

# **Bilanzierung und –bewertung holzbasierter Bioraffineriekonzepte Ergebnisse in Kurzform**

**TP 5.1.1 Begleitforschung Spitzencluster BioEconomy  
Arbeitspaket TP 5.1.1.2  
(FKZ 031A078B)**

**Roy Nitzsche**

**Maik Budzinski**

**Stefan Majer**

**Arne Gröngroft**

**Franziska Müller-Langer**

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum  
gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116  
04347 Leipzig

Tel.: +49(0)341 2434-112

[www.dbfz.de](http://www.dbfz.de)  
[info@dbfz.de](mailto:info@dbfz.de)

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Franziska Müller-Langer

Tel.: +49(0)341 2434-423

E-Mail: [franziska.mueller-langer@dbfz.de](mailto:franziska.mueller-langer@dbfz.de)



## 1 Hintergrund, Ziele und Vorgehensweise

Die Entwicklung und das Design neuer biomassebasierter Technologien und Prozesse ist aufgrund der verschiedenen Rohstoffe, der Vielzahl potenzieller Produkte und des Neuheitsgrades der technischen Verfahren eine komplexe und vielschichtige Herausforderung. Um bereits während der Entwicklungsphase neuer Verfahren und Technologien frühzeitig Optimierungspotenziale zu identifizieren und nutzen zu können, sind geeignete Bewertungsansätze und -methoden notwendig. Diese Methoden müssen eine belastbare Analyse von sowohl rein technischen Kenngrößen, Kosten und weiteren ökonomischen Kenngrößen als auch ökologischen Kenngrößen für eine vergleichende Einordnung im Kontext nachhaltiger Bioökonomiekonzepte erlauben. Diese Handlungsfelder werden auch im Rahmen der entsprechenden nationalen Aktionspläne<sup>1,2</sup> der deutschen Bundesregierung sowie in der „Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030“ und der „Roadmap Bioraffinerien“ als wichtige Forschungsfelder benannt und gefordert. Kernziele des Teilprojekts Anlagenbilanzierung und -bewertung waren daher die Entwicklung, Bilanzierung, Bewertung und Optimierung von Bioraffineriekonzepten.

Im Rahmen des Arbeitspaketes Anlagenbilanzierung wurden verschiedene im Labor- und Technikummaßstab befindliche Technologien des Spitzenclusters BioEconomy Mitteldeutschland zu buchenholz-basierenden Bioraffineriekonzepten verschaltet und auf einen großtechnischen Maßstab hochskaliert, wie er für kommerzielle Anwendungen typischerweise ausgelegt sein müsste. Hierfür wurden Methoden des Prozessdesigns, der Prozesssimulation sowie der Kostenanalyse und der Ökobilanzierung (LCA) verwendet und auf die Erfordernisse von biobasierten Technologien weiterentwickelt. Abbildung 1 illustriert das generell methodische Vorgehen für das konzeptionelle Design der verschiedenen Bioraffineriekonzepte und deren Bewertung. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik wurde zu Beginn des Projektes in einem Hintergrundpapier festgehalten, welches allen Projekt- und Clusterpartnern zur Verfügung gestellt wurde.

Die Ergebnisse der Anlagenbilanzierung und Nachhaltigkeitsbewertung wurden dem Clustermanagement und den Clusterpartnern vorgestellt. Dabei wurden die wesentlichen Erkenntnisse im Hinblick auf daraus resultierenden weiteren Entwicklungsbedarf diskutiert. Die wesentlichen Ergebnisse aus den Forschungsarbeiten zur Anlagenbilanzierung und Nachhaltigkeitsbewertung sowie die daraus ableitbaren Kernaussagen werden nachfolgend zusammengefasst.

Des Weiteren wird kurz auf den weiteren Forschungsbedarf bezüglich der Bilanzierung und Bewertung von Bioraffinerien, welcher sich während der Arbeiten ergeben hat, eingegangen. Zusätzlich wird auf Publikationen verwiesen, die im Laufe der Projektarbeit entstanden sind, um den interessierten Leser bei Bedarf detailliertere Einblicke zu ermöglichen.

---

<sup>1</sup> „Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland – Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung“, BMU, 2009

<sup>2</sup> „Aktionsplan der Bundesregierung zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe“, BMELV, 2009

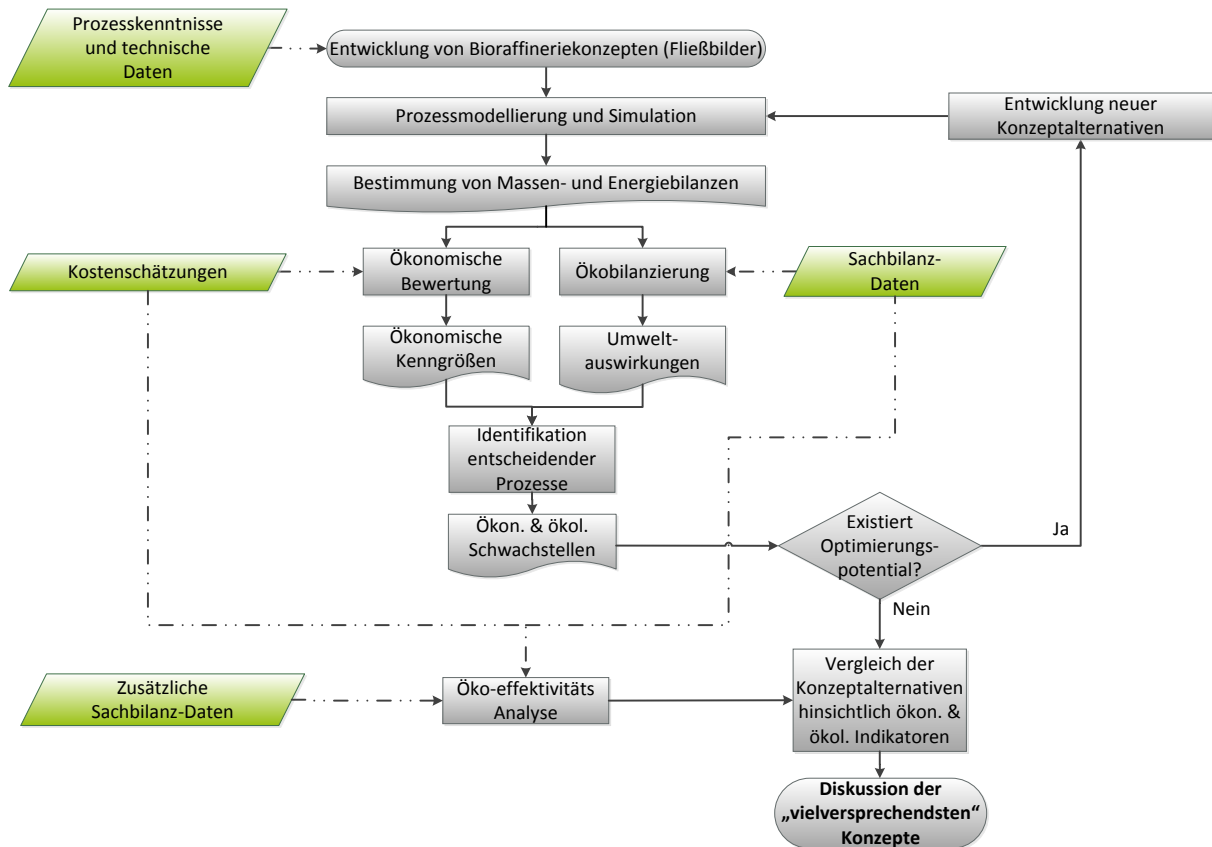


Abbildung 1: Generelle Vorgehensweise für Prozessdesign sowie technoökonomischer und ökologischer Bewertung von Bi Raffinerie Konzepten.

## 2 Wesentliche Ergebnisse

Aufgrund des zweistufigen Ansatzes in diesem Arbeitspaket werden die Ergebnisse zweigeteilt dargestellt. Fokus des ersten Teils sind die Ergebnisse aus der Entwicklung, Bilanzierung und Optimierung von Bi Raffinerie Konzepten. Im zweiten Teil stehen die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung der entwickelten Konzepte im Vordergrund.

### 2.1 Anlagenbilanzierung

Zum Erreichen der o. g. Teilziele musste ein geeigneter Ansatz für die Prozesssynthese bzw. das Prozessdesign entwickelt werden, der ein umfangreiches Technologiescreening zur Identifikation geeigneter Prozesse und Überführung von ermittelten Kennwerten zur Bilanzierung in eine Prozesssimulationssoftware ermöglicht. Herausforderung für das Prozessdesign ist hierbei die Komplexität in Bezug auf die Vielzahl an möglichen Rohstoffen, Produkten und Prozessen sowie deren spezifischer Neuheitscharakter in Bezug auf technischen Entwicklungsstand und Marktrelevanz. Zur Identifikation geeigneter Prozesspfade wurde zu Beginn eine Input-Output-Struktur definiert, d. h. mit Hilfe der Partner des Spitzenclusters BioEconomy wurden potenzielle Rohstoffe und Produkte bestimmt. Darauf aufbauend wurden in einer übergeordneten Prozessstruktur verschiedene Bi Raffinerie Konzepte entwickelt. Aus den verschiedenen Konzepten wurden vielversprechende Raffineriemodelle identifiziert und mittels der Prozesssimulationssoftware Aspen Plus® V8.6 detailliert modelliert und bilanziert. Als Datengrundlage der Simulation wurden nur bereits veröffentlichte Prozessparameter von den Clusterpartnern oder andere Literaturquellen verwendet. So konnten die Verwertungsinteressen aller Partner gewahrt

werden. Als Ergebnis aus dem Prozess-Design haben sich drei Bioraffineriekonzepte ergeben, welche genauer analysiert wurden (Abbildung 2).

- Bioraffineriekonzept 1: Der Rohstoff Buchenholz wird über ein Organosolv-Verfahren in seine drei Hauptbestandteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin aufgespaltet. Die feste Cellulosefraktion wird mittels enzymatischer Hydrolyse zu C5- und C6-Zuckern umgewandelt. Dabei anfallende feste Reststoffe werden abgetrennt und ergeben den energetisch verwertbaren Nebenproduktstrom Hydrolyselignin. Die Zucker werden via Fermentation weiter zu Ethanol und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) konvertiert. Das in der Fermentationsbrühe verdünnt vorliegende Ethanol wird über eine Destillations- und Rektifikationskolonne aufkonzentriert und anschließend durch Dehydratation zu einem ethylenreichen Gasstrom umgesetzt. Um zu kommerziell verwertbarem „Polymer-grade“ Ethylen (99,95 Vol.-%) zu gelangen wird der Gasstrom über mehrere Reinigungsstufen aufkonzentriert. Die Ligninfraktion, welche zusammen mit der Hemicellulosefraktion nach dem Holzaufschluss gelöst vorliegt, wird mittels Wasser ausgefällt, abgetrennt, getrocknet und ergibt den Produktstrom Lignin. Aus der restlichen Flüssigphase wird destillativ Lösemittel zurückgewonnen und der C5-zuckerreiche Sumpfstrom wird zusammen mit den organischen Resten aus der Ethanolaukonzentrierung (sogenannte Schlempe) einem Biogasfermenter zugeführt. Dieser setzt die Organik der beiden Stoffströme zu methanreichem Biogas um. Das mit Verunreinigungen beladene Biogas wird mittels Druckwasserwäsche so aufbereitet, dass ein CH<sub>4</sub>-Gehalt von 98 Vol.-% (Biomethan) erreicht wird und es als Erdgassubstitut genutzt werden kann.
- Bioraffineriekonzept 2: Abweichend vom Konzept 1 entfällt der Prozessschritt der Dehydratation des Ethanols zu Ethylen. Das heißt, als Primärprodukt wird Ethanol mit einer Reinheit von 99,5 Vol.-% gewonnen. Um diese Qualität zu erreichen sind neben Destillation und Rektifikation nachgeschaltete Molekularsiebe zur weiteren Entwässerung des aufkonzentrierten Ethanols notwendig.
- Bioraffineriekonzept 3: Anders als in Konzept 2 werden die C5- und C6-Zucker fermentativ zu Milchsäure und nicht zu Ethanol umgesetzt. Während dieser Art der Fermentation fällt als Nebenprodukt Calciumsulfat (CaSO<sub>4</sub>) an, welches nach seiner Abtrennung veräußert werden kann. Die Rohmilchsäure wird in einer Verschaltung aus reaktiver Rektifikation, Hydrolyse und mehreren Destillationskolonnen bis zur „polymer-grade“ Milchsäure (99 Ma.-%) aufgearbeitet. Die bei der Produktaufreinigung anfallenden organischen Reste werden ähnlich der Schlempe dem Biogasfermenter zugeführt.

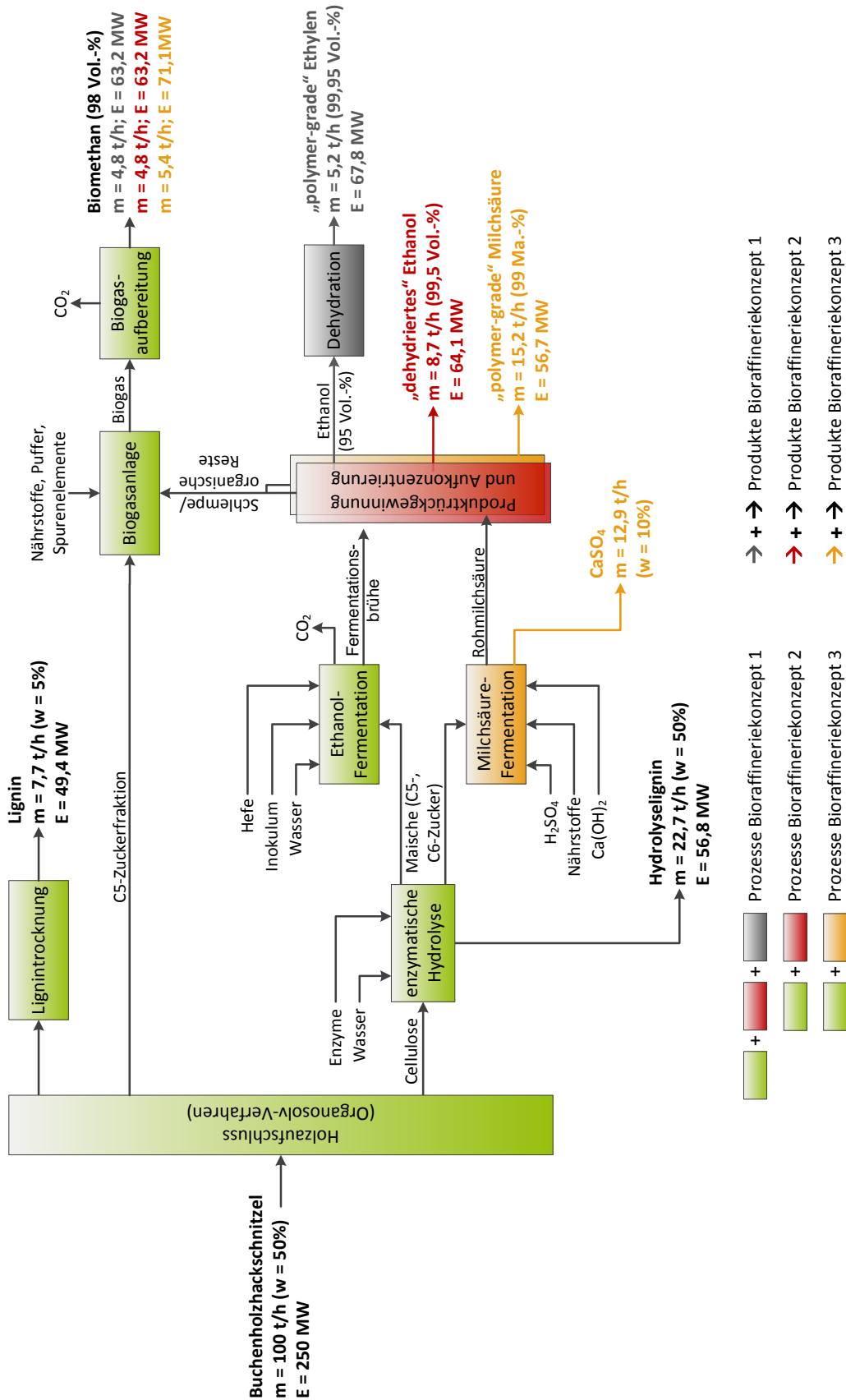


Abbildung 2: Blockfließbilder inklusive Massen- (m) und Energiebilanz (E) der drei untersuchten Bioraffineriekonzepte.

Die Identifikation geeigneter Optimierungsalternativen für die Bioraffineriekonzepte fand iterativ anhand der Nachhaltigkeitsbewertung und der daraus resultierenden und entscheidenden ökonomischen und ökologischen Parameter statt (Abbildung 1 bzw. Absatz 2.2). Vorwegnehmend ist festzustellen, dass die Minimierung des Prozessdampfes und anderer Prozessenergie sowie die Verwertung weiterer Nebenprodukte aktuell die größten Optimierungspotenziale aufzeigen. Die bilanzierten und bewerteten Optimierungsalternativen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Fünf Optimierungs- / Konzeptalternativen, welche jeweils auf die Bioraffineriekonzepte 1, 2 und 3 angewandt sowie bilanziert und bewertet wurden.

Optimierungsalternative	Beschreibung
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energetische Optimierung von Separationskolonnen und Verdampfern mittels Sensitivitätsanalysen, mechanischer Brüdenverdichtung und thermischer Koppelung</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prozessübergreifende Optimierung des Gesamtenergieverbrauchs durch Wärmeintegration mittels Pinch-Analyse; optimiertes Wärmeübertragernetzwerk</li> <li>Aufbauend auf Alternative 1</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interne Enzym- und / oder Inokulumproduktion</li> <li>Aufbauend auf Alternative 2</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identifikation und Nutzbarmachung weiterer Nebenprodukte</li> <li><u>Bspw.:</u> (i) CO<sub>2</sub>-Aufreinigung und Verflüssigung aus alkoholischer Fermentation, (ii) gezielte Aufarbeitung von CaSO<sub>4</sub> aus Milchsäurefermentation</li> <li>Um Bewertungsergebnisse für eine Vielzahl an verschiedenen Konzeptalternativen zu erhalten, baut Optimierungsalternative 4 auf Alternative 2 und / oder 3 auf</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interne Energiebereitstellung durch Verbrennung von Hydrolyselignin und / oder Biomethan in einer KWK-Anlage</li> <li>Um Bewertungsergebnisse für eine Vielzahl an verschiedenen Konzeptalternativen zu erhalten, baut Optimierungsalternative 5 auf Alternative 2, 3 und / oder 4 auf</li> </ul>

## 2.2 Nachhaltigkeitsbewertung

Die Nachhaltigkeitsbewertung der verschiedenen buchenholz-basierten Bioraffineriekonzepte erfolgte innerhalb des Projektes hinsichtlich zweier Ziele:

1. Der Bau und Betrieb einer Bioraffinerieanlage ist aus Investorensicht wirtschaftlich.
2. Die durch die Bioraffinerie erzeugten Produkte resultieren gegenüber herkömmlichen Referenzprodukten über den kompletten Lebensweg in geringeren Umweltauswirkungen.

**Ökonomische Analyse.** Innerhalb der ökonomischen Bewertung wurde mittels einer dynamischen Investitionsrechnung untersucht, inwieweit die aufgestellten Konzepte aus Investorensicht im großtechnischen Maßstab profitabel betrieben werden können. In Tabelle 2 sind die Indikatoren Kapitalwert, interner Zinsfuß und Amortisationsdauer dargestellt, welche Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der dargestellten Konzepte erlauben. Dabei ist ersichtlich, dass das Konzept 1 trotz verschiedener Optimierungsvarianten (z. B. Konzept 1.2) nicht wirtschaftlich wird (Kapitalwert < 0). Dies liegt insbesondere daran, dass die Kosten des erhöhten Aufwands nicht durch die zu erwartenden Erlöse der Ethylenveräußerung in ausreichendem Maße gedeckt werden können. Im Gegensatz dazu erscheinen die Konzepte, bei denen die Dehydratation des Ethanols zu Ethylen weggelassen wird – also Ethanol anstatt Ethylen produziert wird (Konzept 2.2) – und auch das Milchsäurekonzept (Konzept 3.2) ökonomisch vielversprechend. Aussagen zum Einfluss

der wesentlichen Kenngrößen auf die Wirtschaftlichkeit sowie die Robustheit der Konzepte erlauben detaillierte Sensitivitätsanalysen (z. B. in Nitzsche et al., 2016). Insbesondere Preisannahmen für Rohstoffe (Holz) und Produkte (Ethylen, Organosolv-Lignin, Ethanol und Milchsäure) können einen erheblichen Einfluss auf die Bewertung der Wirtschaftlichkeit haben. So wurde beispielsweise für das Basisszenario folgendes angenommen: Betrachtungszeitraum 30 Jahre, kalkulatorischer Zins (nominell) 8,27 %, Buchholz zu 100 EUR / t (atro), Prozessenergie Dampf zu 23,5 EUR / t bzw. Elektrizität zu 9 EURct / kWh, Abwasser zu 2 EUR / m<sup>3</sup>, Erlöse für Ethylen zu 1.325 EUR / t, Lignin zu 630 EUR / t, Biomethan zu 3 EURct / kWh, Hydrolyse-Lignin zu 5 EUR / GJ, Ethanol zu 847,5 EUR / t, Kaliumsulfat zu 150 EUR / t und Milchsäure zu 1.100 EUR / t.

Tabelle 2: Exemplarische Annahmen für das Basisszenario und damit ermittelte ökonomische Kennwerte ausgewählter Bioraffineriekonzepte.

	Ethylen-Startpunkt (Konzept 1)	Ethylen-optimiert (Konzept 1.2)	Ethanol (Konzept 2.2)	Milchsäure (Konzept 3.2)
Fixe Investition	166,2 Mio. EUR	200,0 Mio. EUR	180,7 Mio. EUR	211,0 Mio. EUR
Personalkosten	6,1 Mio. EUR / a	6,8 Mio. EUR / a	5,4 Mio. EUR / a	7,8 Mio. EUR / a
Verwaltung und Versicherung	2,9 Mio. EUR / a	3,4 Mio. EUR / a	2,9 Mio. EUR / a	3,7 Mio. EUR / a
Kapitalwert	-261.488.564 EUR	-9.124.798 EUR	89.057.690 EUR	487.814.521 EUR
Interner Zinsfuß	—	7,95 %	11,40 %	20,66 %
Amortisationsdauer (dynamisch)	—	—	16,4 Jahre	6,4 Jahre

**Ökobilanzierung.** Um Aussagen über die ökologische Vorteilhaftigkeit der verschiedenen Bioraffineriekonzepte treffen zu können, wurden vergleichende Ökobilanzierungen durchgeführt. Dabei wurden verschiedene methodische Herausforderungen berücksichtigt. Dazu zählen (i) die Schaffung der Nutzengleichheit bei Vergleichen von Multiprodukttechnologien wie Bioraffinerien, (ii) die Beachtung der limitierten Verfügbarkeit von Biomasseressourcen und (iii) die Erfordernis der effizienten Sachbilanzierung bei der Technologiebewertung.

Die Nutzengleichheit wurde über einen Vergleich der Bioraffineriekonzepte mit aktuell verfügbaren Referenztechnologien sichergestellt. Das Referenzsystem beruht dabei auf herkömmlichen Technologien um die entsprechenden Referenzprodukte zu erzeugen. Am Beispiel des Bioraffineriekonzepts 1.2 bedeutet dies, dass für die Produkte Ethylen, Lignin, Biomethan und Hydrolyselignin aktuell genutzte Technologien als Vergleichsbasis gewählt wurden, mit Hilfe derer heutzutage diese Produkte und den damit einhergehenden Nutzen bereitgestellt werden. Die für die Ökobilanzierung erforderliche Wirkungsabschätzung kann mit Hilfe verschiedener Methoden erfolgen. Abbildung 3 zeigt die Gegenüberstellung des Bioraffineriekonzepts 1.2 zum entsprechenden Referenzsystem anhand von empfohlenen Indikatoren für verschiedene Wirkungskategorien. Für einige Wirkungskategorien wie „Globale Erwärmung“ und „Ressourcenverbrauch“ ergeben sich so entscheidende Einsparungen gegenüber herkömmlichen (fossilen) Verfahren. In anderen Kategorien wie „Erdeutrophierung“, „Humantoxizität“ und „Feinstaubbildung“ kommt es dagegen zu höheren Indikatorergebnissen.

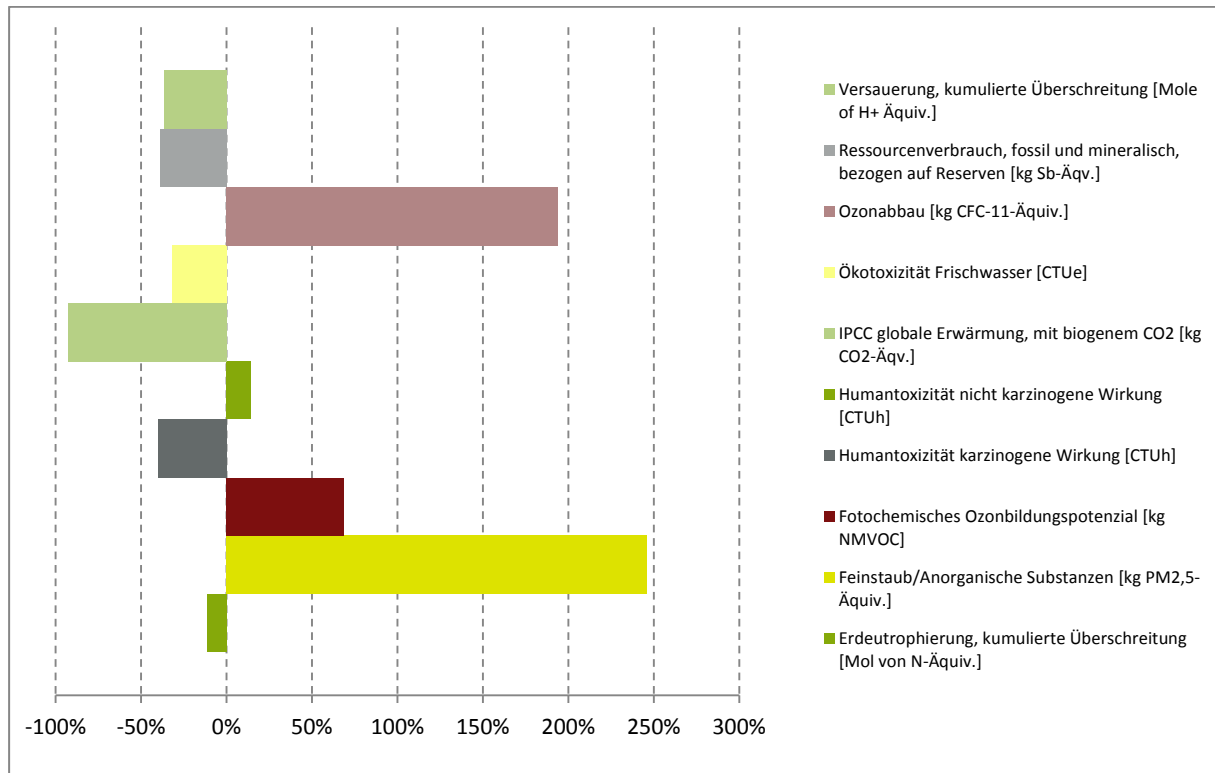


Abbildung 3: Vergleich des Bioraffineriekonzepts 1.2 gegenüber der entsprechenden Referenz anhand verschiedener Wirkungskategorien (ILCD-Empfehlung). Ein negatives Vorzeichen zeigt Einsparungen der Bioraffinerie gegenüber dem Referenzsystem an.

**ReCiPe Methode.** Da die einzelnen Wirkungskategorien unterschiedliche gesellschaftliche Präferenzen haben, ist es mit ihnen zunächst nicht möglich eine allgemeine Aussage hinsichtlich der ökologischen Vorteilhaftigkeit der Konzepte zu machen. So können beispielsweise die Kategorien „Globale Erwärmung“ und „Ressourcenverbrauch“ als relevanter eingeschätzt werden als „Erdeutrophierung“, „Humantoxizität“ und „Feinstaubbildung“. Eine systematische Gewichtung wurde daher durch den Einsatz der ReCiPe-Methode möglich gemacht. Bei dieser Methode wird für jede Wirkungskategorie ReCiPe-Punkte ermittelt und zu einem vergleichbaren Gesamtwert je Konzept summiert. Die dazugehörigen Schritte der Normierung und Gewichtung der Indikatorergebnisse sind mit zusätzlichen Unsicherheiten verbunden. Jedoch werden diese hier in Kauf genommen, da demgegenüber eine erhöhte Aussagekraft der ermittelten Ergebnisse steht. Es wird ersichtlich, dass für alle dargestellten Konzepte insgesamt potentielle Umweltauswirkungen eingespart werden können (Tabelle 3).



Tabelle 3: Vergleichende Ökobilanzergebnisse der Bioraffineriekonzepte gegenüber den Referenzsystemen (ReCiPe- Methode).

Wirkungskategorie	BR 1 vs. Ref. 1	BR 1.2 vs. Ref. 1.2	BR 2.2 vs. Ref. 2.2	BR 3.2 vs. Ref. 3.2
	Δ ReCiPe-Punkte pro Jahr	Δ ReCiPe-Punkte pro Jahr	Δ ReCiPe-Punkte pro Jahr	Δ ReCiPe-Punkte pro Jahr
Eutrophierung, Frischwasser	9,56E-04	2,79E-03	2,47E-03	8,24E-03
Feinstaubbildung	7,04E+00	-2,22E+01	-2,26E+01	1,60E+00
Frischwasser Ökotoxizität	1,43E-03	-3,14E-03	-3,11E-03	4,00E-04
Humantoxizität	2,04E+01	-8,86E+00	-9,63E+00	2,44E+01
Ionisierende Strahlung	1,08E+02	1,68E-01	1,57E-01	1,73E+02
Klimawandel, menschliche Gesundheit	-2,33E+02	-6,87E+02	-6,51E+02	-6,00E+02
Klimawandel, Ökosystem	-1,46E+01	-4,30E+01	-4,07E+01	-3,74E+01
Landwirtschaftl. Landnutzung	1,76E+01	1,91E+01	1,91E+01	1,86E+01
Natürliche Landumwandlung	1,51E-01	-4,91E-01	-6,72E-01	-1,21E-01
Ozonabbau	9,41E-01	8,01E-02	-1,56E-01	1,74E+00
Photochemische Oxidation	2,70E-02	1,12E-02	1,09E-02	-7,04E-03
Seewasser Ökotoxizität	3,28E-04	4,95E-04	4,34E-04	1,45E-03
Terrestrische Ökotoxizität	4,39E-01	5,47E-01	5,75E-01	1,09E+00
Terrestrische Versauerung	-6,24E-03	-1,99E-02	-2,25E-02	-2,54E-02
Urbane Landnutzung	3,15E-01	3,45E-01	3,34E-01	3,79E-01
Verbrauch fossiler Rohstoffe	-7,29E+02	-1,66E+03	-1,60E+03	-1,78E+03
Verbrauch von Metallen	-5,51E+00	-2,72E+00	-3,13E+00	-8,80E-01
Gesamt	-8,26E+02	-2,41E+03	-2,31E+03	-2,18E+03

**Öko-Effektivitätsbewertung.** Die Beurteilung von Bioraffineriekonzepten anhand der zuvor erwähnten ökonomischen und ökologischen Kriterien lässt sich zudem als eine Art Öko-Effektivitätsbewertung<sup>3</sup> verstehen, da explizite ökonomische und ökologische Zielgrößen identifiziert und hinsichtlich des Zielerreichungsgrades geprüft werden. Aus der zusammenführenden Betrachtung der beiden ökonomischen und ökologischen Kriterien wird ersichtlich, dass durch die iterative Vorgehensweise beim Prozess-Design ausgehend von Bioraffineriekonzept 1 über die Konzepte 1.2 und 2.2 bis zum Bioraffineriekonzept 3.2 eine schrittweise Verbesserung hinsichtlich der Ökoeffektivität erfolgte (Abbildung 4).

<sup>3</sup> Im Vergleich dazu ermitteln Öko-Effizienzansätze ein Verhältniswert zwischen (wirtschaftlichen) Wert eines Produktes im Zähler und den damit verbundenen Umweltauswirkungen im Nenner. Jedoch wird durch dieses Vorgehen die Einordnung bzw. Interpretation der Ergebnisse dahingehend erschwert, als dass diese Werte ausschließlich dazu geeignet sind zu beurteilen ob „die Dinge richtig getan werden“ nicht jedoch ob die „richtigen Dinge getan werden“.

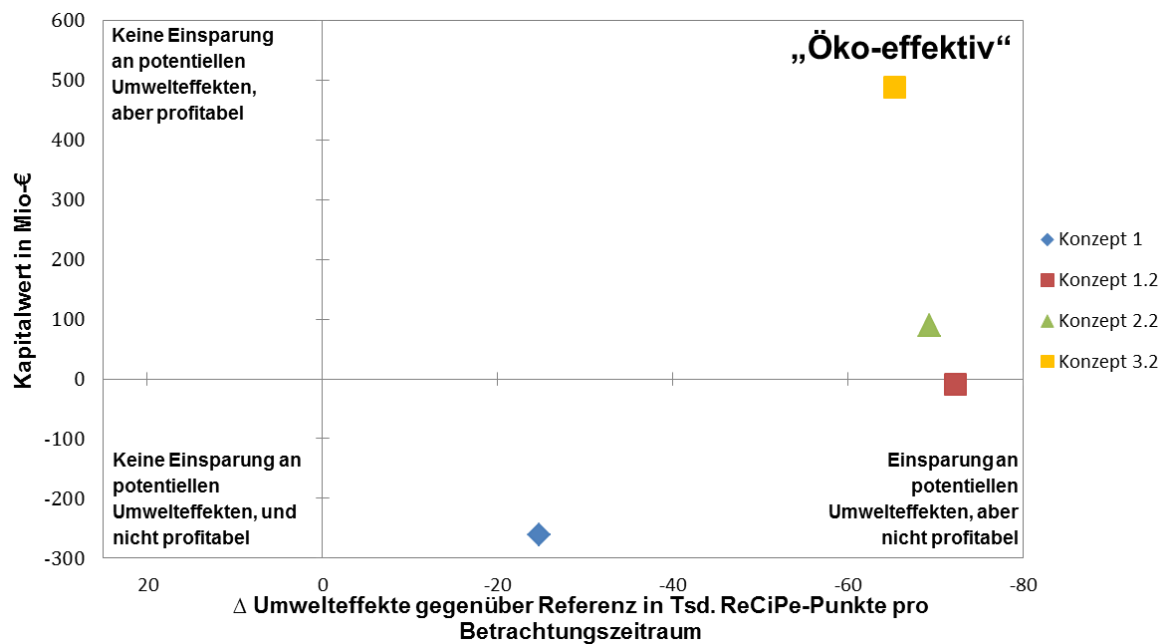


Abbildung 4: Vergleich der Bioraffineriekonzepte anhand der hier verwendeten Kriterien der "Öko-Effektivität"

### 3 Kernaussagen

Auf Grundlage der durchgeführten Anlagenbilanzierung und -bewertung lassen sich folgende Kernaussagen ableiten:

1. Die untersuchten Bioraffineriekonzepte wurden in Anlehnung an die im Spitzencluster BioEconomy entwickelten Technologien, ausgehend von belastbaren Literaturdaten, konzeptioniert und bilanziert. Tendenziell ist festzustellen, dass die drei Bioraffineriekonzepte einen hohen Bedarf an Prozesswasser haben und demnach große Mengen an Prozessenergie, insbesondere Prozessdampf, für z. B. die Produktaufreinigung und -rückgewinnung benötigten. Die Anwendung gezielter Optimierungsmethoden (z. B. Wärmeintegration) ist daher besonders wichtig, da so der Bedarf an Prozesswasser und -energie deutlich gesenkt werden kann.
2. Der Erfolg der hier untersuchten Bioraffineriekonzepte entscheidet sich über die möglichst vollständige und wirtschaftliche Verwendung aller Rohstoffkomponenten. Die Hemicellulosefraktion wird in den drei untersuchten Konzepten zur anaeroben Erzeugung von Biomethan genutzt. Die Nutzung dieser Fraktion zur gezielten Erzeugung von höherwertigen Chemikalien, wie z. B. Zuckern, Furanen und / oder organischen Säuren über hydrothermale und / oder fermentative Wege verspricht darüber hinaus großes Potenzial. Hierfür bedarf es weiterer Forschung.
3. Der Bau und Betrieb von buchenholz-basierten Bioraffinerien im großtechnischen Maßstab kann wirtschaftlich sein. Hier spielen die Zahlungsbereitschaft für biobasierte Produkte und die Preisentwicklung von fossilen Referenzen eine entscheidende Rolle.
4. Um gezielt Grundchemikalien (z. B. Ethylen) aus Biomasse zu gewinnen sind große Rohstoffkapazitäten von mindestens 400.000 t/a (atro) notwendig, um zum einen konkurrenzfähig gegenüber fossilen Quellen zu sein und zum anderen um ein spürbares

Potenzial für Substitutionen zu bilden. Die Produktion von Spezialchemikalien, wie z. B. Milchsäure oder anderen Nischenprodukten kann dagegen schon in kleineren Dimensionen lohnend sein.

5. Alle dargestellten Bioraffineriekonzepte zeigen für die Wirkungskategorien „Globale Erwärmung“ und „Ressourcenverbrauch“ entscheidende Einsparungen gegenüber herkömmlichen (fossilen) Verfahren. In den Kategorien „Eutrophierung“, „Toxizität“ und „Feinstaubbildung“ kommt es zu höheren Indikatorergebnissen. Deren Bedeutung wird jedoch bei der Anwendung einer Normierung und Gewichtung anhand gesellschaftlicher Präferenzen nicht so hoch eingeschätzt wie die eingesparten Effekte in den Kategorien „Globale Erwärmung“ und „Ressourcenverbrauch“.
6. Methoden des Prozessdesigns und der ökobilanziellen Bewertung wurden für die Anwendung auf Bioraffineriekonzepte weiterentwickelt. Dabei fanden insbesondere im Rahmen der Ökobilanzbewertung und Öko-Effektivitäts-Analyse methodische Herausforderungen Berücksichtigung, die grundsätzlich bei allen neu entwickelten biobasierten Technologien auftreten. Zudem sind die im Projekt (weiter-)entwickelten Ansätze auch auf nicht-biobasierte Technologien übertragbar.

#### **4 Weiterer Forschungsbedarf**

Resultierend daraus ergibt sich der folgende, weiterführende Forschungsbedarf:

1. Die für die Validierung der entwickelten Bewertungsmethoden (Abbildung 1) verwendeten Eingangsdaten für die Massen- und Energiebilanzen, die Kostenrechnung und die Ökobilanzierung stammen vornehmlich aus aktuellen Veröffentlichungen und aus Datensätzen für Standardprozesse. Weiterführende Arbeiten zur Anlagendimensionierung / -auslegung, zur Abschätzung des „Technology Readiness Level“ (TRL) von Prozessen und zur ökonomischen und ökologischen Analyse bedürfen belastbarer Daten aus der Praxis / Wirtschaft.
2. Der entwickelte Bewertungsansatz ist anlagenbezogen und erlaubt die Bewertung neuer Produkte aus Bioraffineriekonzepten. Für eine umfassende Diskussion über die Nachhaltigkeit von Bioraffinerien und der Bioökonomie im Allgemeinen sind aufbauend auf diesem Ansatz weiterführende Ansätze (z. B. Input-Output-Analysen) nötig.
3. Die Kopplung der hier angewandten Methoden (i) Prozesssimulation, (ii) Kostenrechnung und (iii) Ökobilanzierung ist von hohem Interesse. Dies kann zum einen durch die Entwicklung eines Softwarepaketes geschehen, innerhalb welchem die drei genannten Aufgabenfelder simultan bearbeitet werden können. Zum anderen können Schnittstellen zwischen bereits existierenden und für die relevanten Aufgabenfelder spezialisierten Softwares entwickelt werden.
4. Weitere Anknüpfungspunkte und Forschungsfragen hinsichtlich der entwickelten Methode sind die Methodvalidierung für weitere Prozesse sowie Unterstützung bei der Erarbeitung weiterer Standards.

## 5 Ausgewählte Publikationen (Stand 01 / 2016)

- Budzinski, M.; Nitzsche, R. (2014): Development of more sustainable wood-based biorefinery concepts using eco-efficiency analysis. Vortrag gehalten: 10th International Conference on Renewable Resources and Biorefineries. Am 05.06.2014 in Valladolid, Spanien.
- Budzinski, M.; Nitzsche, R.; Gröngröft, A.; Majer, S. (2014): Nachhaltige Erzeugung von Plattformchemikalien durch Bioraffinerien?! – eine ökologische und ökonomische Betrachtung. In: Tagungsband 10th naro.tech Erfurt.
- Budzinski, M.; Nitzsche, R.; Gröngröft, A.; Majer, S. (2014): Nachhaltige Erzeugung von Plattformchemikalien?!- Eine ökologische und ökonomische Betrachtung. Vortrag gehalten: Naro.tech – 10. Internationales Symposium. Am 17.09.2014 in Erfurt.
- Gröngröft, A. (2015): Process simulation and sustainability assessment during conceptual design of biorefinery concepts. Vortrag gehalten: European Congress of Chemical Engineering – ECCE10. Am 30.09.2015 in Nizza, Frankreich.
- Nitzsche, R. (2014): Bewertungsansätze bei der Optimierung von Bioraffinerie-Konzepten. Vortrag gehalten: DBFZ Jahrestagung. Am 01.10.2014 in Leipzig.
- Nitzsche, R.; Budzinski, M. (2015): A methodological approach for the assessment and optimization of wood based biorefinery concepts (Posterpräsentation auf der IEA Bioenergy Conference, Berlin).
- Nitzsche, R.; Budzinski, M. (2015): A methodological approach for the assessment and optimization of wood based biorefinery concepts. Vortrag gehalten: BioConSept Exploitation Event. Am 10.11.2015 in Merseburg.
- Nitzsche, R.; Budzinski, M.; Gröngröft, A. (2016): Techno-economic assessment of a wood-based biorefinery concept for the production of polymer-grade ethylene, organosolv lignin and fuel. In: Bioresource Technology. Bd. 200. S. 928–939. doi: 10.1016/j.biortech.2015.11.008.
- Nitzsche, R.; Budzinski, M.; Gröngröft, A.; Majer, S. (2014): Bewertungsansätze bei der Optimierung von Bioraffineriekonzepten. In: Tagungsband DBFZ-Jahrestagung. S. 57–68. ISSN 2199-9384.
- Nitzsche, R.; Budzinski, M.; Müller-Langer, F.; Gröngröft, A.; Majer, S. (2015): A methodological approach for the assessment and optimization of wood based biorefinery concepts. Posterpräsentation auf der 23rd European Biomass Conference and Exhibition, Wien (Österreich).