfachend wird angenommen, dass die dort gesetzten Mengen an BtL im Jahr 2030 mit rund 26,3 TWh/a sowie rund 13,6 TWh/a an Bioethanol der zweiten Generation vollständig aus den Bioraffinerien bereitgestellt wird. Ausgehend von diesen Annahmen kann die jeweils erzeugte Menge für den Zeitraum um 2020 linear zurückgerechnet werden. In der folgenden Tabelle finden sich die hier bestimmten Wachstumsfaktoren wieder Tabelle 4-5: .

Tabelle 4-5: Ermittelte lineare Wachstumsfaktoren der Bioraffinerien

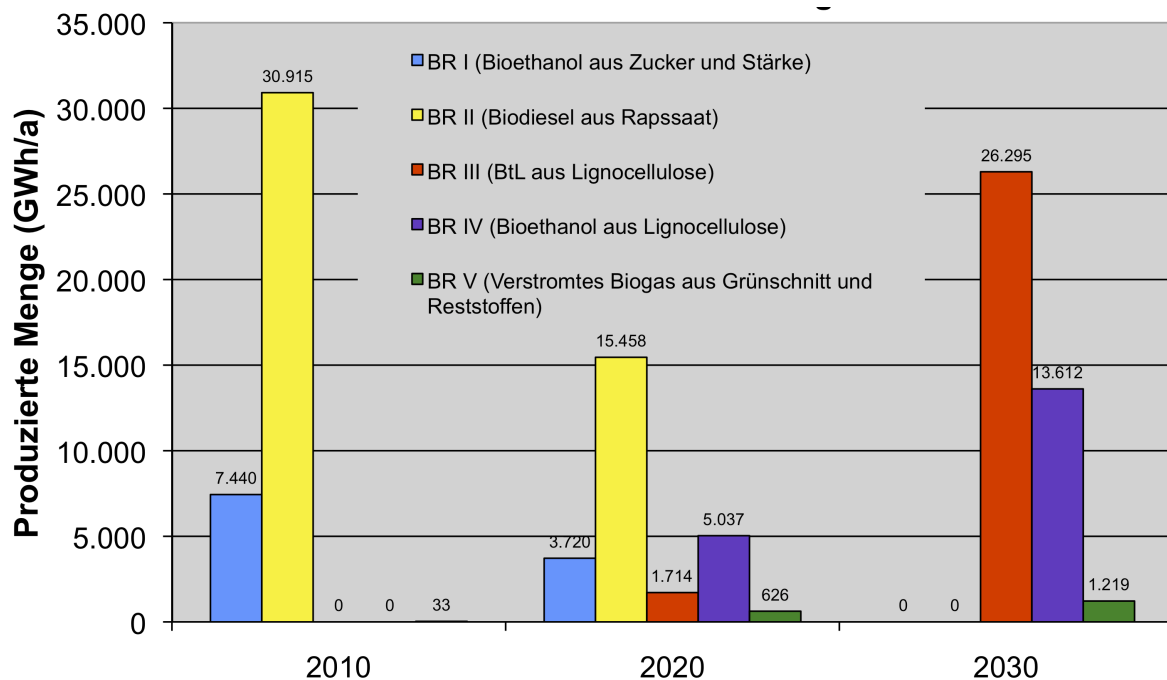
Bioraffinerietyp / Energetisches Hauptprodukt	Wachstum (GWh/a)
BR I / Ethanol aus Zucker / Stärke	1,0
BR II / Biodiesel aus Raps	2,4
BR III / BtL aus Lignozellulose	1,8
BR IV / Ethanol aus Lignozellulose	0,7
BR V / Biogas aus Grünschnitt	1,8

Quelle: Eigene Berechnungen

4.3 Zwischenergebnis

Mit der Kenntnis der anfänglichen Anlagengröße einer Bioraffinerie, des Zeitpunkts ihres voraussichtlichen Markteintritts sowie des Wachstums in der Produktion des energetischen Hauptproduktes, lässt sich sowohl die Produktionsmenge als auch die Anlagenzahl in die Zukunft projizieren. Die Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 zeigen die insgesamt produzierte Menge des energetischen Hauptprodukts bzw. die ermittelten Anlagenzahlen der entsprechenden Bioraffinerien.

Abbildung 4-4: Kumulierte Produktionsmenge der Bioraffinerien im Ausblick bis 2030



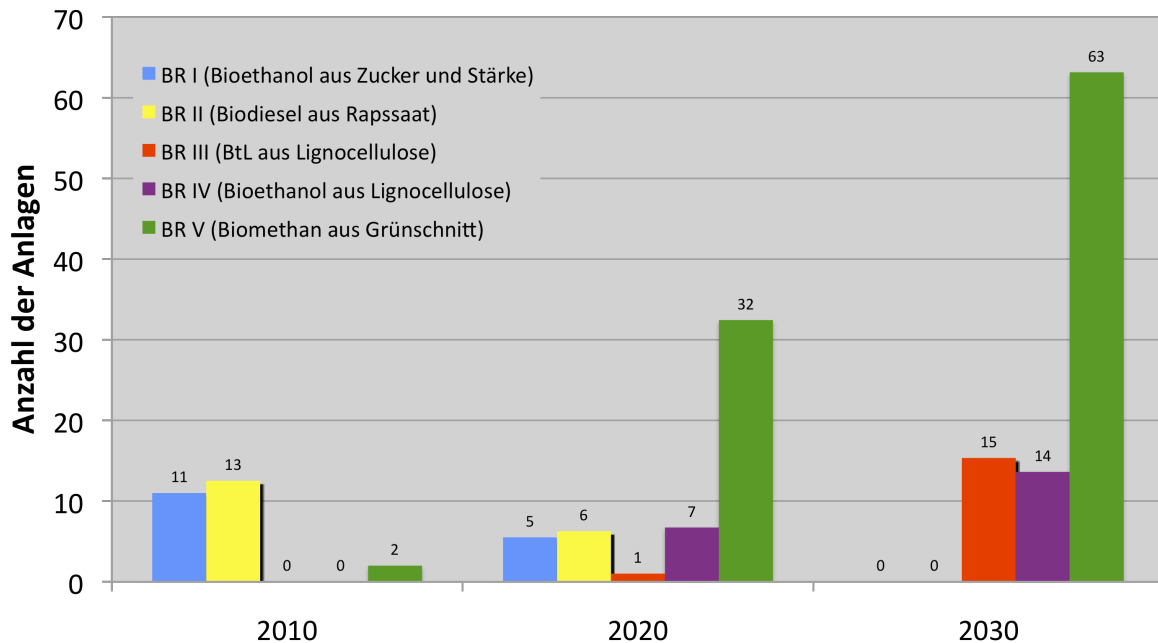
Quelle: Eigene Berechnungen

Wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, wird angenommen, dass ab etwa 2030 kein Biodiesel und Bioethanol der ersten Generation mehr in Deutschland hergestellt wird, da die Produktionsbedingungen in anderen Regionen günstiger sind. Für die Bioraffinerien Typ I und II bedeutet das, dass die Anlagenzahlen und die produzierten Mengen sukzessive bis 2030 auf Null zurückgefahren werden. Im Gegenzug werden die Anlagen vom Typ III und IV, die in 2010 noch nicht am Markt verfügbar sind, ab 2020 schrittweise eingeführt und erreichen wesentliche Produktionsmengen. Insbesondere BTL als Ersatz fossilen Diesels und so genannter „Designer-Kraftstoff“, der gute Voraussetzungen für die Weiterentwicklung der Verbrennungsmotoren schaffen soll (Arnold et. al, 2008), dominiert das energetische Produktspektrum.

BTL und 2.Generation- Ethanol werden in immer größeren Anlagen produziert, begrenzt durch die Lieferreichweite des Feedstocks (vgl. Kapitel 3.2, technische Daten der Anlagenkonzepte), so dass die Anzahl der Anlagen moderat bleibt. Umgekehrt verhält es sich mit Anlagen vom Bioraffinerietyp V: die Anlagen zur Umsetzung von Grünschnitt und Reststoffen

bleiben vergleichsweise klein, so dass eine geringere Produktionsmenge von einer Vielzahl an Anlagen bereitgestellt wird. Wie auch aus den technischen und ökonomischen Daten ersichtlich, handelt es sich hierbei um einen dezentralen Ansatz.

Abbildung 4-5: Berechnete Anzahl der generischen Bioraffineriekonzepte im Ausblick bis 2030



Quelle: Eigene Berechnungen

4.4 Abgleich der Produktspektren und Märkte

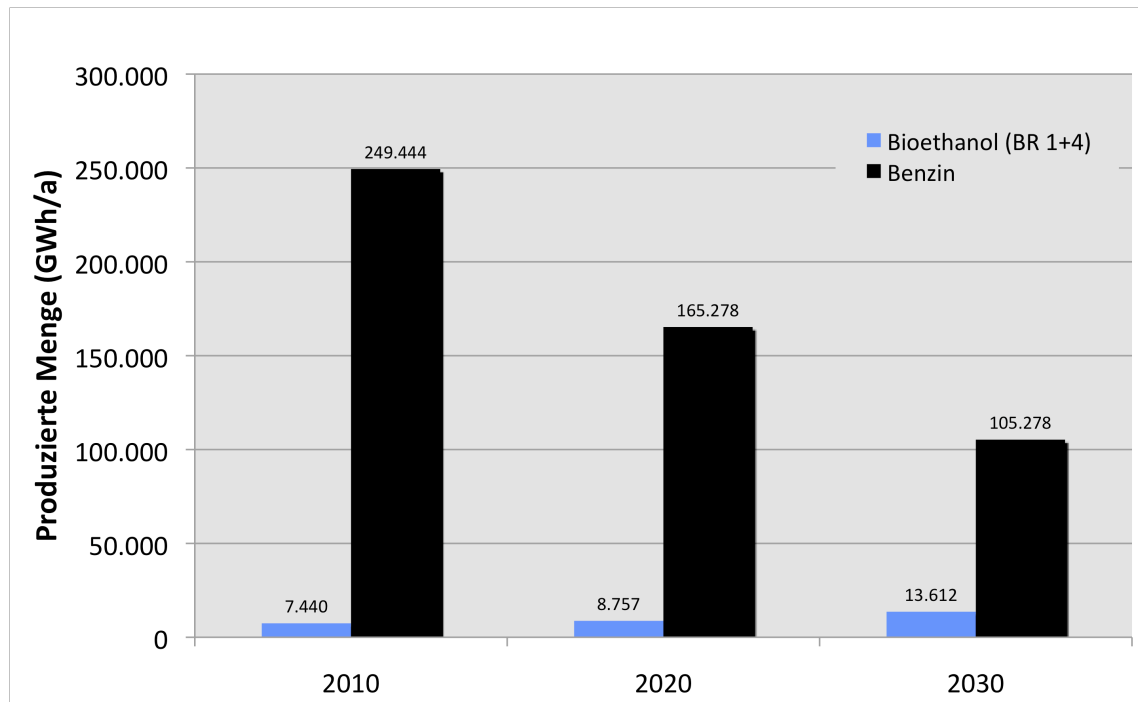
Die Bereitstellung der energetischen Hauptprodukte bringt automatisch bzw. als anlagenimmanente Größe die Herstellung der jeweiligen stofflichen Haupt- und Nebenprodukte der einzelnen Bioraffinerietypen mit. Die Absetzung und Vermarktung dieser stofflichen Produkte ist eine wesentliche Voraussetzung für einen ökologisch und ökonomisch sinnhaften Betrieb der Anlagen. Daher wird im folgenden Abschnitt ein Abgleich sowohl der energetischen als auch der stofflichen Produkte der Bioraffinerien mit den fossilen Referenzprodukten vorgenommen. Die stofflichen Referenzprodukte sind in Abschnitt 4.1.2 identifiziert und die angenommene Entwicklung des Absatzes im Ausblick in Tabelle 4-2 mengenmäßig aufgeführt worden. Die Entwicklung des Bedarfs an fossilen Kraftstoffen ist Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Im Abgleich der Bioraffinerieprodukte mit den fossilen Produkte wird deutlich, dass die bestehenden, fossil-basierten Märkte die Produkte der Bioraffinerien leicht aufnehmen können. Beispielhaft ist das in Abbildung 4-6 für das energetische Hauptprodukt der Bioraffinerietypen I und IV, also Ethanol, dargestellt. Trotz sinkender Nachfrage nach Benzin und steigender Produktionsmenge bleibt der Anteil, der aus den Bioraffinerien bereitgestellt wird, im Ausblick unter 13 % (rund 3 % in 2010).

Im Bereich des Dieseleratzes durch RME und BTL ist das Bild ähnlich; der Marktanteil schwankt von 10 % in 2010 bis 9,5 % in 2030, mit einem Einbruch von nur 5,5 % in 2020.

Diese Schwankung ist darin begründet, dass die Produktion von RME schneller abnimmt, als die von BTL aufgebaut werden kann. Biomethan als Produkt von Bioraffinerietyp IV erreicht auch in 2030 kaum die Schwelle der Sichtbarkeit, mit Marktanteilen unter 0,2 %, gemessen am Erdgasbedarf. Wird die Produktion an einem Biomethan-Markt gespiegelt, etwa an dem politischen Ziel (Gasnetzzugangsverordnung 2010), in 2020 6 Mrd m³/a und 10 Mrd m³/a in 2030 Biomethan im Erdgasnetz verfügbar zu haben, ergibt sich, dass die Produktion aus der Bioraffinerie nach Typ IV dazu rund 1 % beitragen würde.

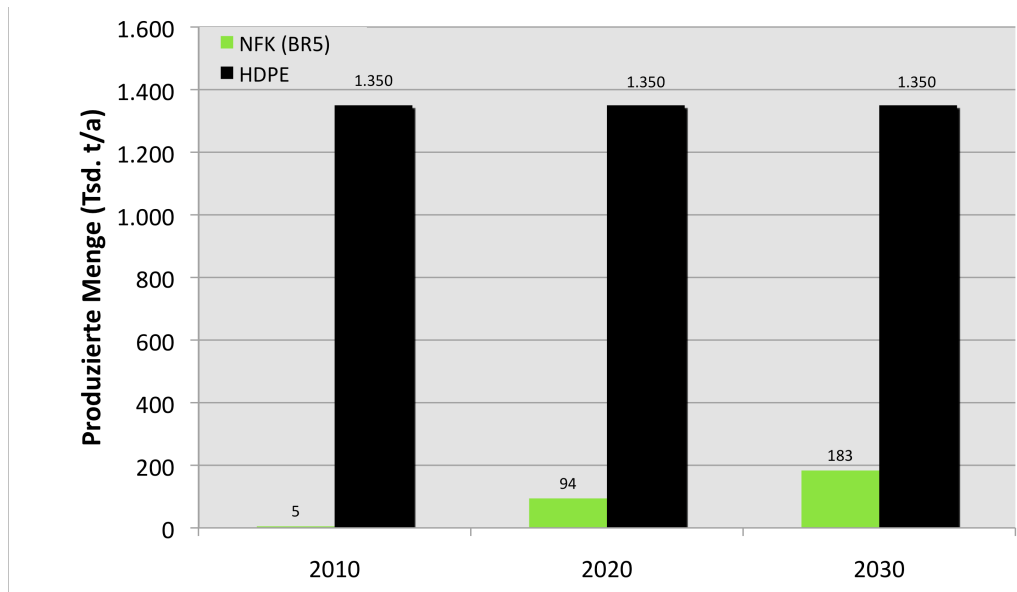
Abbildung 4-6: Mengen-Vergleich des Bioraffinerieprodukts Bioethanol mit fossilem Benzin im Ausblick bis 2030



Quelle: Eigene Berechnungen

Für die stofflichen Produkte ist das Ergebnis etwas differenzierter. Für Glycerin wurde angenommen, dass die Produktion von Rohglycerin mit der Biodiesel-Herstellung gekoppelt ist. Der Marktanteil aus dem Bioraffinerieprozess beträgt damit per definitionem (Abschnitt 4.1.2) 100 %. Die stofflichen Produkte Naphtha (aus BR III) sowie Dämmstoffe und naturfaserverstärkte Kunststoffe (aus BR V) erreichen im Ausblick Marktanteile von rund 2 % (Naphtha), 5,6 % (Dämmstoffe) und 13,6 % (NFK). Sie liegen damit in einer Größenordnung, dass sie vom bestehenden Markt gut aufgenommen werden können, ohne diesen wesentlich zu beeinflussen. In dieser Hinsicht sind also keine hemmenden Faktoren für die Vermarktung der Produkte und damit die Entwicklung der Bioraffineriekonzepte zu erwarten. Abbildung 4-7 zeigt beispielhaft den Abgleich für naturfaserverstärkte Kunststoffe mit High-Density-Polyethylen (HDPE).

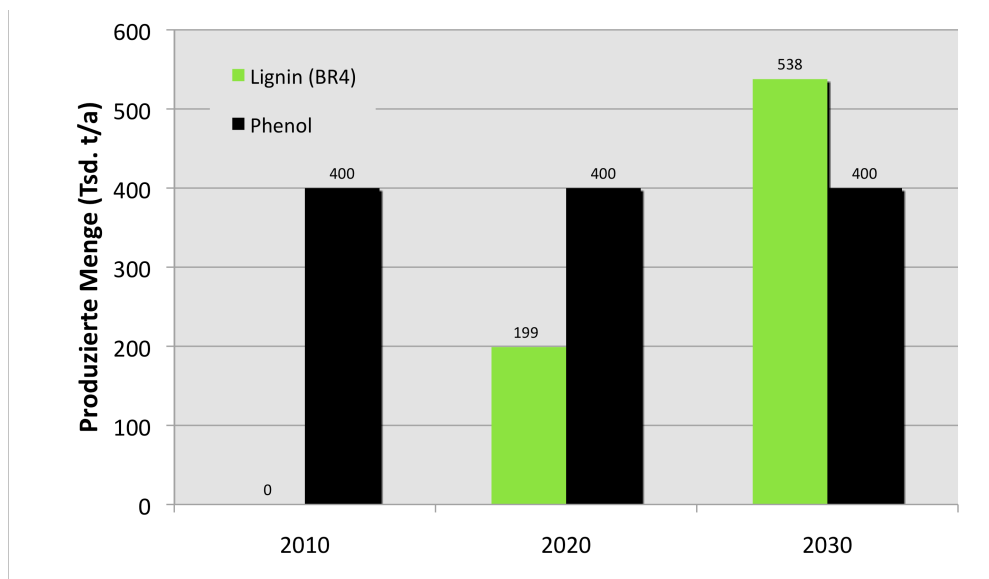
Abbildung 4-7: Mengen-Vergleich des stofflichen Bioraffinerie-Produkts Naturfaserverstärkte Kunststoffe mit fossil-basierten Kunststoffen im Ausblick bis 2030



Quelle: Eigene Berechnungen

Eine Ausnahme zu den vorigen Ausführungen bildet Lignin, das als stoffliches Produkt der Bioraffinerie vom Typ IV anfällt und das als Substitut für fossil-basiertes Phenol dienen soll. Folgt die Entwicklung dieser Bioraffinerie den vorgestellten Überlegungen, wird bereits in 2020 die Hälfte des zu erwartenden Bedarfs an Phenol durch die Bioraffinerie gedeckt. Im weiteren Ausblick übersteigt die Lignin-Produktion die Nachfrage um rund ein Drittel (siehe Abbildung 4-8).

Abbildung 4-8: Mengen-Vergleich des Bioraffinerie-Nebenprodukts Lignin mit fossil basier-tem Phenol im Ausblick bis 2030



Quelle: Eigene Berechnungen

Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine Nachfragesteigerung nach Lignin entsprechend der Produktion der Bioraffinerie induziert wird, müsste im Gegenzug die Produktion der entsprechenden Bioraffineriekonzepte (Typ IV) entsprechend gedrosselt werden. Im Zuge einer solchen Marktanpassung würden sich die Marktanteile von Ethanol am Benzinmarkt dann auf rund 5 % in 2020 (vorher 5,3%) bzw. 9,7 % in 2030 (vorher knapp 13%) belaufen. Damit tritt der Fall ein, dass das energetische Hauptprodukt, welches vom Markt in voller Höhe abgenommen werden könnte, einer Beschränkung durch ein stoffliches Koppelprodukt unterliegt.

Auch bei Anpassung der Ethanolmenge, so dass „nur“ die gesamte Nachfrage nach Lignin aus der Bioraffinerie gedeckt würde, ist zu beachten, dass der Betrieb der Anlage aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten stark am Lignin-Markt ausgerichtet werden muss – stärker als am Markt für das energetische Produkt, das keinen Beschränkungen unterliegt.

Soll die Produktion nicht gedrosselt werden, müssen neue Absatzmärkte bzw. Verwendungsmöglichkeiten für das entstehende Lignin gefunden werden. Eine Option könnte im Einsatz von Lignin als Feedstock für Bioraffinerien vom Typ III bestehen. Lignin könnte in der Vergasung Holz als Einsatzstoff ersetzen und so einen Beitrag für die Bioraffinerie vom Typ IV leisten.

Diese alternative bzw. ergänzende Option ist im Rahmen des Projekts bei einem Stakeholder-Workshop¹⁵ diskutiert und für machbar befunden worden. Technische Herausforderung werden im Rahmen der allgemeinen Diskussion der technischen Optimierung in Kapitel 6.2 näher ausgeführt.

¹⁵ am 07. 12. 2010 in Berlin; Protokoll siehe Anhang

5 Stoffstromanalyse

Im Folgenden werden die bislang technisch-ökonomischen Analysen der generischen Bioraffinerie-Typen um ausgewählte Umweltaspekte ergänzt (Kapitel 5.3). Weiterhin werden entsprechende Kenndaten für Referenzsysteme ermittelt (5.4), die jeweils das gleiche Produktspektrum bereitstellen wie die Bioraffinerie-Typen. Danach wird ein Vergleich zwischen Bioraffinerie-Typen und den Referenzsystemen durchgeführt (Kapitel 5.5).

Auf Grundlage dieser Ergebnisse erfolgt dann eine Hochrechnung des absoluten Einsparpotenzials in Deutschland im Jahr 2030 durch Bioraffinerien (Kapitel 5.6), die auf den in Kapitel 4.4 abgeschätzten Mengenentwicklungen beruht und eine kurze Diskussion der Ergebnisse.

5.1 Methodik der Stoffstromanalyse

Die methodische Grundlage für diese Arbeiten ist die sog. **Stoffstromanalyse**. Während mit Ökobilanzen ein Vergleich der Umweltwirkungen einzelner Produkte oder Dienstleistungen erfolgt, dient die Stoffstromanalyse zur produkt-, branchen- und sektorübergreifenden Abbildung der Stoff- und Energieströme sowie deren Umwelt-, Kosten- und Beschäftigungseffekte und liefert durch quantifizierte Aussagen zu deren künftigen Entwicklungen.

Methodisch analysiert die Stoffstromanalyse alle (auch grenzüberschreitenden) Stoff- und Energieströme von der Gewinnung der Ressourcen bis zur Nutzung und Entsorgung von Gütern. Als Ausgangspunkt dient die Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen, die sich zeitlich verändert und durch Technologien und Maßnahmen beeinflusst werden kann. Die Analyse erfolgt in **Prozessketten**, die ausgehend von der Nachfrage die Herstellungs- und Distributionsaufwendungen bis zur Ressourcenentnahme zurückverfolgen.

Durch die Kalibrierung des Modells an statistischen Daten wird sichergestellt, dass die realen Stoff- und Energieströme abgebildet werden. Für Szenariorechnungen können konsistente Mengengerüste unterlegt und damit die Effekte künftiger Entwicklungen transparent und erklärend bestimmt werden.

Als Ergebnisparameter liefert die Stoffstromanalyse neben Daten zur Ressourceninanspruchnahme (Primärenergie, Rohstoffe, Landbedarf) vor allem umweltbezogene Indikatoren (THG-Emissionen, Luftschadstoffe, Reststoffe) sowie orientierende Kosten- und Beschäftigungseffekte. Diese Ergebnisse lassen sich räumlich und auch sektoral auflösen. Aufgrund der inhärenten sektorübergreifenden Logik der Stoffstromanalyse eignet sich diese Methodik hervorragend zur Beschreibung und Bewertung komplexer Technologie- und Produktpfade, die gekoppelte Nutzen bereitstellen und ist damit ein geeignetes Instrument für die Analyse von Bioraffinerien und ihrer Einbindung in das übergeordnete Energiesystem.

5.2 Grunddaten für die Stoffstromanalyse

Die vielfältigen In- und Outputs, die mit dem Betrieb künftiger Bioraffineriesysteme verbunden sind, sowie deren zeitliche Entwicklung erfordern, eine konsistente und möglichst trans-

parente Datengrundlage zu verwenden. Entscheidend ist dabei, insbesondere für die biogenen Feedstocks geeignete Werte bereitzustellen, die auch mit denen für die Referenzsysteme (Strom, Kraftstoffe, Chemiegrundstoffe etc.) konsistent sind, d.h. eine referenzielle Integrität bieten.

Das Öko-Institut hat mit dem Stoffstrommodell GEMIS seit 1987 eine entsprechende Datenbank entwickelt und kontinuierlich aktualisiert und erweitert, die mittlerweile über 10.000 Datensätze im Bereich Energie, Stoffe und Transport umfasst und international verwendet wird¹⁶. Im Rahmen des BioCouple-Projekts wurde die GEMIS-Datenbasis um die generischen Bioraffinerie-Typen für die Zeithorizonte 2020 und 2030 ergänzt und die entsprechenden Verknüpfungen mit den Input-Prozessen (Vorketten) hergestellt.

5.3 Stoffstromkenndaten der Bioraffinerie-Systeme

Die im Kapitel 3.2 dargestellten generischen Bioraffinerie-Typen wurden dazu im Hinblick auf die verwendeten biogenen Rohstoffe sowie Hilfsenergien und stoffliche Hilfsinputs beschrieben, die entsprechenden Kenndaten zeigen die beiden nachfolgenden Tabellen.

Tabelle 5-1: Kenndaten der Bioraffinerietypen im Jahr 2020

Kenngröße	Einheit	Typ I	Typ II	Typ IIIa	Typ IIIb	Typ IV	Typ V
THG	g CO ₂ -Äq./MJ	54,7	55,7	4,4	13,8	2,6	60,8
	g CO ₂ /MJ	35,9	28,3	4,1	8,5	2,6	57,6
Luftschadstoffe	g SO ₂ -Äq./MJ	0,22	0,46	0,01	0,01	0,01	0,13
	g SO ₂ /MJ	0,02	0,04	0,01	0,01	0,00	0,03
	g NO _x /MJ	0,09	0,11	0,01	0,05	0,02	0,12
	g PM ₁₀ /MJ	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01
KEV _{nichternewerbar}	MJ _{primär} /MJ	0,60	0,47	0,05	0,12	0,03	0,82
Bereitstellungskosten	€cent ₂₀₁₀ /MJ	2,5	3,4	3,3	4,8	3,7	8,7
Outputs:		EtOH	RME	BtL	BtL	EtOH	Strom
Koppelprodukte	Einheit	Typ I	Typ II	Typ IIIa	Typ IIIb	Typ IV	Typ V
Strom	MJ/MJ			0,05	0,05		
Naphta	MJ/MJ			0,19	0,19		
DDGS	MJ/MJ	0,82					
Rapskuchen	g/MJ		39,6				
Düngemittel	g/MJ						0,30
Dämmstoffe	g/MJ						0,04
Glyzerin	g/MJ		2,7				
Bio-PE	g/MJ						0,07
Lignin	g/MJ					0,01	

Quelle: eigene Berechnungen; gelb hinterlegt: energetische Outputs, hellblau = stoffliche Outputs

¹⁶ GEMIS steht für Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme, siehe www.gemis.de

Tabelle 5-2: Kenndaten der Bioraffinerietypen im Jahr 2030

Kenngröße	Einheit	Typ I	Typ II	Typ IIIa	Typ IIIb	Typ IV	Typ V
THG	g CO ₂ -Äq./MJ	52,3	45,2	3,8	12,1	0,1	53,0
	g CO ₂ /MJ	34,8	21,5	3,6	7,4	0,2	50,2
Luftschadstoffe	g SO ₂ -Äq./MJ	0,21	0,40	0,01	0,07	0,03	0,11
	g SO ₂ /MJ	0,02	0,03	0,00	0,01	0,02	0,03
	g NO _x /MJ	0,08	0,10	0,01	0,04	0,01	0,10
	g PM ₁₀ /MJ	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01
KEV _{nichterneuenerbar}	MJ _{primär} /MJ	0,58	0,37	0,04	0,10	0,01	0,68
Bereitstellungskosten	€cent ₂₀₁₀ /MJ	2,4	3,6	2,4	4,2	2,6	6,8
Outputs:		EtOH	RME	BtL	BtL	EtOH	Strom
Koppelprodukte	Einheit	Typ I	Typ II	Typ IIIa	Typ IIIb	Typ IV	Typ V
Strom	MJ/MJ			0,075	0,075		
Naphta	MJ/MJ			0,081	0,081		
DDGS	MJ/MJ	0,82					
Rapskuchen	g/MJ		39,6				
Düngemittel	g/MJ						0,27
Dämmstoffe	g/MJ						0,03
Glyzerin	g/MJ		2,9				
Bio-PE	g/MJ						0,06
Lignin	g/MJ					0,01	

Quelle: eigene Berechnungen; gelb = energetische Outputs, hellblau = stoffliche Outputs

Die in den Tabellen dargestellten Kenndaten beziehen sich auf die sog. „Brutto-Bilanz“, d.h. es sind alle Inputs bilanziert, die für die Bereitstellung **sowohl** der Haupt-Outputs **als auch** der **Koppelprodukte** erforderlich sind. Hierin sind auch die Vorketten mit berücksichtigt.

Für die Bioraffinerie-Typen **I und II** sind dabei Weizen bzw. Rapssaat aus Deutschland unterstellt, deren Anbau **ohne** Landnutzungsänderungen (land use change = LUC) erfolgt – es wurde angenommen, dass die Flächen bereits heute verwendet werden und keine „Verdrängung“ von Nahrungs- oder Futtermittelproduktion erfolgt¹⁷.

Beim Bioraffinerie-Typ III wurde in die Untertypen IIIa und IIIb unterschieden:

Typ IIIa verwendet Waldrest- und Schwachholz, bei dem keine THG-Emissionen aus LUC auftreten, während Typ IIIb Holz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) verwendet. Es wurde angenommen, dass die KUP auf „freiwerdenden“ Acker- und ehemals intensiv genutzten Grünlandflächen angelegt werden und dabei ebenfalls keine LUC-bedingten Emissionen auftreten¹⁸.

¹⁷ Zur Abschätzung der möglichen Emissionen an Treibhausgasen (THG), die bei einer Einbeziehung von Verdrängungseffekten (sog. indirect land use change = ILUC) entstehen können, siehe ÖKO/IFEU (2010) sowie Fritsche/Sims/Monti (2010) und Fritsche/Wiegmann (2011).

¹⁸ Dies ist eine konservative Abschätzung, da bei KUP auf Ackerland durch die höhere unterirdische Wurzelmasse eine Erhöhung des Boden-C stattfindet, vgl. ÖKO/IFEU (2010).

Der Bioraffinerie-Typ IV verwendet Reststroh als Feedstock, bei dem in Übereinstimmung mit den THG-Bilanzierungsvorgaben nach der EU-Richtlinie zu erneuerbaren Energien (RED, siehe EC 2009) ebenfalls keine Änderungen des Boden-C angenommen wurden¹⁹.

Die „grüne“ Bioraffinerie Typ V verwendet Grasschnitt und Gülle. Bei ersterem wurde, wie bei den anderen Anbausystemen, die Nutzung **vorhandenen** Grünlands (ohne LUC) angenommen, für die Nutzung von Gülle als landwirtschaftlichem Reststoff sind nach der RED definitionsgemäß keine THG-Emissionen anzurechnen.

Für alle biogenen Vorketten zur Bereitstellung der feedstocks wurden die in GEMIS 4.7 verfügbaren Prozessketten zur inländischen Produktion in den Jahren 2020 und 2030 verwendet, die auf früheren Studien beruhen und im Rahmen von BioCouple nicht weiter verändert wurden²⁰.

5.4 Kenndaten der Referenzsysteme

Im BioCouple-Vorhaben wurden die generischen Bioraffinerie-Typen jeweils mit konventionellen, ungekoppelten Systemen zur Energie- und Stoffbereitstellung verglichen, die in Kapitel 4.1 bereits eingeführt worden sind.

Zentral ist dabei die Frage, welche konventionellen Systeme in Vergleichen mit biogenen Prozessen gegenüber gestellt werden und welche Kenndaten diese Systeme vor dem Hintergrund des Zeithorizonts 2020 und 2030 aufweisen.

Es konzentriert sich auf die Definition von Referenz-Systemen für die Strom- und Kraftstoffbereitstellung, die für BioCouple interessieren, sowie auf die ebenfalls erforderlichen Systeme zur Bereitstellung von Stoffen.

Es wird jeweils bei den Referenzsystemen für Strom, Kraftstoffe und Stoffe eine Durchschnittsbetrachtung für 2020 und 2030 durchgeführt im Hinblick auf

- Emissionen an Treibhausgasen (THG)
- Emissionen an Luftschadstoffen
- kumulierter nichterneuerbarer Primärenergie-Verbrauch (KEV) sowie
- Bereitstellungskosten.

Die methodischen Fragen der Vergleiche von biogenen und konventionellen Systemen werden in einem anderen Arbeitspapier behandelt (vgl. DBFZ 2010). Der räumliche Bezug der Referenzsysteme ist Deutschland, jedoch werden über die vorgelagerten Bereitstellungsketten für Energieträger auch entsprechende Prozesse im Ausland sowie die Herstellungsaufwände einbezogen.

¹⁹ Ein im Abschluss befindliches BMU-gefördertes F&E-Vorhaben von DBFZ, Öko-Institut und TLL untersucht im Detail die Frage der C-Bilanz bei der Nutzung von Reststroh und wird hier weitere Erkenntnisse bringen.

²⁰ siehe Fritsche/Wiegmann 2008 und ÖKO/IFEU 2010 sowie ÖKO/DLR-IVF 2009

Die Angaben sind jeweils auf Endenergie bezogen, bei Kraftstoffe sind die Daten für deren 100%-Umsetzung in einem Fahrzeug angegeben. Alle Daten zu Nutzungs- bzw. Wirkungsgraden, Hilfsenergieeinsätzen und Emissionsfaktoren beziehen sich auf Heizwerte (H_u).

5.4.1 Energetische Referenzsysteme

Als Referenzsystem für Strom wird das Erzeugungsmix des öffentlichen Kraftwerksparks angesetzt, da dies für Durchschnittsbetrachtungen die relevante Größe darstellt.

Für die Strombereitstellung im Jahr 2010 liegen erste statistische Daten vor, auf deren Basis die durchschnittlichen Kenndaten des bundesdeutschen öffentlichen Kraftwerksparks abgeschätzt und die Annahmen der BMU-Leitstudie (BMU, 2009) für 2010 aktualisiert wurden (ÖKO 2011a). Für die weitere Entwicklung des Kraftwerksparks wurde dagegen stets mit der BMU-Leitstudie aus 2009 gerechnet.

Die entsprechenden Daten zu den Brennstoffanteilen bzw. Kraftwerkstypen zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 5-3: Kenndaten zu Kraftwerksanteilen im Kraftwerkspark, 2010 – 2030

Energieträger	2010	2020	2030
Steinkohle	18,7	16,7	10,2
Braunkohle	23,7	20,4	12,6
Erdgas inkl. sonst. Gase	16,7	23,2	23,8
Öl	1,2	1,6	1,0
Müll	1,6	2,0	2,0
AKW	22,4	5,7	0,0
Wasserkraft	3,2	4,2	4,4
Wind	6,1	15,0	25,5
PV	2,0	2,7	3,9
Geothermie	0,0	0,3	1,1
Deponie-, Klär- und Biogas	2,3	3,9	5,3
Holz, Stroh, sonstige Biomasse	2,1	3,9	3,8
Import von regenerativem Strom	0,0	0,5	6,4
Anteil nichterneuerbar	82,7	67,6	47,6
Anteil erneuerbar (inkl. Müll)	17,3	32,4	52,4
Anteil KWK (fossil, biogen)	11,5	25,0	30,0

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von (BMU, 2009) und ÖKO (2011a)

Neben Strom werden auch Kraftstoffe sowie Naphtha und Futtermittel als „energetische“ Referenzsysteme festgelegt, da sie durch ihren Energiegehalt beschrieben werden können.

Tabelle 5-4: Kenndaten der energetischen Referenzsysteme im Jahr 2020

g/MJ _{end}	Strom	Benzin	Diesel	Naphta	Futtermittel
CO ₂ -Äquivalente	106	89	88	15	16
- davon CO ₂	100	88	85	15	7
SO ₂ -Äquivalente	0,19	0,08	0,28	0,05	0,22
- davon SO ₂	0,07	0,03	0,03	0,03	0,02
- davon NO _x	0,13	0,07	0,36	0,03	0,05
- Staub (PM ₁₀)	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
KEV _{nichtererneuerbar}	1,31	1,20	1,14	1,2	0,1
Preis € ₂₀₁₀ /GJ	26,2	45,6	34,7	14,5	11,8

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.7 auf Basis von Nitsch/DLR (2009) und ÖKO (2011a)

Tabelle 5-5: Kenndaten der energetischen Referenzsysteme im Jahr 2030

g/MJ _{end}	Strom	Benzin	Diesel	Naphta	Futtermittel
CO ₂ -Äquivalente	104	89	88	15	15
- davon CO ₂	98	88	85	15	7
SO ₂ -Äquivalente	0,18	0,09	0,29	0,06	0,21
- davon SO ₂	0,09	0,04	0,03	0,04	0,02
- davon NO _x	0,12	0,08	0,37	0,03	0,05
- Staub (PM ₁₀)	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
KEV _{nichtererneuerbar}	1,14	1,20	1,14	1,2	0,1
Preis € ₂₀₁₀ /GJ	23,5	50,3	35,7	17,5	12,8

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.7 auf Basis von Nitsch/DLR (2009) und ÖKO (2011a)

5.4.2 Stoffliche Referenzsysteme

Ergänzend sind Referenzsysteme für die Bereitstellung von Stoffen erforderlich. Hierzu wurde auf die in GEMIS verfügbaren Stoffsysteme des Jahres 2005 zurückgegriffen und diese für die Jahre 2020 und 2030 fortgeschrieben.

Dabei bleiben die stofflichen Effizienzen der Prozessketten unverändert, aber die Hilfsenergie- und Transportnachfragen wurden mit den entsprechenden Prozessen der Jahre 2020 bzw. 2030 verknüpft. Dies stellt eine **konservative Fortschreibung** dar, die durchaus mögliche Verbesserungen bei der Umwandlungseffizienz, den eingesetzten Rohstoffen sowie beim Recycling nicht einbezieht.

Grund für diese Vereinfachung ist es, dass derzeit keine ausreichende Datengrundlage für eine konsistente zeitliche Fortschreibung der Stoffsysteme gegeben ist²¹.

²¹ Das in 2010 angelaufene UBA-Forschungsvorhaben „Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse“ (FKZ 3710 93 109) wird im Jahr 2012 erste Szenarien hierzu entwickeln.

Tabelle 5-6: Kenndaten der stofflichen Referenzsysteme im Jahr 2020

g/kg	Sojaschrot	Glyzerin	HDPE	Phenol	Steinwolle	N-Dünger
CO ₂ -Äquivalente	402	8568	2445	2042	934	7503
- davon CO ₂	381	7979	2433	2048	844	2863
SO ₂ -Äquivalente	3,98	15,37	6,75	5,98	2,63	28,22
- davon SO ₂	2,09	7,13	1,44	1,36	1,81	4,40
- davon NO _x	2,66	10,36	7,70	6,76	1,13	16,01
- Staub (PM ₁₀)	0,24	0,82	0,53	0,49	0,31	2,43
KEV _{nichterneuerbar}	5,23	121,3	11,5	8,5	10,6	49,9
Preis € ₂₀₁₀ /t	200	250	1350	1250	2000	1500

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.7

Tabelle 5-7: Kenndaten der stofflichen Referenzsysteme im Jahr 2030

g/kg	Sojaschrot	Glyzerin	HDPE	Phenol	Steinwolle	N-Dünger
CO ₂ -Äquivalente	402	8221	2479	2061	895	7530
- davon CO ₂	381	7709	2467	2067	837	2892
SO ₂ -Äquivalente	3,98	12,87	7,32	6,31	2,26	28,37
- davon SO ₂	2,09	5,47	1,91	1,62	1,57	4,46
- davon NO _x	2,66	9,62	7,83	6,84	0,96	16,16
- Staub (PM ₁₀)	0,24	0,68	0,58	0,52	0,16	2,44
KEV _{nichterneuerbar}	5,23	120,5	11,6	8,7	10,1	50,4
Preis € ₂₀₁₀ /t	240	375	1600	1500	2400	1800

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.7

Die genannten Preisdaten für die Referenzprodukte stellen Schätzungen im Rahmen von BioCouple dar, die indikativ für die jeweiligen Produkte aus heutigen Preisen und der absehbaren Anlegbarkeit aufgrund der unterstellten Öl- und CO₂-Zertifikatspreisentwicklung (nach BMU-Leitszenario) angenommen wurden.

Ingesamt ist ein **erheblicher Forschungsbedarf** zu den Emissions- und Preisdaten für die künftigen stofflichen Referenzsysteme festzustellen (vgl. Kapitel 7). Dementsprechend sind die hier abgeleiteten Kenndaten als erste Annäherung zu verstehen, die im Rahmen künftiger Arbeiten zu belastbareren Daten weiterentwickelt werden müssen.

5.5 Bilanzierung Bioraffinerien versus Referenzsysteme

Die Bruttobilanzen der Bioraffineriesysteme wurden bereits im Kapitel 5.3 dargestellt, so dass im Folgenden die Emissionen der zugehörigen Referenzsysteme und die daraus abgeleiteten Bilanzen erläutert werden.

5.5.1 Bruttobilanzen der Referenzsysteme

Basierend auf den spezifischen Kennwerten der energetischen und stofflichen Referenzsysteme wurden im nächsten Schritt die Bruttobilanzen für die **äquivalenten Outputmengen** berechnet, d.h. die Bilanzen für den Fall, dass die Referenzsysteme sowohl die jeweiligen Hauptoutputs der Bioraffinerien als auch die jeweiligen Koppelprodukte bereitstellen.

Beides wurde dann summiert, um die gesamten Vergleichswerte der Referenzsysteme zu erhalten. Wie zuvor wurde dabei für die Jahre 2020 und 2030 unterschieden.

Tabelle 5-8: Bruttobilanz der Referenzsysteme im Jahr 2020

	Einheit	Typ I	Typ II	Typ IIIa	Typ IIIb	Typ IV	Typ V
	Äquivalent	Benzin	Diesel	Diesel	Diesel	Benzin	Strom
Bilanz Hauptprodukte (REF-Systeme)	g CO ₂ -Äq./MJ	89,5	87,6	87,6	87,6	89,5	106,1
	g CO ₂ /MJ	88,4	85,4	85,4	85,4	88,4	100,2
	g SO ₂ -Äq./MJ	0,1	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2
	g SO ₂ /MJ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
	g NO _x /MJ	0,1	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1
	g PM ₁₀ /MJ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	MJ _{primär} /MJ	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,3
	€cent ₂₀₁₀ /MJ	4,6	3,6	3,6	3,6	4,6	2,6
Bilanz Koppelprodukte (REF-Systeme)	g CO ₂ -Äq./MJ	12,7	39,0	10,3	10,3	22,4	2,5
	g CO ₂ /MJ	5,8	36,6	9,9	9,9	22,5	1,1
	g SO ₂ -Äq./MJ	0,18	0,20	0,02	0,02	0,07	0,01
	g SO ₂ /MJ	0,02	0,10	0,01	0,01	0,01	0,00
	g NO _x /MJ	0,04	0,13	0,01	0,01	0,07	0,01
	g PM ₁₀ /MJ	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
	MJ _{primär} /MJ	0,08	0,53	0,33	0,33	0,09	0,02
	€cent ₂₀₁₀ /MJ	0,97	0,86	0,37	0,37	1	0,06
Vergleichssysteme gesamt (REF)	Einheit	Typ I	Typ II	Typ IIIa	Typ IIIb	Typ IV	Typ V
	g CO ₂ -Äq./MJ	102,2	126,5	97,9	97,9	111,9	108,6
	g CO ₂ /MJ	94,1	122,0	95,3	95,3	110,9	101,3
	g SO ₂ -Äq./MJ	0,3	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2
	g SO ₂ /MJ	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
	g NO _x /MJ	0,1	0,5	0,4	0,4	0,1	0,1
	g PM ₁₀ /MJ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	MJ _{primär} /MJ	1,3	1,7	1,5	1,5	1,3	1,3
	€cent ₂₀₁₀ /MJ	5,5	4,4	3,9	3,9	5,9	2,7

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.7

Tabelle 5-9: Bruttobilanz der Referenzsysteme im Jahr 2030

Bilanz Hauptprodukte (REF-Systeme)	Einheit	Typ I	Typ II	Typ IIIa	Typ IIIb	Typ IV	Typ V
	Äquivalent	Benzin	Diesel	Diesel	Diesel	Benzin	Strom
Bilanz Hauptprodukte (REF-Systeme)	g CO ₂ -Äq./MJ	89,4	87,6	87,6	87,6	89,4	103,7
	g CO ₂ /MJ	88,4	85,5	85,5	85,5	88,4	98,1
	g SO ₂ -Äq./MJ	0,1	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2
	g SO ₂ /MJ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
	g NO _x /MJ	0,1	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1
	g PM ₁₀ /MJ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	MJ _{primär} /MJ	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1
	€cent ₂₀₁₀ /MJ	5,0	4,0	4,0	4,0	5,0	2,3
Bilanz Koppelprodukte (REF-Systeme)	g CO ₂ -Äq./MJ	12,2	39,5	11,9	11,9	20,0	2,2
	g CO ₂ /MJ	5,6	37,2	11,4	11,4	20,0	1,0
	g SO ₂ -Äq./MJ	0,17	0,19	0,02	0,02	0,06	0,01
	g SO ₂ /MJ	0,02	0,10	0,01	0,01	0,02	0,00
	g NO _x /MJ	0,04	0,13	0,01	0,01	0,07	0,00
	g PM ₁₀ /MJ	0,01	0,01	0,10	0,10	0,01	0,00
	MJ _{primär} /MJ	0,08	0,55	0,31	0,31	0,08	0,01
	€cent ₂₀₁₀ /MJ	1,05	1,06	0,15	0,15	1	0,07
Vergleichssysteme gesamt (REF)	Einheit	Typ I	Typ II	Typ IIIa	Typ IIIb	Typ IV	Typ V
	g CO ₂ -Äq./MJ	101,6	127,0	99,4	99,4	109,4	106,0
	g CO ₂ /MJ	94,0	122,6	96,8	96,8	108,5	99,1
	g SO ₂ -Äq./MJ	0,3	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2
	g SO ₂ /MJ	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
	g NO _x /MJ	0,1	0,5	0,4	0,4	0,1	0,1
	g PM ₁₀ /MJ	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
	MJ _{primär} /MJ	1,3	1,7	1,5	1,5	1,3	1,2
	€cent ₂₀₁₀ /MJ	6,1	5,1	4,1	4,1	6,5	2,4

Quelle: eigene Berechnungen mit GEMIS 4.7

5.5.2 Bilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme

Die Brutto-Bilanzen der Bioraffinerien können den Brutto-Bilanzen der Referenzsysteme gegenübergestellt und so die potenziellen Einspareffekte durch die **jeweiligen** Bioraffinerie-Typen gegenüber ihren **jeweiligen** Referenzsystemen ermittelt werden.

Dabei ist zu beachten, dass ein Vergleich der Bioraffineriesysteme **untereinander** aufgrund der gewählten Vergleichsmethodik **nicht zulässig** ist. Dies liegt daran, dass der jeweilige Nutzen der Bioraffinerie-Typen **nicht gleich** sind, also die Haupt-Outputs und die Koppelprodukte jeweils unterschiedliche Werte haben. Hinzu kommt, dass alle Bioraffinerietypen unterschiedliche Einsatzstoffe (feedstocks) verarbeiten. Der hier angestellte Vergleich diene ja dazu, die Bandbreite der unterschiedlichen Bioraffineriesysteme abzubilden.

Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis der Bilanz für das Jahr 2020.

Tabelle 5-10: Spezifische Bilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme im Jahr 2020

	Bioraffinerie-Typ					
	I	II	IIIa	IIIb	IV	V
g CO ₂ -Äq./MJ	-47	-71	-93	-84	-109	-48
g CO ₂ /MJ	-58	-94	-91	-87	-108	-44
g SO ₂ -Äq./GJ	-41	-18	-283	-283	-137	-77
g SO ₂ /GJ	-29	-89	-32	-24	-48	-41
g NO _x /GJ	-31	-379	-359	-328	-130	-19
g PM ₁₀ /GJ	-3	4	-3	3	-8	1
KEV-nichtern. GJ _{primär} /GJ	-0,7	-1,2	-1,4	-1,4	-1,3	-0,5

Quelle: eigene Berechnungen

Das Ergebnis der Bilanzierung zeigt deutlich, dass - mit Ausnahme von Feinstaub (PM₁₀) bei den Bioraffinerietypen II und V - bei allen betrachteten Umweltaspekten eine Entlastung durch Bioraffinerien eintreten würde.

Die Resultate, bei denen die Bioraffinerietypen keine Einsparung gegenüber den jeweiligen Referenzsystemen erzielen, sind gelb hinterlegt. Die folgende Tabelle stellt das Ergebnis der Bilanz nochmals in relativen Größen dar.

Tabelle 5-11: Relative Bilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme im Jahr 2020

Parameter	Typ I	Typ II	Typ IIIa	Typ IIIb	Typ IV	Typ V
g CO ₂ -Äq./MJ	-46%	-56%	-95%	-86%	-98%	-44%
g CO ₂ /MJ	-62%	-77%	-96%	-91%	-98%	-43%
g SO ₂ -Äq./MJ	-15%	-4%	-95%	-95%	-92%	-38%
g SO ₂ /MJ	-58%	-69%	-87%	-65%	-98%	-59%
g NO _x /MJ	-26%	-77%	-96%	-88%	-89%	-14%
g PM ₁₀ /MJ	-27%	26%	-53%	46%	-84%	9%
MJ _{primär} /MJ	-53%	-72%	-96%	-92%	-97%	-38%
€cent ₂₀₁₀ /MJ	-55%	-22%	-15%	23%	-38%	226%

Quelle: eigene Berechnungen

Hier wurden auch die Bereitstellungskosten einbezogen, bei denen der Bioraffinerietyp IIIb zu leicht und Typ V zu erheblich höheren Werten gegenüber den jeweiligen Referenzsystemen führen würde. Dies liegt insbesondere daran, dass der unterstellte Preis des Referenzprodukts gegenüber dem Koppelprodukt im Vergleich zur realen Marktsituation einer bestehenden Anlage unterbewertet wird, da die ökonomische Optimierung aus Betreibersicht höhere Wertschöpfung durch die stofflichen Produkte (bessere Qualität usw.) erlaubt.

Mit den angenommen künftigen Verbesserungen sowohl bei den Bioraffinerietypen wie auch bei den Referenzsystemen würden sich bis 2030 die Ergebnisse deutlich verbessern, wie die folgende Tabelle zeigt.

Tabelle 5-12: Spezifische Bilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme im Jahr 2030

Emission	Bioraffinerie-Typ					
	I	II	IIIa	IIIb	IV	V
g CO ₂ -Äq./MJ	-49	-82	-96	-87	-109	-53
g CO ₂ /MJ	-59	-101	-93	-89	-108	-49
g SO ₂ -Äq./GJ	-51	-89	-297	-235	-125	-82
g SO ₂ /GJ	-32	-97	-35	-28	-34	-58
g NO _x /GJ	-38	-410	-375	-348	-132	-21
g PM ₁₀ /GJ	-4	2	-101	-96	-8	-1
KEV-nichtern. GJ _{primär} /GJ	-0,7	-1,3	-1,4	-1,4	-1,3	-0,5

Quelle: eigene Berechnungen

Längerfristig würden **alle** Bioraffinerien - mit Ausnahme von Feinstaub (PM₁₀) beim Bioraffinerietyp II – erhebliche Einsparungen bei **allen** betrachteten Umweltaspekten gegenüber den Referenzsystemen erzielen können.

Die folgende Tabelle stellt das Ergebnis der Bilanz wiederum in relativen Größen dar und bezieht auch die Bereitstellungskosten mit ein.

Tabelle 5-13: Relative Bilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme im Jahr 2030

Parameter	Typ I	Typ II	Typ IIIa	Typ IIIb	Typ IV	Typ V
g CO ₂ -Äq./MJ	-48%	-64%	-96%	-88%	-100%	-50%
g CO ₂ /MJ	-63%	-82%	-96%	-92%	-100%	-49%
g SO ₂ -Äq./MJ	-19%	-18%	-96%	-76%	-83%	-43%
g SO ₂ /MJ	-60%	-76%	-89%	-71%	-64%	-66%
g NO _x /MJ	-32%	-81%	-97%	-90%	-93%	-17%
g PM ₁₀ /MJ	-32%	11%	-98%	-92%	-88%	-11%
MJ _{primär} /MJ	-55%	-78%	-97%	-93%	-100%	-41%
€cent ₂₀₁₀ /MJ	-61%	-29%	-42%	1%	-61%	183%

Quelle: eigene Berechnungen

Auch die Ergebnisse bei den Bereitstellungskosten verbessern sich: Im Jahr 2030 würde auch der Bioraffinerietyp IIIb praktisch keine Mehrkosten mehr aufweisen, während Typ V zwar günstiger wird, aber immer noch deutlich über den Kosten des Referenzsystems liegen würde.

Bei dem Kostenergebnis zu Typ V ist aber zu beachten, dass die hier gewählten Preise des Referenzsystems nicht typisch für die besondere Wertschöpfungssituation zu sein scheinen, wie die Ergebnisse der bestehenden Pilotanlage zeigen: Durch marktangepasste Produktpolitik, die nicht im generischen Bioraffinerietyp abgebildet ist, kann eine wesentlich bessere Erlössituation erreicht und damit ein wirtschaftlicher Betrieb erzielt werden²².

²² siehe dazu näher die Beiträge zu den stakeholder-Workshops im Anhang.

5.6 Absolute Effekte durch Bioraffinerien

In den bisherigen Abschnitten dieses Kapitels wurde stets auf spezifische Kennwerte abgestellt, d.h. je Einheit Output gerechnet. Für die Frage, wie viel Umweltentlastung mittelfristig durch Bioraffineriesysteme in Deutschland möglich wäre, ist jedoch entscheidend, wie groß das Marktpotenzial für die einzelnen Typen sein wird.

Auf Grundlage der entsprechenden Ergebnisse aus den Kapiteln 4.3 und 4.4 wurde das in der folgenden Tabelle dargestellte Mengengerüst für Bioraffinerien bis 2030 ermittelt. Hierbei sind die Bioraffinerietypen I und II aufgrund der nach 2020 weiter ansteigenden THG-Reduktionsanforderungen an biogene Kraftstoffe nicht mit einbezogen, das entsprechende Flächenpotenzial zum Anbau wurde für die Raffinerietypen IIIb und V angenommen.

Tabelle 5-14: Mengengerüst für Bioraffinerien im Jahr 2030

BioRaff-Typ	Anlagenzahl	Hauptoutput, PJ/a	Hauptoutput
IIIa	5	31	FT-Diesel
IIIb	10	62	FT-Diesel
IV	14	50	EtOH
V	63	2	Strom

Quelle: eigene Berechnungen

Mit den spezifischen Emissionsbilanzen und dem o.g. Mengengerüst wurde nun die absolute Einsparung an THG und Luftschadstoffen durch die angenommene Realisierung des Marktpotenzials an Bioraffinerien gegenüber den jeweiligen Referenzsystemen, d.h. inklusiver der Koppelprodukte, für das Jahr 2030 ermittelt. Die Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 5-15: Absolute Emissionsbilanz Bioraffinerien versus Referenzsysteme im Jahr 2030

BioRaff-Typ	Mio. t		1000 t	
	CO ₂ Äq.	CO ₂	SO ₂ Äq.	PM ₁₀
IIIa	-2,9	-2,9	-9,2	-3,1
IIIb	-5,4	-5,5	-14,5	-5,9
IV	-5,5	-5,5	-6,3	-0,4
V	-0,1	-0,1	-0,2	0,0
Summe	-14,0	-14,0	-30,2	-9,5

Quelle: eigene Berechnungen

Das Einsparpotenzial von rund 14 Mio. t an CO₂-Äquivalenten entspricht einer weiteren Emissionsminderung um rund 3% der für das Jahr 2030 erwarteten energiebedingten Gesamt-THG-Emissionen von rund 430 Mio. t nach dem BMU-Leitszenario 2009.

Dieses Einsparpotenzial erscheint zwar isoliert betrachtet als nicht besonders hoch, jedoch sind die damit verbundenen Mehrkosten sehr gering und es gibt das parallele Potenzial zur Einsparung von versauernden Luftschadstoffen sowie Feinstäuben.

Schließlich ist zu beachten, dass über 2030 hinaus die effiziente Nutzung von Biomasse zur gekoppelten Bereitstellung von Energie- **und Stoffdienstleistungen** tendenziell umso wichtiger wird, je mehr die Dekarbonisierung des Energiesystems gelingt (Prognos/ÖKO 2009).

Damit bieten Bioraffinerien ein **längerfristig wichtiges strategisches Potenzial** zur Ausweitung der Dekarbonisierung auf den Bereich der (roh)stofflichen Nutzung bei gleichzeitig hoher Effizienz und können damit einen Beitrag zur Verminderung von Nutzungskonkurrenzen leisten.

6 Entwicklung einer Teilstrategie zum weiteren Ausbau von Bioraffinerien

Die vorhergehenden Untersuchungen haben gezeigt, dass von einem Konzept zur gekoppelten Erzeugung von stofflichen und energetischen Produkten, also „der“ Bioraffinerie, nicht zu sprechen ist. Vielmehr existieren jetzt schon mehrere Verfahren zur Umsetzung von Biomasse, und weitere befinden sich in der Forschung und Entwicklung. Die Studie hat fünf verschiedene generische Typen an Bioraffineriekonzepten untersucht. Bei der Auswertung der Ergebnisse sowie der Bewertung und Ableitung von Handlungsempfehlungen ist diese Vielfalt zu beachten: in vielen Bereichen können die Ergebnisse nicht für alle Konzepte gleichermaßen verallgemeinert werden, sondern die Besonderheiten der Verfahren sind zu berücksichtigen.

Wesentlich für die Ableitung von Erfolgsfaktoren ist die Voraussetzung, dass es sich bei den dargestellten Bioraffinerien tatsächlich um ein erfolgreiches Konzept handelt. Das bedeutet, dass zum einen die technische Umsetzung funktioniert, und zum anderen auch die Wirtschaftlichkeit der Anlagen gegeben ist. Die technische Machbarkeit ist bei den Bioraffinerietypen I (Bioethanol auf Basis von Zucker und Stärke), II (Rapsmethylester) und V (Biogas aus Grünschnitt) seit mehreren Jahren bewiesen. Die energetischen Produkte können in einem (subventionierten) Markt abgesetzt werden und auch die stofflichen Produkte werden in der Regel erfolgreich vermarktet. Dagegen ist die Technik der Bioraffinerie vom Typ III (BTL) noch nicht ausgereift und steckt noch im Stadium der Demonstration. Ähnlich verhält es sich mit der Nutzung von Ligno-Zellulose als Basis für Ethanol (Typ IV). Der technische Optimierungsbedarf der unterschiedlichen Anlagen wird im folgenden Abschnitt 6.2 dargestellt.

Als „erfolgreich“ in etwas weiterem Sinne wird eine Bioraffinerie in Anlehnung an die allgemeine Diskussion um die Nutzung von Biomasse definiert, wenn der eingesetzte Feedstock nachhaltig produziert und möglichst effizient genutzt wird, so dass die Umweltwirkungen so gering, und die Ressourcenschonung so hoch wie möglich ist. Das ist grundsätzlich vor allem dann der Fall, wenn eine Ganzpflanzennutzung vorliegt, also möglichst alle Bestandteile des Feedstocks umgewandelt und genutzt werden. Im Unterschied zu zuvor öffentlich geführten Diskussionen aus den letzten Jahren sei hier festgehalten, dass eben nicht notwendigerweise alle Pflanzenteile der energetischen Nutzung zugeführt werden müssen. So handelt es sich bei der Bioraffinerie Typ II (RME mit Tierfutterbereitstellung) ebenfalls weitgehend um eine Ganzpflanzennutzung – die aber durch z.B. die Umwandlung des Rapsstrohs noch weiter optimiert werden sollte.

Es muss zudem vorausgesetzt werden, dass die gekoppelte Erzeugung in dem Sinne erfolgreich ist, als dass tatsächlich in einem Prozess mehrere Produkte entstehen, die marktfähig sind und die Aufwendungen (energetisch und finanziell) rechtfertigen. Wäre das nicht der Fall, müsste sich die Bereitstellung sinnvollerweise (zumindest ökonomisch) auf jeweils ein Produkt fokussieren; eine Kopplung, wie sie durch das Konzept der Bioraffinerie stattfindet, wäre dann nicht zu rechtfertigen.

6.1 *Lessons learned* – Erfolgsfaktoren für Bioraffinerien

Aus den Untersuchungen im vorgestellten Projekt und insbesondere aus dem engen thematischen Austausch mit den Teilnehmern der drei Stakeholder-Workshops lassen sich drei große Blöcke an Faktoren ableiten, die für den Erfolg von Bioraffinerien wesentlich mitbestimmend sind, unter der Voraussetzung, dass die technischen Aspekte weitgehend gelöst sind (siehe dazu den folgenden Abschnitt 6.2).

Bei diesen drei Erfolgsfaktoren handelt es sich um die Verfügbarkeit der Biomasse, die Wahl des geeigneten Standortes und die Vermarktbarkeit aller erzeugten Produkte.

6.1.1 Verfügbarkeit der Biomasse-Feedstocks

Die im Folgenden vorgestellten Überlegungen zur Biomasseverfügbarkeit sind kein Alleinstellungsmerkmal von Bioraffinerien, sondern im Gegenteil für alle Biomasse-Technologien und –Nutzungen relevant. Sie gelten aber gerade daher ebenso für die hier vorgestellten Konzepte zur gekoppelten Nutzung von Biomasse.

Grundlegend muss geprüft werden, ob ausreichende Mengen an Biomasse zu geeigneten Qualitäten und tragbaren Preisen bereit stehen – und das auch im langfristigen Ausblick, damit der Betrieb der jeweiligen Anlage während ihrer gesamten Lebensdauer garantiert werden kann. Um den Erfolg einer Bioraffinerie auch und gerade im Sinne einer nachhaltigen Bereitstellung von Produkten zu sichern, sollte es sich bei allen Feedstocks um nachhaltig produzierte und zertifizierte Biomasse handeln.

Eine nachhaltige Nutzung ist insbesondere dann gewährleistet, wenn als Feedstock Abfall- oder Reststoffe eingesetzt werden, sowie bei Einsatz der sogenannten 2.Generation-Energiepflanzen, also nicht-Nahrungsmittel-Pflanzen, die aufgrund geringer Stoffinputs und vergleichsweise hohen Erträgen auf sonst wenig produktiven Flächen eine höhere Nutzungseffizienz und dadurch impliziert auch eine höhere Flächeneffizienz mit sich bringen (CE/OEKO 2010; IEA 2011; ÖKO/IFEU 2010).

Im engen Zusammenspiel mit dem nächsten Faktor, nämlich der Wahl des geeigneten Anlagenstandortes, ist auch von Seiten der Biomasse-Verfügbarkeit eine Integration in bestehende Infrastruktur wenn möglich zu gewährleisten. Logistikströme sind insoweit zu optimieren, dass etwa wenig transportwürdige Biomasse mit einem hohen Feuchtanteil nur über geringe Strecken bis zur Anlage gebracht werden müssen. Unter diesem Gesichtspunkt sind die verschiedenen Anlagenkonzepte und –Größen zu berücksichtigen: während Anlagen etwa nach dem Verfahren V eher dezentral geplant werden sollten, kann Holz als Rohstoff für Bioraffinerietyp III auch über weitere Strecken transportiert werden.

6.1.2 Wahl des geeigneten Standortes

Wie im vorigen Abschnitt dargestellt, ist die Wahl eines geeigneten Standortes von den jeweiligen Anforderungen der unterschiedlichen Konzepte abhängig. Insbesondere zwei Aspekte an Rahmenbedingungen sind zu berücksichtigen: die Verfügbarkeit des Feedstocks, verbunden mit logistischen Fragen, und die Nutzung bestehender Infrastrukturleistungen durch Integration in bestehende (Chemie-/ Industrie-)Standorte.

Abhängig von der Technologie ist es ggf. unter anderem aus wirtschaftlichen Gründen ratsam, großmaßstäbliche Anlagen zu betreiben. Das ist z.B. bei der Vergasung (Bioraffinerie-Typ 3) der Fall. Entsprechend muss eine große Menge an Biomasse zur Anlage transportiert werden. Das kann dann auch über weite Strecken geschehen, wenn die Energiedichte ausreichend hoch ist (z.B. bei Holz, siehe vorigen Abschnitt). Es sind aber außerdem die geeigneten Infrastrukturen (Hafenanbindung etc.) zu berücksichtigen, was für die Wahl des Standortes stark mitbestimmend ist.

Die Anbindung an bestehende Anlagen oder Industrieparks kann Vorteile in Bezug auf das Wärmekonzept (Nutzung von Industrieabwärme oder im Gegenzug Wärme-Abnehmer), benötigte Betriebs- oder Hilfsmittel (etwa Wasserstoff) sowie Infrastruktur (Straßen- oder Schienennetz, Betriebsgebäude, Personal, etc.) mit sich bringen, also im weitesten Sinne Serviceleistungen, die gerade von kleineren Bioraffinerien nicht selbstständig erbracht werden können.

Beide genannten Aspekte werden stark von der Größe der Anlagen bestimmt, die wiederum nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Verfahrens-Charakteristika bewertet werden kann. Bioraffinerien generell großmaßstäblicher auszulegen, ist damit sowohl Chance als auch Hemmnis: die Wirtschaftlichkeit gerade von technisch aufwändigeren Verfahren profitiert sicherlich von steigender *economy of scale* (siehe oben). Dann sind aber auch Standorte wie Rotterdam notwendig, wo Biomasse in ausreichenden Mengen angeliefert werden kann. Dies gilt zumindest solange, bis eventuelle andere Wege wie eine vorzeitige Konditionierung der Biomasse und einer zentrale Sekundärraffination erschlossen werden. Als Gegenbeispiel dient die „Grüne Bioraffinerie“ (Typ V): hier treten Effekte nach *economy of scale* nur noch auf Feedstock-Ebene ein, das technische Optimierungspotenzial ist davon unabhängig.

Diese Anlagen, die mit eher feuchten Biomassen oder solchen mit geringerer Energiedichte wie etwa Stroh arbeiten, sind durch ihren Feedstock in ihrer Größe maßgeblich begrenzt, da dieser wenig transportwürdig ist und aus der näheren Umgebung bezogen werden muss. Damit ist der Zugang zu regional verfügbaren Rohstoffen insbesondere für kleinere Bioraffinerien vom Typ 5 (Biogas) entscheidend für den wirtschaftlichen Betrieb.

Weitere Aspekte, die zu beachten sind, betreffen die Kosten der Biomassebereitstellung und Probleme der Saisonalität und Lagerung.

Generell ist die Bereitstellung sehr großer Mengen an Biomasse für eine großmaßstäbliche Anlage immer kritisch zu betrachten, bzw. die Nachhaltigkeit der Bereitstellung und die Gewährleistung von regionaler / dezentraler Wertschöpfung sind genau zu prüfen.

6.1.3 Marktfähigkeit aller Produkte

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass Bioraffinerien vor allem dann wirtschaftlich betrieben werden können, wenn nicht nur das Hauptprodukt, sondern im Gegenteil alle Erzeugnisse des Verfahrens am Markt abgesetzt werden. Als wesentlicher Erfolgsfaktor ist zu nennen, dass Wertschöpfung zusätzlich zum (energetischen) Hauptprodukt durch die gekoppelte Erzeugung mehrerer Produkte generiert werden sollte.

Die Betrachtung der verschiedenen Märkte ist daher von Bedeutung. Strom als energetisches Produkt wird in aller Regel nach EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) abgesetzt und

vergütet. Es handelt sich hier um einen geschützten, subventionierten Markt, der den Produzenten jederzeit zugänglich ist. Schon bei den anderen beiden möglichen energetischen Produkten Wärme und Kraftstoff wird die Lage für den Anlagenbetreiber schwieriger: einen Wärmeabnehmer zu finden, ist oftmals vom Standort abhängig (siehe oben). Nicht an jedem Ort sind geeignete Wärmesenken zu finden, die also zuverlässig und ganzjährig Wärme abnehmen und entsprechend vergüten.

Dieser Aspekte ist insbesondere für kleinere Bioraffinerien vom Typ 5 (Biogas) letztlich mit entscheidend für den wirtschaftlichen Betrieb. Eine sinnvolle Wärmenutzung, die also fossil erzeugte Wärme ersetzt, ist zudem mit maßgeblich für eine positive Ökobilanz.

Die Vermarktung von Biokraftstoffen ist in den letzten Jahren in Deutschland zunehmend schwieriger geworden. Aus steuerlichen Gründen ist der Markt für Reinkraftstoffe geschrumpft; die Beimischung zu fossilen Kraftstoffen ist aber für Betreiber kleinerer Anlagen meist nicht realistisch. Seit dem Juni 2010 müssen alle Biokraftstoffe zudem zertifiziert sein und bestimmte Anforderungen an die Nachhaltigkeit der Biomasse-Produktion erfüllen. Auch aus diesen Gründen wird angenommen, dass die Biokraftstoffe der so genannten ersten Generation, also Biodiesel (RME) und Ethanol auf Basis von Zucker und Stärke, wie sie den hier dargestellten Bioraffinerie-Typen I und II entsprechen, nach 2030 nicht mehr in Deutschland produziert werden.

Die Märkte für die verschiedenen stofflichen Produkte der Bioraffinerien sind noch inhomogener und können kaum zusammenfassend beschrieben werden. Da es derzeit keine politischen Zielvorgaben für biogen-basierte stoffliche Produkte gibt, handelt es sich bei den Märkten um offene, ungeschützte Systeme, die vor allem durch den Preis bestimmt werden. Zusätzliche Erlöse für biogene Produkte können in der Regel nicht erzielt werden. Für den Anlagenbetreiber ist zudem wichtig zu wissen, ob sich sein Produkt in einem eher wachsenden oder schrumpfenden Markt befindet, da er über eine entsprechend lange Lebensdauer seiner Anlage kalkulieren muss. Zudem muss gerade beim Ausbau der Anlage und Kapazitätserhöhung abgeschätzt werden, ob und wie die steigenden Produktmengen weiterhin zu entsprechenden Erlösen abgesetzt werden können.

Mittelfristig stellt sich die Aufgabe, mit den biogenen Produkten auch neue Märkte zu erschließen, indem etwa neue Materialien mit spezifischen Eigenschaften geschaffen werden. Beispiele hierfür wären die Nutzung von Nawaro mit funktionalen Nanooberflächen oder die Verwendung von Lignin als Füllstoff²³ oder Faseranwendung. Lignin kann außerdem energetisch verwendet werden, im Gespräch ist z.B. die Umwandlung zu Synthesegas und die Weiterverarbeitung zu diversen Produkten. Problematisch in dem Zusammenhang ist wahrscheinlich, Lignin in ausreichend großen Mengen und Qualitäten für die chemische Industrie zu liefern. Der wirtschaftliche Effekt durch die Vermarktung der stofflichen Produkte ist in aber umso größer, je mehr es gelingt, Substitute zu höherwertigen Materialien zu produzieren, als „nur“ Energie bereitzustellen.

Gerade für die Bereitstellung neuer und höherwertiger Materialien und Produkte ist die technische Optimierung des gesamten Prozesses eine wesentliche Voraussetzung. Die ver-

²³ siehe z.B. Anwendung bei Tecnar (www.tecnaro.de; letzter Zugriff am 22. Juni 2011)

schiedenen Herausforderungen und Optimierungspotenziale der einzelnen Anlagentypen werden im Folgenden dargestellt.

6.2 Technischer Optimierungsbedarf

Die fünf generisch betrachteten Bioraffinerien befinden sich, wie in Kapitel 3.2 dargestellt, in unterschiedlichen Phasen der Entwicklung bzw. Kommerzialisierung: während die Verfahren der Typen I, II und V derzeit bereits voll einsatzfähig und marktverfügbar sind, handelt es sich bei den Typen III und IV um Konzepte, die noch nicht kommerziell entwickelt sind. Der technische Optimierungsbedarf, der sich daraus ableitet, wird daher im Folgenden in zwei verschiedenen Stadien beschrieben: zum einen die Optimierung bereits angewandter Prozesse, sowie die Entwicklung von marktreifen Verfahren.

6.2.1 Optimierung bestehender Prozesse

Auch bei technischen Prozessen, die bereits langjährig und erfolgreich betrieben werden, gibt es in aller Regel noch Optimierungspotenzial (beschrieben durch einen vergleichsweise kleinen Lernfaktor, vergleiche Abschnitt 5). Die entsprechenden Stellschrauben der drei entsprechenden Bioraffinerien sind im Folgenden kurz dargestellt. Dabei handelt es sich aber im Gegensatz zu den weiter unten beschriebenen technischen Herausforderungen der anderen beiden Bioraffinerietypen nicht um Aspekte, die für einen erfolgreichen Betrieb der Anlagen noch wesentlich zu lösen gilt.

Bioraffinerie Typ I Ethanol

Neben dem in Abschnitt 3.2.1 dargestellten Typ wird in der Literatur diskutiert, die Zucker im DDGS weiter zu Ethanol zu fermentieren, was eine Steigerung der Ethanolausbeuten um 14 % ermöglichen würde. Das zurückbleibende DDGS hätte in diesem Fall einen um 30-40 % größeren Proteingehalt (Kim, Mosier et al. 2008). Weitere Energieeinsparpotenziale ergeben sich für den Fall, dass die Schlempe nicht getrocknet werden muss (ca. 35 % des gesamten Energiebedarfes), sondern bei einem nahegelegenen Bauern verfüttert werden kann (Murphy and Power 2008). Zu beachten ist aber, dass hierfür ein Betrieb mit 10.000 Rindern nötig wäre. Ferner besteht die Möglichkeit eine angehängte Synthese von Ethanol zu n-Butanol durchzuführen, wobei Ausbeuten bis zu 20 % möglich sind (Tsuchida, Sakuma et al. 2006).

Bioraffinerie Typ II RME

Der Prozess der Biodieselherstellung ist seit langem bekannt. Die einzelnen Prozessschritte der Ölgewinnung, Raffination, Umesterung und Reinigung des entstehenden Rohglyzerins sind technisch weitgehend ausgereift. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Abschnitt 9.1.2.

Bioraffinerie Typ V Biogas

Grundsätzlich werden in grünen Bioraffinerien zwei Ansätze verfolgt: Der eine beschäftigt sich mit der Gewinnung der Pflanzenfasern und der anschließenden weiteren Verarbeitung zu stofflichen Produkten wie Dämmstoffen und faserverstärkte Kunststoffe, während die andere vorwiegend durch Pressen des Grases Presssaft gewinnt, um daraus Wertstoffe wie Aminosäuren und Milchsäure zu extrahieren, wobei der dabei entstandene Filterkuchen unter Anderem für die Biogasherstellung mittels Fermentation genutzt wird.

In der Biogastechnik sind vor allem Optimierungspotenziale in der Sensor- und Rührtechnik zu sehen.

6.2.2 Technische Weiterentwicklung

Die beiden Verfahren III und IV sind derzeit als Demonstrationsanlagen realisiert. In beiden Fällen steht aber die Machbarkeitsprüfung noch aus, da wesentliche technische Herausforderungen noch gemeistert werden müssen. Zudem ist die Wirtschaftlichkeit der Verfahren noch nicht abschließend geklärt. Im Gegensatz zum vorigen Abschnitt ist es daher durchaus denkbar, dass der „Erfolg“ der Verfahren sich nicht einstellt und die gekoppelte Erzeugung mehrerer Produkte auf diesem Wege nicht weiterverfolgt wird.

Bioraffinerie Typ III BTL

Die größte Herausforderung bei Verfahren III liegt in der Herstellung eines adäquaten Synthesegases. Dieses muss bestimmte technische Anforderungen bzw. Anforderungen an die Gasbeschaffenheit erfüllen, um für die nachfolgende Fischer-Tropsch-Synthese geeignet zu sein. In diesem Zusammenhang ist auch die CO / H₂- Shift-Reaktion zu nennen, die das erforderliche Verhältnis der beiden Komponenten als Eingangsgröße in die Synthese einstellt.

Bioraffinerie Typ IV Ethanol auf Basis Ligno-Zellulose

Die Drei-Plattform (C5-, C6-Zucker und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh befindet sich gegenwärtig noch in der Entwicklung. Bis dato sind zwei Demonstrationsanlagen in Betrieb. Als technische Herausforderungen ist hier zunächst die Bereitstellung der Enzyme für die Vorbehandlung des Rohstoffs Stroh zu nennen. Theoretisch können biologische, physikalische, chemische und physio-chemische Verfahren verwendet werden, wobei die chemischen und thermo-chemischen Verfahren gegenwärtig am effektivsten und am für industrielle Anwendungen am besten geeignet erscheinen (Alvira, Tomás-Pejó et al. 2010). Besonders vielversprechend ist das Dampfexplosionsverfahren mit verdünnter Säure, welches im Pilotmaßstab im NILE Projekt verwendet wurde und das Ammonia-Fiber-Explosion Verfahren (AFEX-Verfahren). Die hohen Kosten und Dosen der Enzyme werden als Hemmschuh für die Kommerzialisierung der Lignozellulose Ethanol Industrie gesehen (Himmel 2007). Andererseits können durch die betriebseigene Herstellung von Enzymen die Kosten deutlich gesenkt werden. Ein weiterer Aspekt, der technisch gelöst werden muss, ist die Abtrennung des Lignin aus dem Feedstock sowie dessen weitere Verwendung.

7 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Über die technischen Herausforderungen der beschriebenen Bioraffinerie-Typen heraus stellen sich weitere Fragen, die zum einen die Entwicklung der Verfahren sowie der entsprechenden Produkte und zum anderen die politische Dimension betreffen.

Im Folgenden wird ein kurzer Abriss über die mittel- bis langfristigen Aufgaben und Ziele im Bereich Bioraffinerien gegeben.

7.1 Anlagenkonfiguration und Produkteigenschaften

Für die künftige Entwicklung des eher modularen Bioraffinerietyps IV ist es wichtig, an bestehende, eher konventionelle Systeme (Typ I) „angeschlossen“ werden zu können, da diese Integration eine „Starthilfe“ darstellt und Risiken etwa der Standorteignung, Infrastrukturanbindung und der Kapitalbeschaffung sowie Absatzmärkte reduziert. Für die deutlich größeren Anlagen des Bioraffinerietyps III ist dagegen die Logistik-Infrastruktur wesentlicher, wenngleich auch die „nahe“ Weiterverarbeitung des stofflichen Lignin-Koppelprodukts Vorteile böte. Der sehr dezentrale Bioraffinerietyp V dagegen muss sich weitgehend an verfügbaren Rohstoffpotenzialen orientieren und ist daher weniger infrastrukturell geprägt. Für alle Typen, insbesondere aber für Typen III und IV, besteht Bedarf an industrienaher, anwendungsbezogener Forschung (z.B. Demonstrationsanlagen) unter Einbeziehung der Produktqualität und dahingehenden Integrationschancen.

Eine weiterführende Forschungsfrage gilt zudem den so genannten *high value* Produkten bzw. dem Produktdesign und dessen Bewertung. Nach einer Arbeitsthese des UBA-Vorhabens „Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse“²⁴ sind stoffliche biogene Produkte noch so neu und innovativ, dass ihre spezifischen Eigenschaften noch wenig bekannt sind. Im Kontext der hier nicht weiter untersuchten potenziellen Bandbreite geeigneter Feedstocks wird zudem die These vertreten, dass die organische Syntheseleistung von Pflanzen gezielter genutzt und die downstream-Prozesse entsprechend eher auf Separation hin orientiert werden könnten, um eine insgesamt höhere Effizienz zu erreichen – anstelle einer bio- oder thermochemischen Konversion würde nach dieser These die Bioraffinerie tendenziell „in die Pflanze“ zurückverlagert.

Es ist also wesentlich zu erforschen, wie die Charakteristika von Bioprodukten aussehen können, um im Vergleich mit den konventionellen Produkten einen tatsächlichen Mehrwert zu generieren (Stichwort Biodegradation²⁵), andererseits sind die Eigenschaften von poten-

²⁴ Das UBA-Vorhaben (FKZ 3710 93 109) wird von nova-Institut, Öko-Institut, IFEU und FiFo durchgeführt und wird Ende 2012 entsprechende Ergebnisse vorlegen.

²⁵ Vorteile versprechen biobasierte Produkte etwa im Bereich von Betriebsmitteln in der Landwirtschaft oder im Pflanzenbau (Abdeckplanen, Gewächshäuser etc.).

ziellen Feedstocks noch näher zu analysieren, um eine ggf. bessere Balance zwischen „natürlicher“ und „technischer“ Syntheseleistung zu erlauben.

7.2 Politische Zielsetzung

Wie bereits dargestellt, ist die politische Setzung von Zielen im Bereich der energetischen und stofflichen Nutzung von Biomasse stark unterschiedlich ausgeprägt. Während es sowohl auf deutscher als auch auf europäischer und internationaler Ebene klare Vorstellung und Mengenziele bezüglich der Bioenergie gibt, ist die stoffliche Verwendung weit weniger repräsentiert. Daher ist zu fragen, inwieweit vergleichbare Zielsetzungen – z.B. feste Mengenziele bzw. Quoten am Gesamtmarkt - politisch adäquat und welche Effekte davon zu erwarten wären.

Im Zusammenhang mit den aktuellen Diskussionen um die Verwendung ausschließlich nachhaltig produzierter Biomasse besteht Bedarf an begleitender Forschung und politischer Instrumentierung, wenn im Bereich der stofflichen Nutzung ebenfalls die Nachfrage stimuliert würde: dann gälte es so gut wie möglich sicherzustellen, dass keine Entwicklungen in Gang gesetzt werden, die negative Klima-, Umwelt- und Sozialfolgen bewirken könnten.

Ein anderes Mittel, die stoffliche bzw. gekoppelte Nutzung von Biomasse gegenüber der rein energetischen Nutzung zu stärken, kann über die Preisentwicklung erfolgen. Maßgebliche Faktoren für die Preisentwicklung biogener Produkte und Bioenergie sind zum einen der Ölpreis (als Maß für die Preise aller fossilen Energieträger), zum anderen zunehmend der Emissionshandel. In diesem sind bislang nur Energieerzeugungsanlagen und –prozesse erfasst, aber keine Produkte. Konkret bedeutet das, dass die Herstellung fossil basierter Produkte weder Einschränkungen durch Vorgaben zur Emissionsminderung unterliegen noch Preise für „embedded carbon“ angerechnet werden. Im Umkehrschluss kann durch die Bereitstellung biogener Produkte kein zusätzlicher Erlös erzielt werden, indem fossile Produkte ersetzt werden. Die gekoppelte Erzeugung von biogenen Materialien und Energie wird aus diesem Grund gegenüber der reinen Energieerzeugung schlechter gestellt; es wird ein Trend zur Mitverbrennung von Biomasse geschaffen, bei dem die vollen Vorteile der gekoppelten Verwendung nicht genutzt werden. Die Effekte werden mit vollständigem Inkrafttreten des Emissionshandels in 2013 für die Bioraffinerien spürbar werden.

Denkbare Lösungen sind, entweder den Emissionshandel auf stoffliche Produkte auszudehnen oder Gutschriften für biogene Produkte zu ermöglichen, die etwa in der Einpreisung von CO₂-Vermeidungen aus der stofflichen Produktion in den Emissionshandel bestehen.

7.3 Offene Fragen und Forschungsbedarf

Weiterer Forschungsbedarf besteht mittel- bis langfristig, wie gezeigt, zum einen in der technischen Weiterentwicklung der Verfahren und Prozesse in Richtung innovativer Produkte. Zum anderen sind politische Steuerinstrumente für die energetische und stoffliche bzw. gekoppelte Nutzung von Biomasse besser auszubalancieren.

Des Weiteren sind Fragen der Einbindung von Bioraffinerien in die Energie- und Industrielandschaft zu klären, insbesondere im Hinblick auf die Integration von Bioraffinerien in größere Industriestandorte sowie in die Infrastruktur.

Diese Debatte wird auf europäischer und internationaler Ebene geführt. Insgesamt ist eine Verschränkung auf EU Ebene durchaus sinnvoll, um Forschungsbudgets zu bündeln und Ergebnisse auszutauschen. In einzelnen Fällen, für z.B. großmaßstäbliche Verfahren wie etwa die Bioraffinerie vom Typ III (Vergasung und BTL-Prozess) ist zu diskutieren, ob eine nationale Teilstrategie bzw. Forschungsstrategie in Deutschland stattfinden sollte. Die Agrarforschung, insbesondere zur Bereitstellung der so genannten 2.Generation-Anbausysteme, sollte sich dagegen eher auf nationaler Ebene abspielen. Da in diesem Bereich, besonders für Energiegräser oder Kurzumtriebsplantagen mehrjährige Anbauversuche durchgeführt werden müssen, sollte die Forschung so bald wie möglich weiter intensiviert werden.

Ebenfalls auf nationaler Ebene, aber in allen Ländern, sollte an der konkreten Einbindung von Bioraffinerien in bestehende Strukturen und Szenarien gearbeitet werden. In Deutschland sind verschiedene Energieszenarien (wie etwa [BMU, 2010] vorhanden; es mangelt aber an einer entsprechenden Fortschreibung der stofflichen Referenzsysteme und dahingehender Szenarien. Diese sind für eine Planung bzw. Ausbaustrategie von biogenen Produkten und Materialien von wesentlicher Bedeutung, um die spezifischen Vor- und Nachteile dieser Produkte gegenüber der Referenzentwicklung messbar zu machen.

Zudem ist zu prüfen, ob alternative Feedstocks wie Mikroalgen als ein potenziell nachhaltiger Rohstoff in zukünftige Bioraffinerien eingesetzt werden können. In diesem Zusammenhang wäre zu prüfen, welche technologischen Konzeptionen hierfür in Frage kämen und mit welchen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt hierbei zu rechnen wäre. Zudem wäre zu prüfen, welchen Beitrag solche Bioraffinerien zu den politischen Zielen insbesondere im Bereich des Klimaschutzes leisten könnten.

Ein weiterer offener Punkt ist in der zukünftigen Nutzung von Grünland für den Anbau bzw. die Ernte von biogenen Rohstoffen zu sehen. Der Bioraffinerie-Typ V setzt Grünschnitt als Rohstoff ein und kann damit ohne nennenswerte LUC-Effekte auf bestehende Nutzungssysteme zurückgreifen bzw. künftig im Rahmen der Agrarentwicklung (Rückgang der Flächen für Milchwirtschaft und Rindfleisch) „freiwerdendes“ Grünland ohne nennenswerte Anpassung direkt weiternutzen. Demgegenüber wäre der Anbau von KUP als Rohstoff für den Bioraffinerie-Typ IIIb ggf. mit direkten LUC-Effekten verbunden und könnte auch – je nach Gestaltung positive wie negative - Auswirkungen auf die Artenvielfalt zeigen²⁶.

Hier ist zu prüfen, welche Nutzungsformen – bzw. Anteile im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung, vor allem unter dem Aspekt der Erhaltung der Biodiversität²⁷, wünschenswert sein könnten.

²⁶ siehe Diskussionspapier zur Frage der Rolle von KUP bei der künftigen Nutzung von Intensiv-Grünland (Stein 2010) sowie die aktuelle Diskussion in Jessel (2011) und Rowe (2011).

²⁷ Zur Definition von biodiversitätsrelevantem Grünland siehe Hennenberg, Fritsche, Herrera (2010).

8. Literaturverzeichnis

- Aden, A., J. Bozell, et al. *Top Value Added Chemicals from Biomass Volume I—Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas*. Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) and the National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2004.
- Arnold, K., et al. Einführung synthetischer Kraftstoffe in NRW am Beispiel GTL - Anwendungspotenziale, ökologische, energiewirtschaftliche und industriepolitische Implikationen, Entwicklungsstufen und resultierende Chancen. 2008.
- Bacovsky, D., M. Dallos, et al. Status of 2nd Generation Biofuels Demonstration Facilities. IEA Bioenergy Task 39, 2010.
- BGBI. „Gasnetzzugangsverordnung vom 3. September 2010.“ 2010. http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/gasnzv_2010/gesamt.pdf (Zugriff am 22. 06 2011).
- Bozell, J., und G. Petersen. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates-the US Department of Energy's "Top 10" revisited." *Green Chemistry* 12(4). 2010.
- Cherubini, F., Jungmeier G., et al. Toward a common classification approach for biorefinery systems. . John Wiley & Sons, Ltd. 3, 2009.
- Chisti, Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology* 26, 2008: 126-131.
- CHOREN Industries GmbH. Persönliche Mitteilung . Freiberg, 2010.
- Consultic. Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland. 2009. <http://www.plasticseurope.de/Document/studie-zu-produktion-verbrauch-und-verwertung-von-kunststoffen-in-deutschland-2009---kurzfassung.aspx>.
- Dale, B., und Kim, S. Biomass Refining Global Impact - The Biobased economy of the 21st Century. 2010.
- Das, D., und T. Veziroglu. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *International Journal of Hydrogen Energy* 26, Nr. 1 (2001): 13-28.
- DBFZ (Deutsches BiomasseForschungsZentrum). Methoden zur stoffstromorientierten Beurteilung für Vorhaben im Rahmen des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“. Aktualisierter Arbeitsentwurf Stand Dezember 2010. Leipzig , 2010.

- de Jong, E., et al. Langeveld H. Classification of biorefinery concepts. IEA Bioenergy Task 42 Biorefinery, 2007.
- Deutscher Verband Tiernahrung e.V. Futtermittelbranche folgt allgemeiner Agrarpreisentwicklung. Deutscher Verband Tiernahrung e.V. 2009
[http://www.dvtiernahrung.de/30.html?&tx_ttnews\[backPid\]=27&tx_ttnews\[pointer\]=6&tx_ttnews\[t_news\]=911&cHash=970b1f19ae](http://www.dvtiernahrung.de/30.html?&tx_ttnews[backPid]=27&tx_ttnews[pointer]=6&tx_ttnews[t_news]=911&cHash=970b1f19ae).
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) . Kenndaten von Strom- und Wärmesystemen in der BMU-Leitstudie; interne Datenübermittlung der DLR an das Öko-Institut. Stuttgart , 2010.
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)/IfnE (Ingenieurbüro für neue Energien). Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland - Leitszenario 2009. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit , Stuttgart/Teltow, 2009.
- ÖKO (Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V.) Der nichterneuerbare Primärenergieverbrauch des nationalen Strommix in Deutschland im Jahr 2010. Kurzstudie für den Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V. und Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendungen e.V. (HEA). Darmstadt , 2011a.
- EC (European Commission). Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.“ Official Journal of the EU, 5. 6. 2009. 16-62.
- Ehrich, K., Michels J., et al. Pilotprojekt "Lignocellulose-Bioraffinerie" Gemeinsamer Schlussbericht zu den wissenschaftlich-technischen Ergebnissen aller Teilvorhaben. DECHEMA. Frankfurt am Main, 2009.
- EU. Deliverable 3.5 European Biorefinery 2030 Vision Document. B Association Industries et Agro-Ressources (IAR). Brüssel, 2011.
- Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme. Statistik Wärmedämm-Verbundsysteme. 2009.
- FNR. Biogas - Basisdaten Deutschland. 2010.
- Fritsche, U., Sims R., et al. Direct and indirect land-use competition issues for energy crops and their sustainable production – an overview in: „Biofuels, Bioproducts and Biorefineries“. Bd. 4. 2010.
- Fritsche, U., und K. Wiegmann. Treibhausgasbilanzen und kumulierter Primärenergieverbrauch von Bioenergie-Konversionspfaden unter Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen. Expertise zum WBGU-Gutachten. Berlin, 2008.

- Fritsche, U., und K. Wiegmann. Indirect Land Use Change and Biofuels. Study of Oeko-Institut prepared for the European Parliament's Committee on Environment, Public Health and Food Safety. IP/A/ENVI/ST/2010-15. Brussels, 2011.
- Gnansounou, E., und Dauriat A. Techno-economic analysis of lignocellulosic ethanol: A review. „Bioresource Technology“ 101, Nr. 13 (2010): 4980-4991.
- Heiskanen, E., Brohmann B., et al. Policies to promote sustainable consumption: framework for a future-oriented evaluation. Progress in Industrial Ecology 6, Nr. 4 (2009): 387 - 403.
- Hennenberg, K., Fritsche U., et al. Zur Definition von Grünland mit großer biologischer Vielfalt; Arbeitspapier des Öko-Instituts im Rahmen des BMU-geförderten Vorhabens "Naturschutzstandards Erneuerbarer Energien". Darmstadt, 2010.
- IEA (International Energy Agency). Technology Roadmap - Biofuels for Transport. 2011. http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2389.
- ifo (Institut für Wirtschaftsforschung München). Gesamtwirtschaftliche Effekte der Förderung von Biodiesel. München, 2009.
- IPCC. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Bern/Wien/Berlin, 2007.
- Jessel, B. Erfordernisse für eine naturverträgliche Landwirtschaft in Deutschland – Sicht des BfN. 12. 1 2011. http://www.ecologic-events.eu/Agrarpolitik2013/documents/Jessel_Erfordernisse_fuer_eine_naturvertraegliche_Landwirtschaft.pdf.
- Kamm, B., Gruber P., et al. Biorefineries - Industrial Processes and Products. Status Quo and Future Directions. Weinheim: WILEY-VCH Verlag.
- Kamm, B., Schönicke P., et al. Biorefining of Green Biomass – Technical and Energetic Considerations. WILEY-VCH Verlag, 2009.
- Kampman, B., Fritsche, U., et al. BUBE: Better Use of Biomass for Energy; Background Report to the Position Paper of IEA RETD and IEA Bioenergy. CE (CE Delft)/OEKO (Oeko-Institut - Institute for applied ecology), 2010.
- Mata, T., Martins, A., et al. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, Nr. 1 (2010): 217-232.
- Michels, J., und Wagemann K. The German Lignocellulose Feedstock Biorefinery Project. Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofr 4, Nr. 3: 263-267.

- Mineraölwirtschaftsverband. MWV-Prognose 2025 für die Bundesrepublik Deutschland . 2006.
- Mussnug, J., Klassen, V., et al. Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept. *Journal of Biotechnology* 150, Nr. 1 (2010): 51-56.
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.)/DLR-IVF (Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt). RENEWABILITY - Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030; Endbericht an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin, 2009.
- ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.)/IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung). Nachhaltige Bioenergie: Zusammenfassender Endbericht zum Vorhaben "Entwicklung von Strategien und Nachhaltigkeitsstandards zur Zertifizierung von Biomasse für den internationalen Handel von Biomasse für den internationalen Handel" <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3960.pdf> . 2010.
- ÖKO (Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V.). Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.6. 2010.
- ÖKO (Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V.). Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.7. 2011b.
- Peters, D. The Germany Biorefinery Roadmap. Budapest, 13. 4 2011.
- Prognos (Prognos AG)/ÖKO (Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.). Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Studie für WWF . Berlin, 2009.
- Rowe, R., et al. Potential benefits of commercial willow Short Rotation Coppice (SRC) for farm-scale plant and invertebrate communities in the agri-environment. *Biomass and Bioenergy* 35, Nr. 1 (2011): 325-336.
- Schenk, P., Thomas-Hall S., et al. Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *Bioenergy Research* 1, Nr. 1 (2008): 20-43.
- Schmitz, N., Henke J., et al. Biokraftstoffe: Eine vergleichende Analyse. Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Gülzow, 2009.
- Stein, S. Kurzumtriebsplantagen auf intensiv genutztem Grünland? Diskussionspapier im Auftrag des Öko-Instituts, erstellt im Rahmen des BMU-geförderten Vorhabens "Naturschutzstandards Erneuerbarer Energien." Bonn/Darmstadt, 2010.

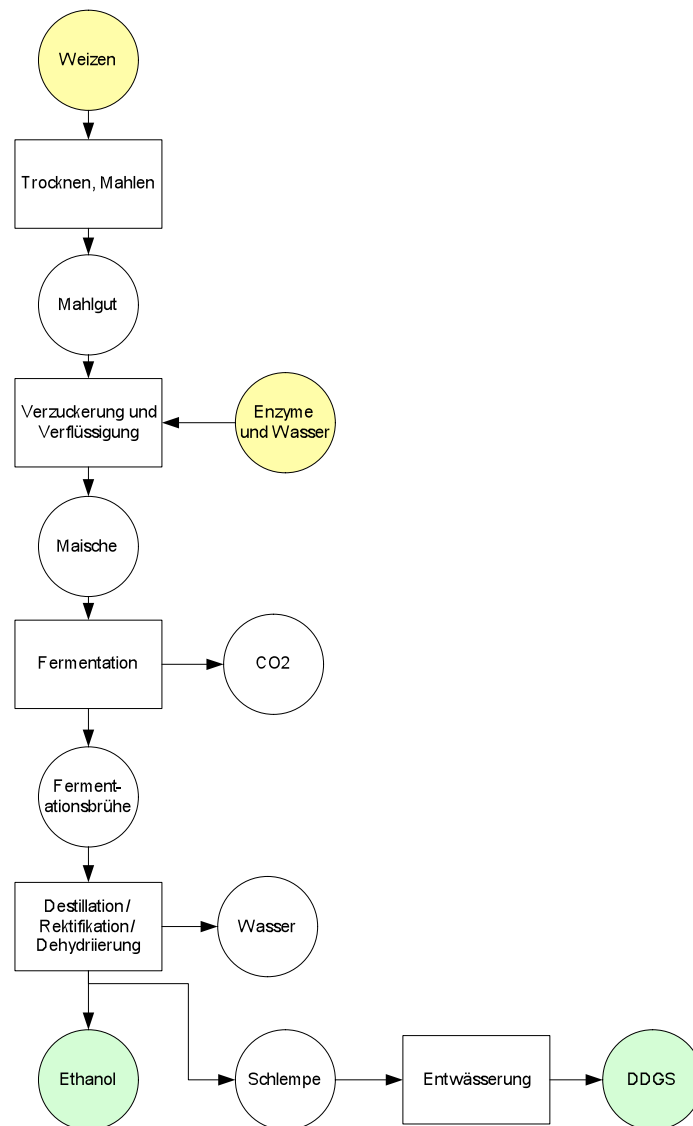
- Thrän, D., Fischer E., et al. Methodenhandbuch: Methoden zur stoffstromorientierten Beurteilung für Vorhaben im Rahmen des BMU-Förderprogramms "Energetische Biomassenutzung". DBFZ. Leipzig, 2010.
- UFOP. Biodiesel und pflanzliche Öle als Kraftstoffe – aus der Nische in den Kraftstoffmarkt. Stand und Entwicklungsperspektiven. 2009.
- VDI 6310. Gütekriterien von Bioraffinerien. 2011.
- Willke, Peters, und Jungmeier. Persönliche Mitteilung. 2010.
- Wissenschaftlicher Beirat. Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, L. u. V. Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik. Berlin, 2007.

9 Anhang

9.1 Beschreibung der Bioraffinerie-Techniken

9.1.1 Typ I: Ein-Plattform (C6-Zucker) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier-Futter aus stärkehaltigem Getreide

Eine etwas detailliertere Darstellung der Prozesse zeigt Abbildung 9-1



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 9-1: Prozessschema einer Ein-Plattform (C6-Zucker) Bioraffinerie für Bioethanol und Tier-Futter aus stärkehaltigem Getreide

Der Weizen wird in einem ersten Schritt gemahlen, so dass der Stärkeanteil aus dem Zellverband möglichst vollständig freigesetzt wird (Kaltschmitt, Harmann et al. 2009). In einem

zweiten Schritt wird die Stärke durch Zugabe von Wasser und Enzymen verflüssigt. Bei einer Temperatur von 55 °C und eingestelltem pH-Wert von 5,4 werden der Maische Verzuckerungsenzyme hinzugegeben. Nach Abkühlung der Maische auf ca. 35 °C werden im Fermenter Hefen hinzugeben, so dass der Zucker unter Sauerstoffausschluss zu Alkoholen fermentiert. Nach der möglichst vollständigen Fermentation der Zucker zu Ethanol, wird der Alkohol aus dem Gärrestsubstrat abgetrennt und anschließend in Reinform aufkonzentriert. Dies geschieht üblicherweise zunächst mit Hilfe von Destillationskolonnen, so dass ein Alkoholgehalt von ca. 55 Vol.-% erreicht wird. Die sich anschließende Rektifikation dient der Aufkonzentrierung bis zu ca. 99.7 Vol-% und Feinreinigung des Ethanols. Die zurückbleibende Schlempe kann entweder direkt verfüttert werden oder wie hier dargestellt entwässert und zu DDGS pelletiert werden.

Neben dem hier dargestellten Typ wird in der Literatur diskutiert, die Zucker im DDGS weiter zu Ethanol zu fermentieren, was eine Steigerung der Ethanolausbeuten um 14 % ermöglichen würde. Das zurückbleibende DDGS hätte in diesem Fall einen um 30-40 % größeren Proteingehalt (Kim, Mosier et al. 2008). Weitere Energieeinsparpotenziale ergeben sich für den Fall, dass die Schlempe nicht getrocknet werden muss (ca. 35 % des gesamten Energiebedarfes), sondern bei einem nahegelegenen Bauern verfüttert werden kann (Murphy and Power 2008). Zu beachten ist aber, dass hierfür ein Betrieb mit 10.000 Rindern nötig wäre. Ferner besteht die Möglichkeit eine angehängte Synthese von Ethanol zu n-Butanol durchzuführen, wobei Ausbeuten bis zu 20 % möglich sind (Tsuchida, Sakuma et al. 2006).

9.1.2 Typ II: Ein-Plattform (Öl) Bioraffinerie für Biodiesel, Tierfutter und Glycerin aus ölhaltigen Pflanzensamen

Die Biodieselherstellung ist gekennzeichnet durch folgende Prozessschritte:

- Biomasseanbau, Ernten und Lagerung
- Ölgewinnung
- Raffination
- Umesterung
- Aufreinigung des Rohglycerin

Biomasseanbau, Ernten und Lagerung

Bei der Lagerung von Ölsaaten ist insbesondere der Feuchtegehalt der Saat zu beachten, da Enzyme, Hefen oder Pilze bereits bei der Lagerung der Saat Fette und Kohlenhydrate abbauen können (Kaltschmitt, Harmann et al. 2009). Für die Lagerung der Saat werden 7-8 Gew.-% Wassergehalt empfohlen (Kollmann 1991).

Ölgewinnung

Die Rapssaat wird vorab mit Hilfe von Riffel- bzw. für die Feinzerkleinerung mit Glattwalzen zerkleinert. Anschließend erfolgt eine Konditionierung des Mahlguts auf ein Wassergehalt zwischen 4-6 % und Temperaturen größer 80 °C. Die Ölgewinnung erfolgt meistens durch Pressen der Ölsaaten und anschließender Extraktion der im Rapskuchen verbleibende Ölbe-

standteile mittels Hexan. Die Ölausbeute eines solchen Verfahrens liegt bei 98 % (Kaltschmitt, Harmann et al. 2009). Das Hexan muss anschließend wieder vom Öl z. B. durch eine Destillation abgetrennt werden. Auch dem Schrot muss durch Austreiben mit Wasserdampf das Lösungsmittel entzogen werden, damit es als Tierfutter eingesetzt werden kann. In der VDI Richtlinie 2592 ist der Grenzwert 500 ppm angegeben (VDI 2010), der in der Regel aber unterschritten wird.

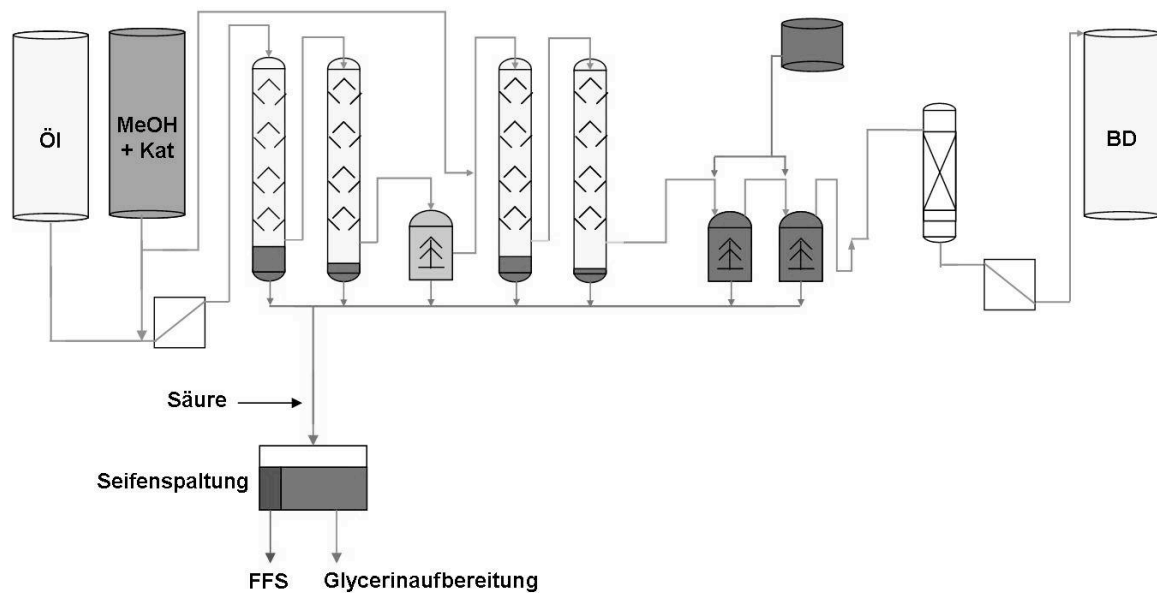
Raffination

Die Raffination des Öls dient der Abtrennung der ungewünschten Begleitstoffe wie z. B. freie Fettsäuren, Aldehyde, Ketone, Phospholipide und Pestizide vom Öl. Die Raffination enthält für gewöhnlich eine Entschleimung und Neutralisation (Entsäuerung) des Rapsöls. Zusätzlich können je nach Anforderung auch eine Bleichung und Desodorierung Bestandteil der Raffination sein. Die Entschleimung dient der Abtrennung der Phospholipide, Glycolipide, von freien Zuckern sowie von Metallionen. Üblich ist eine Vorentschleimung mit Wasser, in der die hydratisierbaren Bestandteile weitgehend entfernt werden. Mit Hilfe einer Säureentschleimung mit Zitronensäure oder Phosphorsäure, die die Phospholipide hydratisiert und einer anschließenden Neutralisierung mit Natronlauge, können die Phosphate weitgehend entfernt werden. Die Neutralisation (Entsäuerung) dient der Abtrennung von freien Fettsäuren. Dazu wird ebenfalls Natronlauge verwendet. Bei der Bleichung werden Farbstoffe und Reste von Schleimstoffen, Seifen, Spurenmetallen und Oxidationsprodukte entfernt, was die Haltbarkeit des Öls erhöht. Zur Bleichung wird meistens Bleicherde verwendet. Die Desodorierung dient der Entfernung von geruchs- und geschmacksintensiven Begleitstoffen wie Carbonylverbindungen. Diese wird mit Hilfe einer Wasserdampfdestillation unter Vakuum durchgeführt.

Umesterung

Die Umesterung des Öls dient der Herstellung von Biodiesel und geschieht durch Hinzugabe von Methanol und einem Katalysator. ADM verwendet dazu den CD-Prozess nach Conne-mann, welcher ein zweistufiges Verfahren zur kontinuierlichen Umesterung von Triglyceriden beinhaltet (vgl. Abbildung 9-2). Als Katalysator wird üblicherweise Natriumhydroxid oder Natriummethylat verwendet, das mit dem Öl und Methanol gemischt wird (Grevé 2009). Bei Temperaturen von 60-80 °C wird das Gemisch über den Kopf der ersten Kolonne in die erste Umesterungsstufe überführt, die aus zwei in Reihe geschalteten vertikalen Reaktionsrohren besteht. Die Strömungsgeschwindigkeit des Gemisches ist dabei geringer als die Sinkgeschwindigkeit des Kuppelproduktes Glycerin, das kontinuierlich aus dem Sumpf entfernt wird. Die leichte Phase (Reaktionsgemisch I) wird in die zweite Kolonne der ersten Stufe überführt, in der wiederum die entstehende Glycerinphase aus dem Sumpf abgezogen wird. Zwischen der ersten und der zweiten Umesterungsstufe wird das noch in der Esterphase verbliebene freie Glycerin mit Hilfe eines Tellerseparators entfernt. Bevor das so entstandene Reaktionsgemisch II in die zweite Stufe gelangt, erfolgt eine erneute Dosierung von Methanol und Katalysator, um die gewünschte vollständige Umsetzung zu gewährleisten. Nach der zweiten Stufe, die ebenfalls aus zwei in Reihe geschalteten Kolonnen besteht, wird die Esterphase mit Sauerwasser gewaschen, um das restliche Glycerin, das überschüssige Methanol und die im Prozess entstandenen Seifen abzutrennen. Über weitere Tellerseparatoren wird der Ester von der Glycerin-Wasser-Phase befreit und gelangt über einen Trockner in einen Lager-

tank.



Quelle: (Grevé 2009; Grevé 2009)

Abbildung 9-2: Prozesskette Methylesterherstellung

Aufreinigung des Rohglycerin

Die Glycerinphasen werden mit Schwefelsäure vermischt, so dass Kaliumsulfat entsteht, welches dann in einem Phasendekanter abgetrennt werden kann. Durch Zugabe von Kaliumhydroxid kann der pH-Wert auf 7,5 eingestellt werden. Anschließend kann das Rohglycerin über eine Vakuumdestillation zu Pharmaglycerin aufgearbeitet werden.

9.1.3 Typ III: Ein-Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für synthetische Bio-kraftstoffe, Strom und Naphtha aus Restholz/KUP

Herstellung von Fischer-Tropsch Diesel

Die BTL-Produktion umfasst grundsätzlich die Schritte Aufbereitung der Biomasse, Synthesegaserzeugung, Gasreinigung und -konditionierung sowie die BTL-Synthese (Hamelinck, Faaij et al. 2004). Im Anschluss an die BTL-Synthese können die Wachse aus der Fischer Tropsch Synthese gecrackt werden und eine Auftrennung in unterschiedliche Produkte vorgenommen werden.

Aufbereitung der Biomasse

Die Aufbereitung der Biomasse für das folgende Vergasungsverfahren beinhaltet die Einstellung des Wassergehalts mittels Trocknung, aber auch die Einstellung der benötigten Körngröße des Brennstoffs (Zimmer, Fritsche et al. 2009). Dazu können Verfahren wie Zerkleinerung, Siebung oder Pelletierung zum Einsatz kommen. Zudem ist es möglich die Biomasse vorab zu pyrolysieren; wobei der Brennstoff durch den Einfluss von Wärme in Pyrolysegas, -öl oder -koks umge-

wandelt wird. Für die Bioraffinerie wird angenommen, dass eine Pyrolyse der Vergasung vorgeschaltet wird.

Synthesegaserzeugung

Für die Synthesegaserzeugung gibt es prinzipiell die Anlagengrundtypen Festbettvergaser, Wirbelschichtvergaser und Flugstromvergaser (Reinhardt 2006). Festbettvergaser sind auf Leistungen bis 5 MW beschränkt und ergeben Rohgase mit extrem hohem Teergehalt (Reinhardt 2006). Wirbelschichtvergaser werden bis zu einer Leistung von einigen hundert MW_{th} gebaut. Die Temperaturen eines Wirbelschichtvergasers liegen zwischen 700 und 1100 °C und es entstehen relevante Mengen an Teeren und Aromaten, die entfernt werden müssen. Auf der anderen Seite können unterschiedlichste Feedstocks mit Größen bis zu 10 cm Durchmesser eingesetzt werden (van Vliet, Faaij et al. 2009). Flugstromvergaser, die oftmals in Anlagen von mehreren GW_{th} vorkommen, verwenden Temperaturen oftmals über 1300 °C, so dass alles vergast werden kann. Sie benötigen aber sehr kleines Inputmaterial mit einem Durchmesser kleiner als 1 mm und produzieren inerte Schlacken. Zweistufige Vergaser wie der von der Firma Choren entwickelte Carbo-V[®] Vergaser verbinden Feedstock Flexibilität und vollständige Vergasung, sind aber komplizierter in der Herstellung (van Vliet, Faaij et al. 2009). Aufgrund der prinzipiellen Eignung des Carbo-V[®] Verfahrens wird dieses hier näher betrachtet. Der Carbo-V-Prozess ist ein weltweit patentiertes Verfahren zur Synthesegaserzeugung aus kohlenstoffhaltigen Feststoffen, welches zur Produktion von BTL, zur Stromerzeugung und für die Herstellung klassischer Synthesegasprodukte genutzt werden kann. Die Vorteile des Verfahrens ergeben sich vor allem durch die apparatetechnische Entkopplung und die dadurch bedingte mehrstufige Prozessführung. Dadurch ergibt sich ein breites Spektrum an Einsatzstoffen mit niedrigen Teer- und Methangehalten. Der Brennstoff wird vollständig ausgenutzt, der chemische Vergasungswirkungsgrad liegt über 80% und die Elektroenergieausbeute bei bis zu 35 %. Das dreistufige Vergasungsverfahren lässt sich in die Teilschritte Niedertemperatur-, Hochtemperaturvergasung und endotherme Flugstromvergasung untergliedern.

1. Niedertemperaturvergasung (NTV)

Die mithilfe von Abwärme vorgetrocknete Biomasse wird im NTV durch partielle Oxidation mit einem Vergasungsmittel bei Temperaturen zwischen 400 – 500°C in Biokoks und teerhaltiges Gas zerlegt.

2. Das entstandene Gas wird in der Brennkammer des Hochtemperaturvergaser mit Luft und/oder Sauerstoff anschließend nachoxidiert. Die dabei freiwerdende Wärme erhitzt das Gas soweit, dass enthaltene Aromaten, Teere und Oxoverbindungen vollständig zersetzt werden.
3. Um einen hohen Wirkungsgrad bei der Herstellung des teerfreien Rohgases zu ermöglichen, wird der Biokoks in die heißen Verbrennungsgase des endothermen Flugstromvergaser eingeblasen. Der Kohlenstoff reagiert dann mit dem Kohlendioxid und dem Wasserdampf zu CO und H₂ und die Gastemperatur sinkt schnell auf ca. 900°C ab. Das Synthesegas wird im Anschluss weiterverarbeitet.

Als kohlenstoffhaltige Feststoffe kommen u.a. naturbelassenes Holz, Recyclingholz, Sägewerksreste, aufbereiteter Hausmüll, Stroh, Strohpellets, Baumwollstroh und Klärschlamm zum Einsatz.

Fischer- Tropsch- Synthese

Das Verfahren zur Herstellung höherer flüssiger Kohlenwasserstoffe aus den Gasen Kohlenmonoxid und Wasserstoff mit Hilfe von Metallkatalysatoren lässt sich in drei Teilschritte untergliedern.

Synthesegaserzeugung und –reinigung

Fischer- Tropsch- Synthese

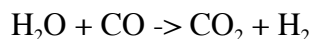
Produkttrennung und –aufarbeitung nach Siedefraktion und Funktionalität

Bei der eigentlichen Fischer- Tropsch- Synthese treten Drücke zwischen 20 und 40 bar auf. Man kann zwischen zwei Verfahren unterscheiden, welche jeweils auf unterschiedliche Endprodukte abzielen. Das Tieftemperaturverfahren arbeitet mit Temperaturen zwischen 210 – 250°C und erzeugt lang- kettige Produkte, dient somit zur Herstellung von Mitteldestillat (Diesel) und Wachs. Im Gegensatz dazu verwendet man das Hochtemperaturverfahren mit Temperaturen zwischen 320 – 350°C um kurz- kettige Produkte zu erzeugen. Dieses Verfahren verwendet man zur Benzinherstellung und um Produkte wie Naphta für die chemische Industrie herzustellen. Beim Anstieg der Temperatur, bei denen die Reaktionen ablaufen, gilt somit generell eine Verschiebung der Selektivität zugunsten kürzerkettiger Produkte.

Ausgehend von den zwei unterschiedlichen Verfahren werden jeweils spezielle Reaktoren verwendet. Insgesamt gesehen gibt es eine Vielzahl von Reaktoren. Wichtig und bestimmend bei der Auswahl ist eine genaue Temperaturführung, also der Wärmetausch im Reaktor unter Wasserdampferzeugung. Mögliche Reaktoren für das Tieftemperaturverfahren sind der Rohrbündelreaktor oder der Suspensionsreaktor, für das Hochtemperaturverfahren bieten sich Wirbelschichtreaktoren an, zirkulierend oder stationär. Im Rohrbündelreaktor befindet sich der Katalysator in den von außen gekühlten Rohren und das Synthesegas überströmt das Katalysatorbett von oben nach unten. Die Reaktionsprodukte verlassen den Reaktor bodenseitig. Beim Suspensionsreaktor befindet sich der Katalysator in einem flüssigen Reaktionsprodukt (Wachs) und das Synthesegas wird von unten eingedüst. Die Produkte verlassen den Reaktor kopfseitig oder seitlich. Die Wirbelschichtreaktoren für das Hochtemperaturverfahren besitzen eine sehr gute Temperaturführung. Als Katalysator verwendet man feine Pulver von Eisenschmelzkatalysatoren. Bei der zirkulierenden Wirbelschicht (Synthol- Reaktor), oder auch Flugstaubsynthese genannt, wird der Katalysator vom einströmenden Synthesegas durch den Fischer- Tropsch- Reaktorteil transportiert. Der Katalysator und die Produkte verlassen den Reaktorteil kontinuierlich und werden anschließend durch Zyklone getrennt. Im Vergleich dazu wird bei der stationären Wirbelschicht (Sasol Advanced Synthol- Reaktor) der Katalysator in der Wirbelschicht gehalten. Frisches Synthesegas strömt unten über ein Verteilsystem ein. Die Hauptreaktionen die in jedem Reaktor ablaufen sind

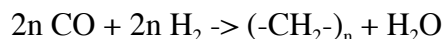


Konvertierung:



$$\Delta_{\text{R}} H^0 (250^\circ\text{C}) = -39,5 \text{ kJ/mol}$$

Bei vollständiger Wasserkonvertierung:



$$\Delta_{\text{R}} H^0 (250^\circ\text{C}) = -189,5 \text{ kJ/mol}$$

Die Reaktion ist stark exotherm und die freigesetzte Reaktionswärme beträgt 25% der Verbrennungswärme des eingesetzten Synthesegases. Eine Abfuhr der Reaktionswärme ist von hoher Bedeutung, um eine irreversible Schädigung des Katalysators zu verhindern, um eine gleichbleibende Produktselektivität zu gewährleisten und ein mögliches „Durchgehen“ der Reaktion zu vermeiden. Als mögliche Katalysatoren kommen Eisen, Cobalt, Nickel und Ruthenium in Frage, jedoch finden lediglich Eisen und Cobalt in großem Maßstab eine technische Anwendung. Ruthenium ist zwar äußerst aktiv, jedoch aufgrund des hohen Preises nicht für den industriellen Einsatz geeignet. Die Bedingungen, die an einen Katalysator gestellt werden, sind die Fähigkeit, die Kohlenstoff- Sauerstoff- Bindung des Kohlenmonoxids spalten zu können und in einer Abfolge von sich wiederholenden Wachstumsschritten an der Katalysatoroberfläche vornehmlich lineare Verbindungen zu bilden. Dieses Kettenwachstum erfolgt durch Einschub einer CH_2 - Gruppe. Ein Wachstumsschritt beinhaltet dabei eine Vielzahl von Einzelreaktionen:

- Chemisorption von CO an der Katalysatoroberfläche
- Chemisorption von zwei Mol H_2 an der Katalysatoroberfläche (dissoziativ)
- C-O- Bindungsspaltung
- Bildung einer CH_2 - Spezies
- Einschub einer CH_2 - Spezies in eine adsorbierte Alkylkette
- Bildung von Wasser

Für typische Werte der Ketten-Wachstumswahrscheinlichkeit α zwischen 0,7 und 0,9 ergeben sich die maximalen Ausbeuten der Fraktionen C_4 bis C_9 . Der Anteil der Wachse im Produkt nimmt zu, wenn die Werte der Kettenwachstums- Wahrscheinlichkeit steigen. Das tatsächliche Fischer- Tropsch- Produkt besteht aus einer Vielzahl von Einzelverbindungen, dessen Verteilung im Endprodukt abhängig ist von der Kettenwachstums- Wahrscheinlichkeit α und weiteren Faktoren, wie Temperatur, Druck, Katalysator, Reaktortyp und dem H_2/CO - Verhältnis im Synthesegas. α steigt mit sinkendem H_2/CO -Verhältnis, mit sinkender Reaktionstemperatur und mit steigendem Druck. Zu den Einzelverbindungen im Fischer- Tropsch-Produkt zählen Paraffine und Olefine, verzweigte Verbindungen und sauerstoffhaltige Verbindungen. Als Hauptprodukte lassen sich lineare Paraffine und Olefine charakterisieren. Diese entstehen ausgehend von einer chemisorbierten Alkylkette durch:

assoziative Desorption unter Wasserstoffanlagerung -> Paraffine

dissoziative Desorption unter α - Wasserstoffabspaltung -> Olefine-(1)

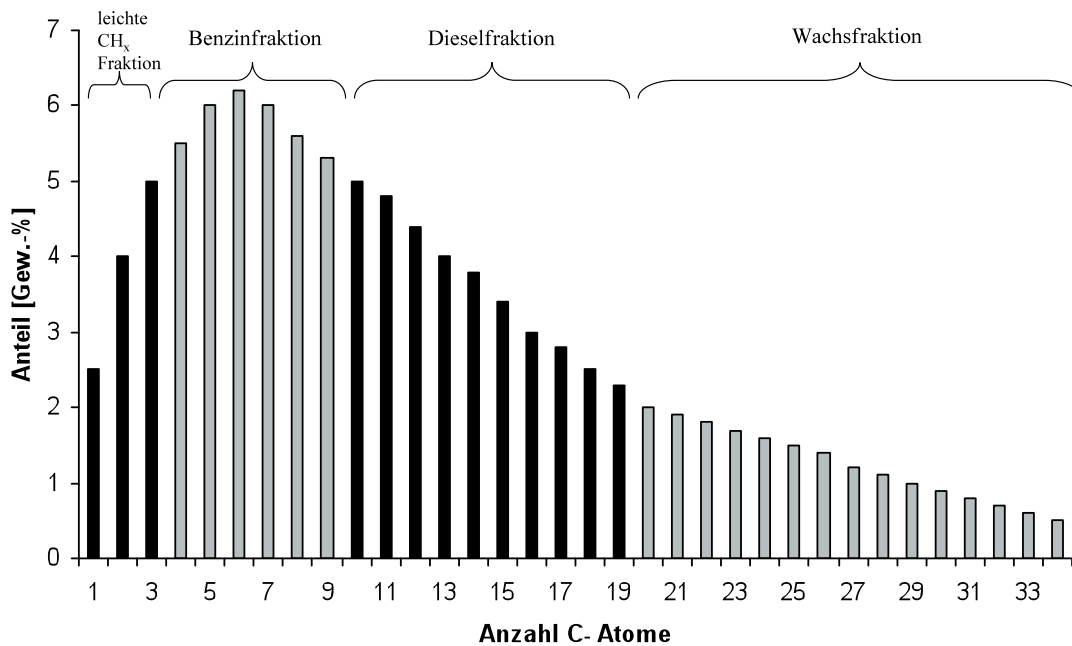
Hauptsächlich werden Olefine gebildet (ca. 80%) und weniger Paraffine (ca. 20%). Bei den verzweigten Verbindungen entstehen fast ausschließlich mono- methyl- verzweigte Verbindungen. Diese bilden sich bevorzugt bei hoher Reaktionstemperatur, ihr Anteil liegt jedoch deutlich unter 15 Gew.-%. Die sauerstoffhaltigen Verbindungen sind als Nebenprodukte der Fischer- Tropsch- Synthese anzusehen. Lineare Alkohole und Aldehyde machen dabei den Hauptbestandteil aus. Der Anteil am Gesamtprodukt beträgt deutlich weniger als 10 Gew.-%.

Komponente	Niedertemperaturverfahren	Hochtemperaturverfahren
CH ₄	4 Gew.-%	7 Gew.-%
C ₂ – C ₄ Olefine	4 Gew.-%	24 Gew.-%
C ₂ – C ₄ Paraffine	4 Gew.-%	6 Gew.-%
Benzin	18 Gew.-%	36 Gew.-%
Mitteldestillat	19 Gew.-%	12 Gew.-%
Wachse	48 Gew.-%	9 Gew.-%
Sauerstoffverbindungen	3 Gew.-%	6 Gew.-%

Für eine technische Nutzung als Motorenkraftstoff müssen die Fischer- Tropsch- Produkte, welche den Synthesereaktor verlassen, destillativ in die einzelnen Fraktionen aufgetrennt werden. Dann erhält man Rohbenzin (C₄ bis C₉), Fischer- Tropsch- Diesel (C₁₀ bis C₁₉) und Wachse (C₂₀₊). Das Naphtha, welches als Rohstoff in der Petrochemie Einsatz findet, ist ein Rohbenzin und kann durch Isomerisierung in gebrauchsfertiges Benzin umgewandelt werden.

Für die Bereitstellung von gebrauchsfertigem Diesel muss der Fischer- Tropsch- Diesel zunächst isomerisiert werden. Das bedeutet, ein Teil der langkettigen (aliphatischen) Kohlenwasserstoffmoleküle wird zu verzweigten Kohlenwasserstoffen umgewandelt. Diese Umwandlung von n- Alkanen in iso- Alkane führt zu einer Oktanzahlverbesserung. Zusätzlich erfährt der Dieselmotorkraftstoff eine Additivierung, bevor er zum Gebrauch bereitsteht. Durch die Zugabe von entsprechenden Additiven wird die Zündwilligkeit auf vorgegebene Spezifikationswerte angehoben, um somit die Zündwilligkeit des Dieselmotorkraftstoffs zu verbessern.

Die Wachsfractionen werden aufgearbeitet, durch sogenanntes Hydrocracken. Dabei werden die langkettigen Kohlenwasserstoffe unter Anwesenheit von Wasserstoff in die gewünschten Diesel- und Mitteldestillate aufgespalten. Diese Reaktionen laufen exotherm ab und Temperaturen zwischen 350 und 500 °C sind charakteristisch für dieses Verfahren, sowie Drücke zwischen 30 bis 200 bar. Die freien Bindungen der entstehenden kurzkettigen Produkte, werden vom Wasserstoff besetzt.



Quelle: Eigene Darstellung nach (Kaltschmitt, Harmann et al. 2009)

Abbildung 9-3: Produktverteilung des Fischer-Tropsch-Rohproduktes für eine Kettenwachstumswahrscheinlichkeit von 0,85

Die vordersten drei Produkte stellen im obigen Diagramm die leichten CH_x- Fraktionen dar, gefolgt von den Benzinfraktionen. Im Anschluss daran folgen die Dieselfraktionen, welche den größten Anteil in der Produktverteilung einnehmen und zuletzt die Wachsfraktionen mit den längsten Kohlenstoffketten.

Um die Dieselausbeute zu erhöhen, werden vorerst langkettige Kohlenwasserstoffe erzeugt, welche dann durch Hydrocracking an Katalysatoren in kürzere Ketten der Dieselfraktion gespalten werden.

Für das zuvor vorgestellte Verfahren Carbo-V ergeben sich bei einem Strombedarf von 444 kWh/t und einem Wirkungsgrad von 47%. folgende Ausbeuten bei der Nutzung von Stroh:

LPG	7,4 kg/t
Rohbenzin	39,1 kg/t
Kerosin	40,3 kg/t
Diesel	103,6 kg/t
Mitteldestillat	143,9 kg/t
Wachs	0,5 kg/t

Quelle: http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/BTL-NRW_Endbericht.pdf

9.1.4 Typ IV: Drei-Plattform (C5-, C6-Zucker und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh

Die Drei-Plattform (C5-, C6-Zucker und Lignin) Bioraffinerie für Bioethanol und Chemikalien (Phenolen) aus Stroh befindet sich gegenwärtig noch in der Entwicklung. Bis dato sind zwei Demonstrationsanlagen in Betrieb.

Folgende Prozesse werden bei der Herstellung von Ethanol aus Stroh benötigt:

- Vorbehandlung
- Hydrolyse der Lignozellulose
- Ethanolfermentation
- Destillation und Rektifikation

Vorbehandlung

Die Vorbehandlung ermöglicht den Zugang zur enzymatischen Hydrolyse durch Aufbrechen der Zellwände (Yang and Wyman 2008). Theoretisch können biologische, physikalische, chemische und physio-chemische Verfahren verwendet werden, wobei die chemischen und thermo-chemischen Verfahren gegenwärtig am effektivsten und am für industrielle Anwendungen am besten geeignet erscheinen (Alvira, Tomás-Pejó et al. 2010). Eine Kombination der zur Verfügung stehenden Vorbehandlungsmethoden können sich insbesondere zur Fraktionierung von Lignozellulose und im Hinblick auf die Ausbeute eignen (Alvira, Tomás-Pejó et al. 2010).

Die Wirkungen der Vorbehandlungen sind (Margeot, Hahn-Hagerdal et al. 2009):

- Erhöhung der zugänglichen Oberflächen
- Dekristallisierung von Zellulose
- Teilweise Depolymerisation von Zellulose
- Die Löslichkeit von Lignin erhöht und evt. modifiziert

Vermieden werden sollte die Verschlechterung von Zuckern und die Bildung von Inhibitoren wie furanische und phenolische Verbindungen, ein hoher Verbrauch an Chemikalien und Energie als auch ein hohes Abfallaufkommen (Margeot, Hahn-Hagerdal et al. 2009).

Besonders vielversprechend ist das Dampfexplosionsverfahren mit verdünnter Säure, welches im Pilotmaßstab im NILE Projekt verwendet wurde und das Ammonia-Fiber-Explosion Ver-

fahren (AFEX-Verfahren). Beim AFEX-Verfahren wird die Biomasse wasserfreiem Ammoniak bei Temperaturen zwischen 60 und 100 °C und hohen Drücken ausgesetzt (Alvira, Tomás-Pejó et al. 2010). Entscheidend ist hier die Rückführung der Chemikalien (Margeot, Hahn-Hagerdal et al. 2009). Bei großen Mengen an Stroh erscheint eine ausschließlich hydrothermische Vorbehandlung bei Temperaturen zwischen 160 und 215 °C geeignet (Thomsen, Thygesen et al. 2008). Hier ist aber zu beachten, dass bei diesen hohen Temperaturen Inhibitoren entstehen. Dieser Effekt kann reduziert werden durch Verwendung mehrerer hintereinander geschalteter Reaktoren mit unterschiedlichen Temperaturen (Thomsen, Thygesen et al. 2009).

Enzymatische Hydrolyse

Das Ziel der sich anschließenden enzymatischen Hydrolyse ist die Depolymerisation der Polysaccharide (hauptsächlich in Form von Zellulose) im Wasser (Margeot, Hahn-Hagerdal et al. 2009). Drei Klassen an Enzymen können ergänzend eingesetzt werden, um die Zellulose an unterschiedlichen Stellen aufzubrechen (Lynd, Weimer et al. 2002). Zellulasen des Stamms *Trichoderma reesei* finden in industriellen Anlagen hauptsächlich Einsatz (Margeot, Hahn-Hagerdal et al. 2009). Zusätzlich kann der Einsatz von Hilfsenzymen wie Hemizellulasen zur Aufspaltung von Hemizellulose sinnvoll sein (Margeot, Hahn-Hagerdal et al. 2009). Die hohen Kosten und Dosen der Enzyme werden als Hemmschuh für die Kommerzialisierung der Lignozellulose Ethanol Industrie gesehen (Himmel 2007).

Es ist möglich neben der enzymatischen Hydrolyse simultan eine Co-Fermentierung (SSCF²⁸) laufen zu lassen. In dem Fall wird das Lignin nicht nach der Hydrolyse abgetrennt, sondern erst bei der Destillation des Ethanols.

Die benötigten Mengen an Enzymen hängen stark ab von der Vorbehandlung. Je nach Vorbehandlung verändert sich die Faserstoffausbeute und die Zugänglichkeit für Enzyme, so dass sich unterschiedliche Glucose-Ausbeuten ergeben (Ehrich, Michels et al. 2009). Positiv kann sich auch der zusätzliche Einsatz von Salzen auswirken (Yawalata and Paszner 2006), was gegenwärtig aber nicht wirtschaftlich erscheint. Einen weiteren Einfluss auf die Wirksamkeit hat auch der Ligningehalt im Substrat. Tendenziell können höhere Ausbeuten bei geringerem Ligningehalt erzielt werden (Ehrich, Michels et al. 2009). Im Projekt „Lignozellulose Bioraffinerie“ (Ehrich, Michels et al. 2009) konnte gezeigt werden, dass der größte Hydrolysegrad des untersuchten Faserstoffes mit NS 500 13, welches von Novozymes hergestellt wird, erzielt werden konnte. Die Hydrolyse von Cellulose mit den kommerziell erhältlichen Enzymen erfolgte in diesem Projekt im Citronensäure-Phosphat-Puffer bei pH 5,0 und 50 °C. Dabei wurden eine Substratmenge von 40 gTS/l und Enzymmengen von 0,18 g/l (Cellulase) und 0,018 g/l (β-Glucosidase) eingesetzt (Ehrich, Michels et al. 2009).

Für den Abbau der Hemicellulosefraktion konnten folgende hydrolytische Aktivität der isolierten xylanolytischen Exoenzyme von *C. stercorarium* ermittelt werden:

²⁸ Simultaneous saccharification and co-fermentation process (SSCF)

Nach 1 h Hydrolysezeit wurde eine Enzymaktivität der xylanolytischen Enzyme von *C. stercorearium* auf der oligomeren Hemicellulosefraktion (1:8 verd.) von 126 mU/ml bei einem Enzymvolumen von 50 µl nachgewiesen. Mit zunehmender Zeit ist eine Abnahme der enzymatischen Wirkung erkennbar. Je nach Verdünnung, Substrat und Wirkzeit wurden zwischen 75 und 245 µg Xylose/µl umgesetzt (Ehrich, Michels et al. 2009).

Ethanol Fermentation

Die Fermentation der Lignozellulose erfordert die Fermentation von C6-Zuckern (Glucose, Mannose, Galactose) und C5-Zuckern (Xylose, Arabinose) bei Anwesenheit von Hemmstoffen wie schwache Säuren und Furalaldehyde als auch Phenole (Margeot, Hahn-Hagerdal et al. 2009).

Je nach der Wahl der Vorbehandlung und der Fermentation ergeben sich unterschiedlich hohe Ertragsausbeuten. Bei einem verdünnten Säureaufschluss wurde ein Ertrag von 289 l/t TM, minimal 211 l/t bei einem reinen Dampfaufschluss und 300 l/t bei getrennter C5- und C6-Zucker Fermentation (Kazi, Fortman et al. 2010).

Die theoretische Ausbeute von Ethanol aus Getreidestroh bei Vollständiger Fermentation aller Hexosen und Pentosen wird auf 480 l/t TM geschätzt (Kadam and McMillan 2003).

Destillation

Prinzipiell kann hier entsprechend des Bioraffinerie Typs I eine herkömmliche Destillation und Rektifikation eingesetzt werden (vergleiche Kapitel 9.1.1). Dieses Verfahren ermöglicht aber nicht die Rückgewinnung der Enzyme, da diese bei den hohen Temperaturen zerstört werden. Neue Ansätze untersuchen den Einsatz von Niedrigtemperatur Vakuum Destillation, welche die Rückgewinnung der Enzyme erlauben und gegenwärtig von Holm Christensen Biosystemer APS in Dänemark entwickelt wird.

9.1.5 Typ V: Zwei-Plattform "grüne" (organische Säfte und Biogas) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras

Generell stehen einer grünen Bioraffinerien verschiedene grüne Pflanzen wie Gräser, Luzerne etc. zur Verfügung. Je nach Substrat werden im Falle einer Nutzung der Biomasse zur Biogaserzeugung verschiedene Biogasausbeuten erzielt. Daraus resultieren Energiespannweiten von 150 [GJ/ha] (Dauergrünland) bis hin zu 233 [GJ/ha] (Sudangras) (Datensammlung Energiepflanzen KTBL). Dabei ist der Anspruch an die Biomasse hauptsächlich durch den substratspezifischen Ligninanteil gerichtet.

Grundsätzlich werden in grünen Bioraffinerien zwei Ansätze verfolgt: Der eine beschäftigt sich mit der Gewinnung der Pflanzenfasern und der anschließenden weiteren Verarbeitung zu stofflichen Produkten wie Dämmstoffen und faserverstärkte Kunststoffe, während die andere vorwiegend durch Pressen des Grases Presssaft gewinnt, um daraus Wertstoffe wie Aminosäuren und Milchsäure zu extrahieren, wobei der dabei entstandene Filterkuchen unter anderem für die Biogasherstellung mittels Fermentation genutzt wird.

Für den Anbau des Grases wird das Feld bestellt und Düngemittel bzw. Pestiziden eingesetzt. Das Düngemittel kann von externen Herstellern, oder aus dem eigenen Betrieb kommen. Sobald die Ernte es zulässt wird das Gras geschnitten. Die leicht angetrockneten Schnitte werden anschließend zur Lagerung ins Silo abtransportiert. Die Trockenmasse des Grases beträgt zu diesem Zeitpunkt 30-35%. Die Silos, in denen der Grünschnitt gelagert wird bestehen im Allgemeinen aus einer Betonwanne mit einer Kunststoffabdeckung. Während der Lagerung fällt Abwasser an, welches in der Vergärung der Biogasanlage wiederverwendet wird. Zu beachten ist, dass das einzulagernde Material sich mit der Zeit evtl. biologisch abbaut, womit es dann seinen energetischen Nutzen verliert. Im Folgenden werden nun die zwei grundlegenden Bio-raffineriesysteme beschrieben.

In der Zwei-Plattform "grüne" (organische Säfte und Biogas) Bioraffinerie für Strom, Dämmstoffe, faserverstärkte Kunststoffe und Düngemittel aus Gras wird die Grasgülle durch ein Trennsystem von den einzelnen Fasern getrennt. Die einzelnen Fasern werden anschließend getrocknet und für die Herstellung von Naturfaserkunststoffen (NFK) eingesetzt bzw. dienen als Rohstoff für die Herstellung von Naturdämmstoffen. Bei der Herstellung von NFK werden die Grasfasern mit Polypropylen vermischt, so dass ein Komposit entsteht, welches in einer Pelletanlage zu Granulat verpresst wird und anschließend als Werkstoff weiterverarbeitet werden kann. Bei der Dämmstoffherstellung werden die einzelnen Grasfasern mit einem Brandschutzmittel versehen und anschließend in Isolationsschichten eingeblasen. Die Wärme die für den Trocknungsprozess nötig ist, wird aus dem Blockheizkraftwerk bezogen, das an der Gesamtanlage angeschlossen ist. Das Wasser für die Aufschlammung stammt einerseits aus der Siloanlage und andererseits aus dem Prozesswasser der Biogasanlage. Die zurückgebliebene Grasgülle wird in einer Kofermentationsanlage mit anderen Substraten wie Speisereisen und Gülle vergärt.