

# SUMINISTRO - Sustainability Monitoring Index for assessing regional bio-based Industry Networks

---

## Projektmitwirkende und Autoren:

**M. Sc. Jakob Hildebrandt**

**Dipl. Kfm. Maik Budzinski**

**Dr. mont. Alberto Bezama**

**Dr. rer. nat. Sinéad O’Keeffe**

**Prof. Dr. Ing. Daniela Thrän**

**M. Sc. Anne Jähkel**

Helmholtz Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ  
Department Bioenergie  
Postanschrift: Postfach 500 136, 04301 Leipzig  
Besucheradresse: Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig  
Tel.: +49 341 235-1267  
[www.ufz.de](http://www.ufz.de)

Ansprechpartner:  
Dr. mont. Alberto Bezama  
Tel.: +49 341 243 4579  
Email: [alberto.bezama@ufz.de](mailto:alberto.bezama@ufz.de)



**Deutsches Biomasseforschungszentrum**  
gemeinnützige GmbH



## Inhaltsverzeichnis

1 Hintergrund und Zielstellungen.....	4
1.1 Erweiterte Lebenszyklusanalyse regionaler Bioökonomie-Netzwerke .....	5
1.2 Nachhaltigkeitsmonitoring .....	5
2 Erweitere LCA .....	7
2.1 Methoden.....	7
2.2 Ergebnisse .....	11
3 Nachhaltigkeitsmonitoring .....	15
3.1 Methoden.....	15
3.2 Ergebnisse .....	16
4 Zusammenfassung .....	20
5 Ausblick – Weiterer Forschungsbedarf.....	21
6 Literaturverzeichnis.....	22
7 Entstandene Publikationen bezüglich der Entwicklung von SUMINISTRO .....	24

## Erklärung

Alle nachstehenden Informationen, soweit nicht anders vermerkt, entstammen den Publikationen Hildebrandt et al. (in review) [7], Hildebrandt et al. (2017d) [13], Hildebrandt et al. (2017e) [14] sowie der aktuell an der Universität Leipzig (Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät) eingereichten Dissertation von J. Hildebrandt: „Monitoring the sustainability of added-value networks within bioeconomy regions - Establishing a MCDA aggregation procedure (“SUMINISTRO”) and applying it to the practical case of the Leading-Edge Cluster BioEconomy -“ (Hildebrandt et al., 2018a, [10]). Es wird im Folgenden darauf verzichtet Einzelverweise auf diese Publikationen vorzunehmen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 031A078A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

*Anmerkung:* Die verwendete Sprachform verzichtet im Sinne einer guten Lesbarkeit, grammatikalisch wie orthografischen Korrektheit auf genderdiskriminierungsfreie Sprachformen. Es sei aber an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass bei nicht genderspezifischen Formen und Kontexten generell alle Menschen unabhängig ihrer individuellen Identifikation oder sozialen Zuschreibung gemeint sind.

## 1 Hintergrund und Zielstellungen

Das Konzept der „Bioökonomieregionen“ gewinnt kontinuierlich an Bedeutung, wie auch aus der Position des Ausschusses der Regionen, eine Vereinigung von regionalen und lokalen Vertretern der EU, hervorgeht: für eine hoch konkurrenzfähige Bioökonomie sei eine „Langzeit ... Kooperation unter allen Stakeholdern entlang der Wertschöpfungskette“ und „für eine optimale Nutzung natürlicher Ressourcen enge Vernetzungen zwischen Landwirtschaft, Bioökonomie und Wissenschaft“ notwendig (Ausschuss der Regionen, 2013). Im vorliegenden Bericht wird eine Bioökonomieregion als eine Region mit unterschiedlichen, holzbasierten Industriezweigen definiert, welche auf die Versorgung von begrenzter Biomasse aus denselben Nutzholzbeständen angewiesen sind und somit nach einer intensiveren Zusammenarbeit in strategischen Verbänden streben. Letztere können die Umsetzung von Verbundproduktionssystemen unterschiedlicher Sektoren begünstigen, um die Wertschöpfung aus Nebenprodukten als auch die Ausdehnung von Optionen für die Verarbeitung sekundärer Holzmaterialien zu erhöhen und damit Konflikte um Ressourcen zu mindern als auch die Ressourcennutzungseffizienz zu steigern (Walther, 2010).

Eine effektive und aktuell weltweit immer häufiger angewendete Umsetzung dieser Zielsetzung ist die strategische Vernetzung von neugeschaffenen Biotechnologie- und Chemie-Clustern mit bereits existierenden regionalen Forst- und Holzwirtschafts-Clustern (Imperial College London et al., 2015; Wurpts, 2013; Cappellin und Wink, 2009). Somit wird die gegenseitige Befruchtung durch Ideen- und Wissenstransfer zwischen regionalen Unternehmen und Gemeinden gefördert, anhand von innovativen Partnerschaften, z.B. beim Upscaling neuer Konversionsprozesse in FuE-Testanlagen oder bei der Entwicklung neuer biobasierter Systemlösungen für den Automobil- und Bausektor (Imperial College London et al., 2015; Nita et al., 2013; Jukka Teräs et al., 2014).

Um diese Innovationspartnerschaften zu unterstützen müssen weiterentwickelte Systeme zur Entscheidungshilfe in einem Nachhaltigkeitsmonitoring eingeführt werden, wodurch alternative Optionen für die Sektoren übergreifende Gemeinschaftsproduktionen und die Kaskadennutzung von sekundären Holzressourcen bewertet werden können. Ein Nachhaltigkeitsmonitoring von biobasierten Produkten, welche insbesondere in Produktionsnetzwerken einer Bioökonomieregion produziert wurden, kann eine weitere Verbesserung des IST-Zustandes ermöglichen. Diese Art neuer Monitoringkonzepte zielt nicht nur auf das Monitoring der Einflüsse von Bioökonomiestrategien auf die Nutzung regional begrenzter Holzressourcen ab, sondern sollte ebenfalls versuchen die gesamten Auswirkungen zukünftiger Angebots- und Nachfragesituationen für Produkte auf die Intensivierung der Biomasseressourcennutzung zu erfassen (Pfau et al. 2014). Herkömmliche Monitoring und Assessment-Tools wie Stoffstromanalysen (MFA material flow analysis), Ökobilanzen (LCA life cycle assessment) und soziale LCA können in einem multikriteriellen Analyseansatz kombiniert werden - als Beitrag zu einer ganzheitlicheren Bewertung von Produktionssystemen - mit ihren ökologischen sowie sozio-ökonomischen Auswirkungen und Vorteilen (Siebert et al., 2018a und b; Massari et al., 2016; Pfau et al., 2014). Diese Weiterentwicklungen des „State of the Art“ bildeten die Grundlage zur Entwicklung des Nachhaltigkeitsmonitoringsystems, welches im Folgenden vorgestellt wird.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Bewertungssystems und einer Gewichtungsmethodik unter Berücksichtigung unterschiedlicher Indikatoren und Kenngrößen in Hinblick auf ein Monitoring und Benchmarking der Stoffströme. Die Erkenntnisse aus der Anlagenbilanzierung und der erweiterten LCA wurden zusammengeführt, um stakeholderspezifische Aspekte ergänzt (z.B. Wertschöpfung) und darauf aufbauend eine Methodik zur Gewichtung von Optimierungskriterien entwickelt (Multikriterien-Bewertung).

## 1.1 Erweiterte Lebenszyklusanalyse regionaler Bioökonomie-Netzwerke

Als Grundlage für das Nachhaltigkeitsmonitoring wird die Methode der Lebenszyklusanalyse (LCA) vorangestellt beschrieben. In den letzten Jahren hat die LCA in verschiedenen Bereichen eine weite Verbreitung gefunden und wird neben der Anwendung in Unternehmen und Wissenschaft häufig auch in der Politik zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen eingesetzt. Das Vorgehen ist in den internationalen Normen ISO 14040 und 14044 zur Ökobilanzierung definiert. Die LCA ist ein Instrument, welches es ermöglicht, die Umweltwirkungen des Herstellungsprozesses eines Produkts oder der Bereitstellung einer sonstigen „Leistung“ abschätzen zu können (Thrän und Bezama, 2017). Dazu zählen die Identifikation von Schwachstellen und Risiken sowie das Aufzeigen von Optimierungspotenzialen. Des Weiteren analysiert und vergleicht die LCA Prozessketten und erkennt systemimmanente Wechselwirkungen und Synergien (Bezama, 2016). Im Falle der Bewertung eines Produktes wird dessen gesamter Lebenszyklus von der Herstellung bis zur endgültigen Entsorgung und Recycling betrachtet (Budzinski und Nitzsche, 2016).

Vor dem Hintergrund der gegenwärtigen Klimaschutzpolitik stellt die Vermeidung von Treibhausgasen einen relevanten Wettbewerbsvorteil dar. Für eine Bewertung von Produkten unter diesem Aspekt ist der „Product Carbon Footprint“ (CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Produkten) verbreitet. Der hierfür verwendete Standard ist ISO/TS 14067, welcher methodisch stark mit dem der Ökobilanz übereinstimmt. Ein Hauptkritikpunkt besteht in der bisher eindimensionalen Bewertung der Klimaschutzeffekte. Neben der Abschätzung der verschiedenen Umweltwirkungen kann ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt werden, der auch ökonomische, soziale und technologische Aspekte in die Betrachtungen einbezieht (Life Cycle Costing, Social LCA) (Ingrao et al., 2016).

Die potenziellen ökologischen Vorteile der synergistischen Prozessführung und der gekoppelten Nutzung von Holzressourcen im BioEconomy Spitzencluster in Mitteldeutschland (SCBE) zu identifizieren, war Ziel der Forschung. Dies geschah in Zusammenarbeit mit den verschiedenen Industriepartnern des SCBE (z.B. Krombholz et al., 2015, Hildebrandt, 2015 [18], Budzinski und Nitzsche, 2016, Nitzsche et al., 2016).

Es wurde ein integrierter LCA-Ansatz entwickelt, der den regionalen „konventionellen Produktkorb“ und einen zukünftigen regionalen „biobasierten Produktkorb“ identifiziert und anhand von 4 Szenarien (S1-S4) die folgenden Fragen zu beantworten versucht:

- (i) Wie unterscheiden sich die LCA-Ergebnisse zwischen konventionell organisierten Wertschöpfungsketten (S1-lineare Ketten) und einem Satz von drei zukünftigen zunehmend synergetischen und biobasierten Ketten (S 2-4)?
- (ii) Wo liegen die ökologischen Hotspots entlang der regionalen Bioökonomie-Netzwerke?
- (iii) Wird die ökologische Nachhaltigkeit im Bioökonomie-Netzwerk durch a) die Substitution von Altholz zur Erzeugung von Prozesswärme und -dampf und b) biobasierten Alternativen für Harze und Klebstoffe erhöht?

## 1.2 Nachhaltigkeitsmonitoring

Ein Nachhaltigkeitsmonitoring hat zum Ziel wesentliche Nachhaltigkeitsfaktoren zu beschreiben und nachzuverfolgen. Nachhaltigkeit umfasst hierbei unterschiedliche Dimensionen (ökonomisch, ökologisch, sozial) und unterschiedliche Qualitäten von Indikatoren (qualitativ / quantitativ). Das Monitoring bedarf daher einer Zusammenführung der verschiedenen Dimensionen und Qualitäten als auch einer Entscheidung über deren Bedeutung. In den vergangenen Jahren wurden Methoden und Modelle entwickelt, um die Entscheidungsfindung effektiv zu gestalten, wobei traditionell die

Zusammenführung in einem eindimensionalen Entscheidungssystem erfolgt (Bezama et al., in prep [4]). Dabei werden jedoch wichtige Aspekte und Eigenschaften, die mehrere Wertesysteme betreffen, vernachlässigt bzw. stark vereinfacht. Aus diesem Grund wurde die „Multikriterielle Entscheidungsanalyse“ (MCDA – multi criteria desiscion analysis) entwickelt, welche diese Punkte berücksichtigt und auf einer größeren Anzahl von Kriterien beruht (Budzinski et al., eingereicht). Der „Analytische Hierarchieprozess“ und dessen Weiterentwicklung, der „Analytische Netzwerkprozess“, sind Methoden der Priorisierung, um Entscheidungen numerisch, auf einer absoluten Skala darzustellen [5].

Mit der wachsenden Bedeutung von Nachhaltigkeitsaspekten sind in einer Bioökonomieregion agierende Industrien gezwungen, ihre Prozesse und Produkte nicht nur betriebswirtschaftlich, sondern auch nach sozialen und ökologischen Kriterien zu bewerten. Dies kann zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit führen, dank nachgewiesenen nachhaltiger Produktqualitäten, aber ebenso zu einer effizienteren Produktion, Innovationen und einer nachhaltigen regionalen Entwicklung, die beispielsweise Arbeitsplätze generiert [6]. Eine vollständige Abschätzung der Nachhaltigkeit von potentiellen zukünftigen Alternativen ist in einem komplexen Sektor nur möglich, wenn alle Aspekte gemeinsam betrachtet werden und in die Entscheidungsbildung einfließen. Somit wird eine umfassende Bewertung der Nachhaltigkeit möglich. Monitoringsysteme dieser Art bestehen für einzelne Aspekte bzw. einzelne Unternehmen, jedoch nicht in einem clusterübergreifenden Ansatz entlang einer komplexen Wertschöpfungskette [7].

Im Rahmen des Projekts „Spitzencluster Bioökonomie“ wurde der Rahmen für das Modell SUMINISTRO (Sustainability Monitoring Index for assessing regional bio-based Industry Networks) entwickelt, um alle drei Nachhaltigkeitsdimensionen abzudecken, Nachhaltigkeitsanalysen aus konventionellen Lebenszyklusansätzen zu integrieren (z.B. Sachbilanzen- und Wirkungskategorien) (Massari et al., 2016) sowie sozioökonomische Kriterien, die in einem Rahmen für die soziale Ökobilanz entwickelt wurden (Siebert et al., 2018a), zu berücksichtigen.

Eine praktische Beschreibung des hier vorgestellten MCDA-Tools zur Operationalisierung des Nachhaltigkeitsmonitorings existiert separat in einem Handbuch Hildebrandt et al. (2018b). Ein umfassender Bericht der gesamten Begleitforschung für den SCBE wurde von Thrän et al. (2018) verfasst.

## 2 Erweiterte LCA

### 2.1 Methoden

Vier entwickelte Szenarien untersuchten die Möglichkeiten für eine industrielle Symbiose innerhalb des SCBE. Die Szenarien wurden in Hinblick auf ihre ökologische Nachhaltigkeit in 11 der CML-Wirkungskategorien miteinander verglichen (Methode der Wirkungsanalyse vom Centrum voor Milieukunde (CML) Leiden, Niederlande, entwickelt). Die Szenarien sind in

Abbildung 1 dargestellt. Die einzelnen Wertschöpfungsketten zur Herstellung der auf Holzwerkstoffen basierenden Produkte stammen aus regionalen Beispielen des SCBE mit einer innovativen und effizienten Nutzung von Buchenholz und Hartholzprodukten in Mitteldeutschland (Bezama, 2016; Budzinski und Nitzsche, 2016; Ingrao et al., 2016; Nitzsche et al., 2016; Bezama et al., in review [3]). Die vier Szenarien mit ihren Produktkörben wurden erstellt, um verschiedene mögliche Optionen für die Integration von Wertschöpfungsketten in Mitteldeutschland zu reflektieren und zu bewerten (Zusammenfassung des Integrationslevels je Szenario in Tabelle 1). Der Bilanzierungsraum der Lebenszyklusanalyse ist „Cradle-to-Gate“. Dazu gehören: die vorgelagerten Ketten zur Ernte und zum Transport von industriellem Rundholz sowie die industrielle Produktion von biobasierten Plattformchemikalien, faserverstärkten Verbundwerkstoffen, biobasierten Schaumstoffen und Holzwerkstoffen. Darüber hinaus wurden in Szenario 3 und 4 zum einen die Kaskadennutzung von Altholz zur Bereitstellung von Prozessenergie, zum anderen die Bereitstellung von regional erzeugten biobasierten Harzen und Klebstoffen aufgenommen.

- **S 1 „Konventionelle Produktion“:** Hier wurde angenommen, dass traditionelle Sektoren stark von internationalen Märkten abhängig sind (d.h. abhängig von fossilen Rohstoffen) und es sich um ein „typisches System“ einzelner Wertschöpfungsketten von Holzwerkstoff- und Polymerprodukten handelt, wobei fossilbasierte Hilfs- und Betriebsstoffe ohne vertikale oder horizontale Integration verwendet werden. Alle Unternehmen verlassen sich auf ihre traditionellen Primärressourcen (d.h. Rohstoffe und Energie) und teilen keine Infrastruktur für die Bereitstellung von Wärme, Dampf, Elektrizität oder die Herstellung von Leimen, Fasern, Klebstoffen oder Polymeren.
- **S 2 „Holz auf innovativen Prozesswegen“:** In diesem Szenario kommen die Bioökonomieregionen „in Form“. Eine lignozellulose-verarbeitende Bioraffinerie wurde gebaut und produziert biobasierte Polymere, Lignin-Zwischenprodukte und Energieträger. Die Einführung dieser Bioraffinerie bedeutet die gemeinsame Nutzung von holzbasierten Rohstoffen zwischen der Holzindustrie und der chemischen Industrie. So wird eine vertikale und horizontale Integration mittels Kaskadennutzung erreicht. In diesem ersten Szenario werden jedoch die Prozesse und Anlagen zur Bereitstellung von Wärme, Dampf und Elektrizität noch nicht über die Produktionsstandorte vernetzt und die Gewinnung von Wärme und Dampf (z.B. für die Faser Trocknung und die thermischen Prozesse der Bioraffinerie) geschieht in erster Linie über die Erdgasverfeuerung. Darüber hinaus ist die biobasierte Herstellung von Klebstoffen und Harzen nur in der Lage, 10% der regionalen Nachfrage nach Harzbindemitteln und Klebstoffen zu ersetzen, die bei der Herstellung von Verbundwerkstoffen, Paneelen und Holzwerkstoffen verwendet werden.
- **S 3 „Thermische Kaskaden“:** Hier beginnen sich die Produktionspfade innerhalb der Bioökonomie auch über die erforderlichen Brennstoffe zu integrieren. Die thermische Energie, die für den Betrieb der Bioraffinerieanlage, für den Betrieb des Faserrefiners, die Faser Trocknung sowie die Holz Trocknungs- und Plattenpressverfahren erforderlich sind, werden vollständig durch das Verbrennen von Abfallholz, Rindenresten und sonstige Sägewerknebenprodukte abgedeckt. So wird eine vollständige Substitution des Erdgases

erreicht, indem der Prozessenergiebedarf durch Biomethan und die thermische Verwertung von Reststoffen gedeckt wird. Darüber hinaus wird eine Refiner-Anlage zur Faserbereitstellung gemeinsam von Platten- und Verbundstoffherstellern zur Herstellung von Faserwerkstoffen bei der Herstellung von Verbundwerkstoffen und von Holzwerkstoffen wie Holzfaserdämmplatten und Faserplatten mittlerer Dichte betrieben. Jedoch werden immer noch nur 10% der regionalen Nachfrage nach Harzbindemitteln und Klebstoffen, die bei der Herstellung von Verbundstoffen, Plattenbrettern und Holzwerkstoffprodukten verwendet werden, durch Hartholz-Ethanol-Organosolv-Lignin (HEL) ersetzt.

- **S 4 „Vollständig biobasiert“:** In diesem Szenario interagieren die Bioökonomie-Netzwerke noch mehr und haben einen höheren Integrationsgrad, mittels einer vollständigen Substitution fossiler Harze und Klebstoffe durch biobasierte Klebstoffe und Harze aus Ligninderivaten. Darüber hinaus ist die gesamte für die Produktion benötigte Prozessenergie biobasiert, wobei alle kooperierenden Akteure innerhalb der Lieferketten die Vorteile gemeinsam nutzen.



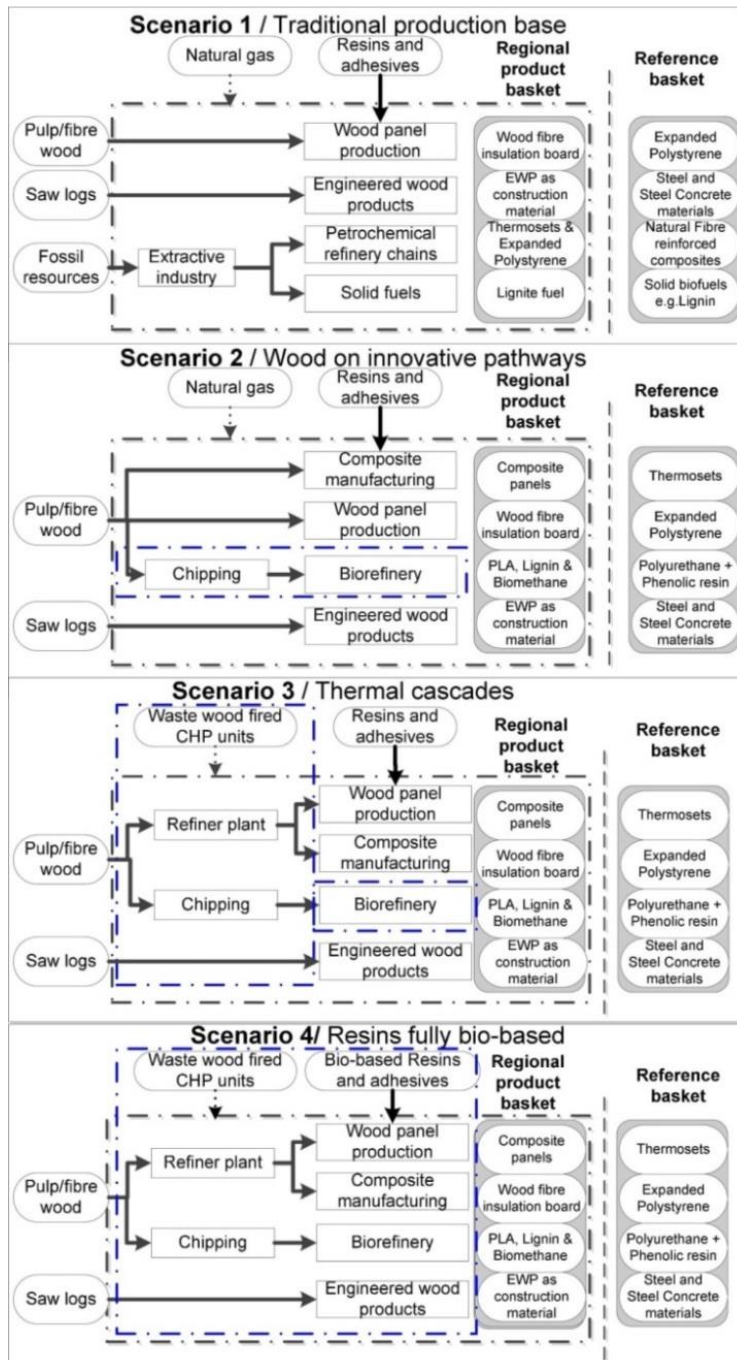


Abbildung 1: Systemgrenzen und Szenarien zur Integration von Wertschöpfungsketten in der holzbasierter Bioökonomie. Für jedes Szenario sind die vor- und nachgelagerten Prozesswege, in denen die Integration stattfindet, mit blauen und gestrichelten Linien markiert. Aus [7].

Tabelle 1: Übersicht zu Integrationslevel der Wertschöpfungsketten in den unterschiedlichen Szenarien. Angepasst aus [7].

Szenario	Ressourcenbasis und Substitution (in %)			
	Kraftstoffe		Materialien	
	<i>fossil</i>	<i>biobasiert</i>	<i>fossil</i>	<i>biobasiert</i>
S1	80	20	80	20
S2	80	20	5 (auxiliar)	95
S3	15 (upstream)	85	5 (auxiliar)	95
S4	10 (upstream)	90	0	100

Die Umweltauswirkungen dieser synergetischen industriellen Verknüpfungen werden als eine Frage von besonderer strategischer Bedeutung betrachtet, da sie nicht nur die Umsetzbarkeit solcher Aktivitäten für die einzelnen Unternehmen, sondern für das gesamte holzbasierte Wertschöpfungsnetzwerk in einer Bioökonomieregion bestimmend sind. Die im nächsten Abschnitt vorgestellten Arbeitsergebnisse bieten einige Antworten darauf. Für die Ökobilanz wurde ein regionales Produktkorbbkonzept verwendet, welches die Definition geeigneter funktioneller Einheiten für jedes einzelne Produkt erlaubt (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2: Definition eines charakteristischen Produkt- und Referenzproduktkorbes und den zugehörigen funktionellen Einheiten für die Fallstudie einer holzbasierten Bioökonomieregion. Aus [7].**

Product category	Wood-based products	Reference Products	Product applications	Functional units and equality of benefits	LCA models
Engineered wood product	CLT	RC	Load-bearing walls	kg with same compressive strength	Own models developed in cooperation with HIZ Südharz and Pollmeier (Pollmeier Massivholz GmbH & CoKG 2015)
	LVL	SLB	Beams	kg with same bending moment (MN*m)	
	GLB	HE	Stanchions		
Polymers and composites	E-PLA	PF	Platform chemicals	kg with same purity (polymer grade)	Nitzsche et al. 2016, Krombholz et al. 2015 and own modelling of downstream processes
	WFIB	EPS	Insulation boards	m <sup>2</sup> , m <sup>3</sup> with same overall heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> *K)	
	HEL-Resins NFRC	PUR	Construction materials and interior designs	m <sup>3</sup> with comparable flexural and compressive strength	
Energy carriers	BM	NG	Solid biofuels	kg with same energy density(MJ or kWh),	Budzinski et al. 2016 and GaBi databases
	HDL CIW SMBP	BC	Heat and Power	MJ or kWh feed into the high-voltage grid	
Legend	BC=Brown coal /lignite CLT=Cross-laminated timber LVL =Laminated veneer lumber GLB= Glued-laminated timber beam HEL= Hardwood ethanol organosolv lignin RC= Reinforced concrete SLB=Sand-lime brick HE= H-section beam , European BM=Biomethane		E-PLA=Expanded Poly lactic acid PF= Phenolic resin systems WFIB=Wood fibre insulation boards NFRC=Natural fibre reinforced composites PUR=Rigid Polyurethane EPS=Expanded polystyrene NG= Natural Gas (Methane) SMBP=Saw-mill by products / bark /saw dust CIW = Chips from industrial wood		HIZ = Holzimpulszentrum m ( <a href="http://www.holzimpulszentrum.de/">http://www.holzimpulszentrum.de/</a> )

Abbildung 2 zeigt beispielhaft für das Szenario S2 eine quantitative Aufschlüsselung und Vergleich der jährlichen Produktionskapazitäten für die holzbasierten Produkte und ihre fossilbasierten Referenzprodukte. Die Äquivalente zum fossilbasierten Produktkorb wurden unter Beachtung der wichtigsten mechanischen und/oder thermischen Eigenschaften der Produkte, d.h. der Baumaterialien, Polymere, biobasierten Brenn-/Treibstoffe, ausgewählt, damit sie vergleichbar in Nutzen und Leistung sind. So erfüllen beispielsweise Holzfaser-Dämmplatten die gleichen physikalischen Eigenschaften wie die fossilbasierten Styroporplatten, benötigen jedoch ein knapp 3faches jährliches Produktionsvolumen.

	<b>Product basket - Bioeconomy Region</b>	<b>Reference Product Basket</b>	
<b>181,500</b>	Hydrolysis lignin	Lignite	<b>181,500</b>
<b>40,000</b>	Biomethane	Methane	<b>40,000</b>
<b>97,000</b>	Expanded PLA	Expanded Polystyrene	<b>97,000</b>
<b>4,500</b>	Fibre reinforced composites and bio- foam	Polyurethane	<b>5,400</b>
<b>80,000</b>	Cross-laminated timber building systems	Reinforced concrete (load-bearing structure) & sand-lime brick building systems	<b>520,000</b>
<b>22,500</b>	Laminated veneer lumber (LVL) beams	Steel beams	<b>31,500</b>
<b>4,000</b>	Wood fibre insulation boards	Expanded polystyrene boards	<b>1,400</b>
<b>Annual production volume [in t/a]</b>		<b>Reference production volume with equality of benefits [in t/a]</b>	

**Abbildung 2** Das jährliche Produktionsvolumen für den charakteristischen Produkt- und Referenzproduktkorb der Bioökonomieregion von holzbasierten Materialien im Basisszenario S2. Aus [7]

## 2.2 Ergebnisse

Um die Unterschiede bei der Ressourcennutzung und der Integration von Energie- und Stoffströmen aufzuzeigen, sind in Abbildung 3 die Szenarien und ihren jeweiligen Holzressourcen-, Hilfsstoff- und Betriebsstoffflüsse dargestellt. In den Szenarien 2 und 3 sind die Bioraffinerie und die damit verbundenen Stoffströme als integrales Produktionssystem der Bioökonomieregion enthalten.

Die Ergebnisse der Wirkungsanalyse (LCIA) für den regionalen biobasierten Produktkorb jedes Szenarios werden mit dem fossilbasierten Referenzkorb (S1) verglichen, um deren relativen Vorteil sichtbar zu machen. Die detaillierten Ergebnisse für jedes Szenario finden sich im Anhang IV der Dissertation von J. Hildebrandt (2018a) [10].

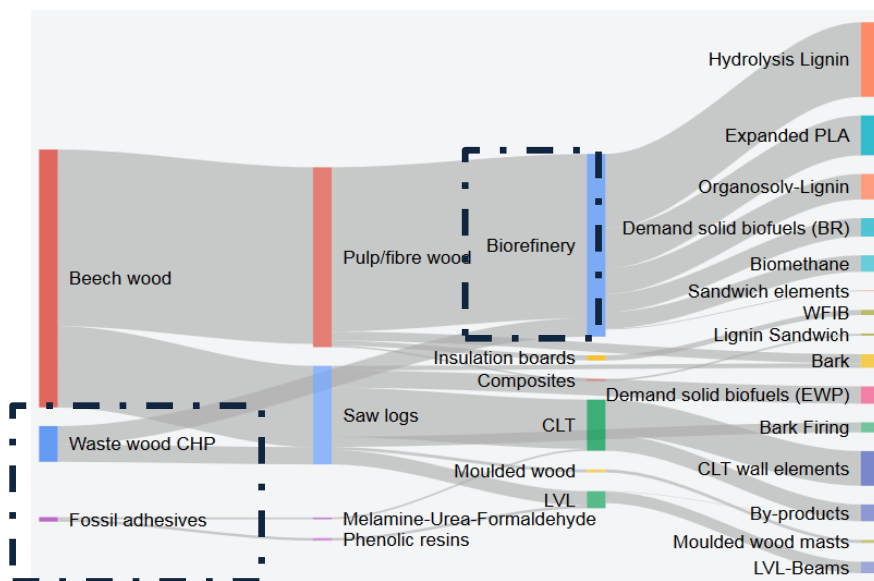
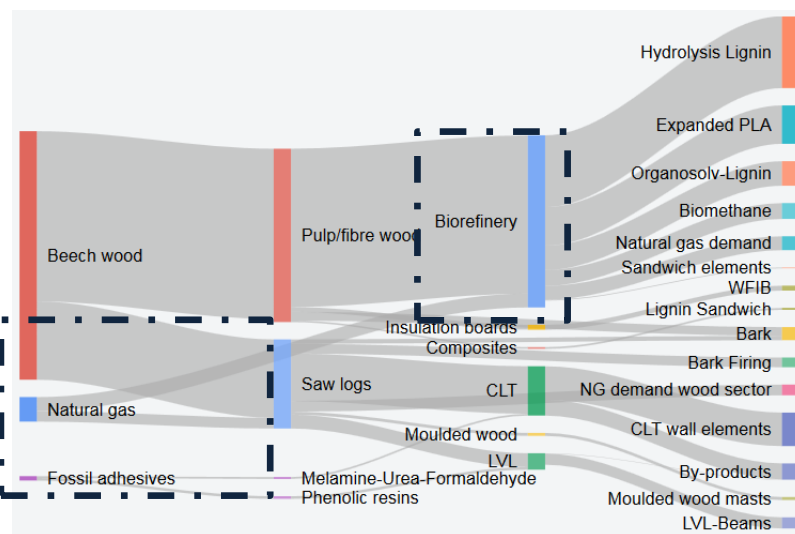
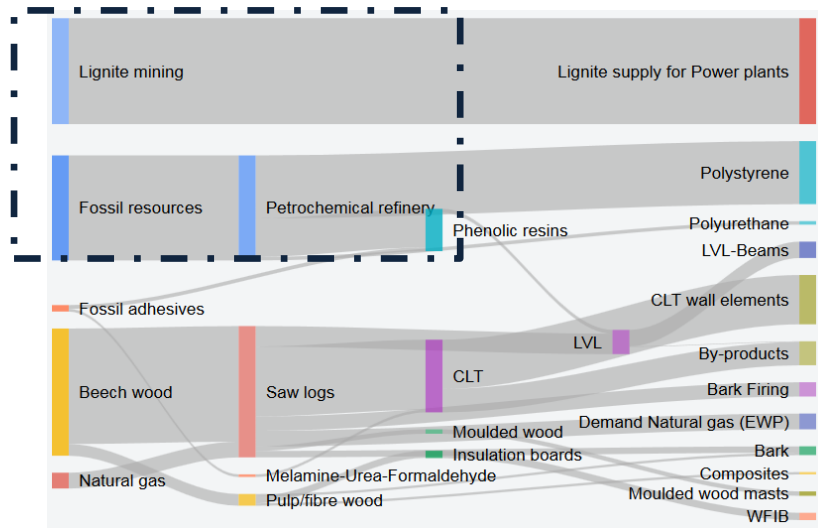


Abbildung 3: Sankey-Diagramme des jeweiligen Wertschöpfungsnetzwerkes für Szenarien 1, 2 und 3. Aus [7].

Für Szenario 1 zeigt sich, dass die traditionellen linearen Produktionsketten des regionalen Warenkorbs auf fossiler Basis für 9 von 11 Wirkungskategorien eine höhere Umweltbelastung (d.h. rot und negativ, s. Abbildung 4) im Vergleich zum Referenzproduktkorb aufweisen. Das Humantoxizitätspotenzial (HTP) und die Aquatische Süßwasser-Ökotoxizität (FAETP) sind wesentlich höher. Das Ozonabbaupotenzial (ODP) und das Versauerungspotenzial (AP) sind zwei Kategorien, die i.d.R. als nicht signifikant im Vergleich biobasierter mit fossil basierten Produkten angesehen werden (Weiss et al., 2012) und erwartungsgemäß geringfügig unter denen des Referenzproduktkorbes liegen.

Die Ergebnisse für Szenario 2 zeigen, dass die Einführung biobasierter Rohstoffe in das System eine Verringerung der Umweltauswirkungen in 7 von 11 Kategorien bewirkt (Abbildung 4). Von den vier Kategorien, die für die biobasierte Produktion ungünstigere Ergebnisse zeigen, weisen zwei, nämlich AP und ODP, eine um 200% höhere Umweltbelastung verglichen mit der herkömmlichen fossilen Referenz auf. Die photochemische Ozonbildung (POCP) ist immer noch relativ hoch, während das HTP in den Bereich der grundlegenden Unsicherheiten mit weniger als 5% Unterschied gesunken ist. Die Verbesserung der Umweltauswirkungen zeigt dabei die Vorteile von S 2 "Holz auf innovativen Wegen" an.

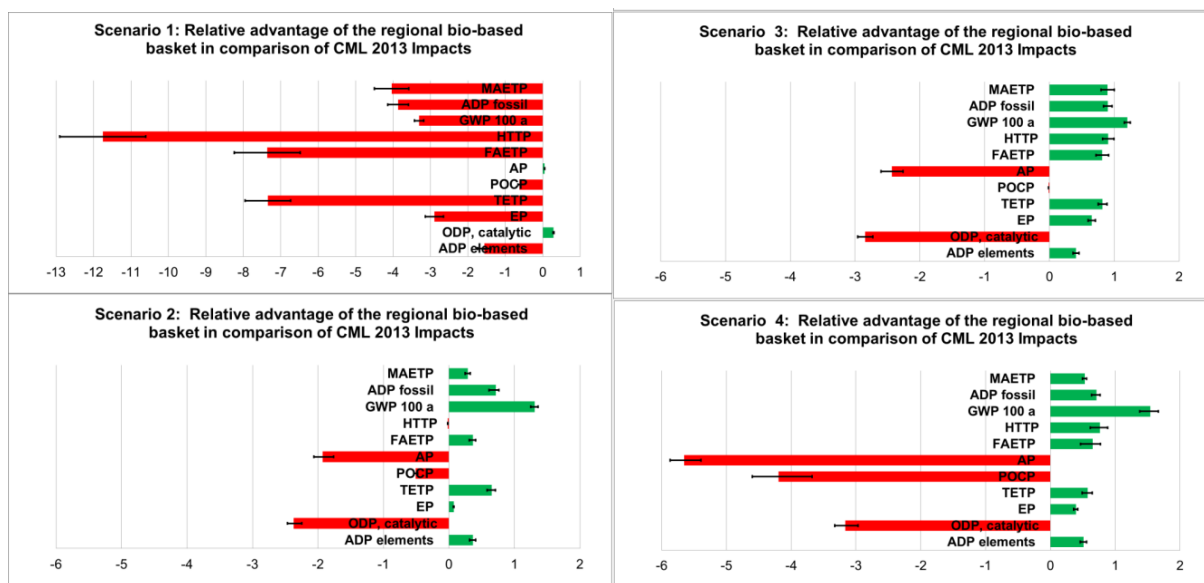


Abbildung 4: Szenarien 1- 4 im LCIA-Vergleich des relativen Vorteils von biobasierten Produkten bei der Minimierung der Umweltauswirkungen gegenüber fossilbasierten Referenzen (grün hebt die Vorteile für biobasierte Produkte hervor, rot die der fossilen Referenz). Aus [7].

In Szenario 3 ist ersichtlich, dass die Verwendung von Altholz für die Energiebereitstellung der Dampfprozesse dazu beiträgt, das Eutrophierungspotenzial (EP) und die Ökotoxizität für Meeresökosysteme (MAETP) weiter zu senken. Am signifikantesten ist die positive Wirkung auf das HTP, welches in Szenario 3 einen relativen Vorteil aufweist. AP und ODP nehmen jedoch weiter zu. Dies hängt mit der Integration eines Altholz-KWK in die Bereitstellungsketten für Wärme und Strom zusammen. Das Treibhauspotenzial (GWP) des Mehrproduktsystems bleibt nahezu konstant, da die Treibhausgaserminderungsbeiträge durch die Substitution von Erdgas durch Holzabfälle in S 3 ziemlich gering sind. Der in den Holzprodukten gespeicherte biogene Kohlenstoff gelangt in die

Atmosphäre. Das in Szenario 2 verwendete Erdgas kann allerdings als der effizienteste und klimafreundlichste fossile Brennstoff mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Emissionen gelten.

Die nachgelagerte Verarbeitung von biobasierten Harzen und die vollständige Substitution einer externen Energieversorgung wurden in Szenario 4 modelliert. Anstelle der Substitution von Phenolharzen durch 10 bis 20 Masse-% wird in den Szenarien 4 der Fall untersucht, in dem Klebstoffe vollständig durch biobasierte Alternativen ersetzt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Umweltauswirkungen für die Wirkungskategorien FAETP, HTP, GWP 100a, Verbrauch fossiler Ressourcen (ADP fossil) und MAETP keine weitere Verbesserung erzielt werden kann und dass das POCP für die biobasierten Produktionssysteme durch den zusätzlichen Bedarf an Prozessenergie für die Weiterverarbeitung von 60.000 t Lignin pro Jahr deutlich zunimmt.

Die Ergebnisse aller Szenarien (Abbildung 4) haben deutlich gemacht, dass die Auswirkungen auf die globale Erwärmung und die Ökotoxizitätspotenziale durch die Implementierung eines zukünftigen integrierten Bioökonomie-Netzwerks um 75-80% reduziert werden können (S 3 und S 4). Weiterhin trägt die Verwendung von Altholz für die Strom- und Wärmebereitstellung erheblich zur Verringerung der Umweltauswirkungen in den folgenden sechs Einflusskategorien bei: Eutrophierungspotenzial (EP), marine aquatische Ökotoxizität (MAETP), photochemische Ozonerzeugung (POCP), Süßwasserökotoxizität (FAETP), Humantoxizitätspotenzial (HTP) und abiotischer Abbau von Fossilien (ADP fossil). Das Szenario 3 kann dabei als „blue print“ verstanden werden, wie die Integration der Kaskadennutzung von Altholz und der gekoppelte Einsatz von Bioraffinerieprodukten in Kombination mit der Substitution fossiler Ressourcen, zu einer wesentlichen Reduzierung negativer Umweltwirkungen beitragen kann. Die Substitution von fossiler Prozessenergie beeinflusst die Reduzierung der gesamten Umweltbelastungen um fast 10%.

Bioökonomie-Netzwerke übertreffen in den meisten Fällen das fossilbasierte Produktionssystem und verringern die Umweltauswirkungen zwischen 25% und 130%. Die erste Verbesserung zwischen S 1 und S 2, mit der Integration einer Bioraffinerie in bestehende und innovative EWP- und Verbundstoffproduktionen, liefert bereits einen wesentlichen Anteil zur Realisierung der erzielbaren Umweltvorteile. Besondere Relevanz hat auch die Substitution fossiler Brennstoffe wie Braunkohle und Methan durch Hydrolyse-Lignin, Rindenreste und Altholz. Die angewandte LCA-Methodik, welche LCA-Modelle für einzelne biobasierte Umwandlungs- und Produktionsketten integrierte sowie aggregierte, erwies sich als ein leistungsfähiges Werkzeug zur Bewertung regionaler biobasierter Produktionsnetzwerke auf einer höheren Ebene der Prozessintegration und Datenaggregation.

## 3 Nachhaltigkeitsmonitoring

### 3.1 Methoden

Für das Nachhaltigkeitsmonitoring sollten eine Reihe regional angepasster Nachhaltigkeitsindikatoren für die Bewertung von holzbasierten Wertschöpfungsnetzwerken in Bioökonomieregionen identifiziert und spezifiziert werden, die im Rahmen von SUMINISTRO am praktischen Beispiel einer spezifischen Fallstudie in der Region Mitteldeutschland angewendet werden können. Die Systemgrenze wurde zur Bewertung holzbasierter Produktionssysteme innerhalb der Grenzen der untersuchten Bioökonomieregion (Siebert et al., 2018a) festgelegt und umfasst Organisationen und Prozessketten zur Biomassebereitstellung aus regionalen Waldökosystemen und verschiedene Umwandlungs- und Behandlungsprozesspfade, wie Fraktionierungs- und Fermentationsprozesse.

Ein breites Spektrum von Nachhaltigkeitskriterien für Bioökonomieregionen, biobasierte Wertschöpfungsketten und Prozesstechnologien wurde in den letzten fünf Jahren von vielen verschiedenen Forschungseinrichtungen und staatlichen Stellen etabliert und weiterentwickelt (z.B. Coordination team BERST und LEI Wageningen, 2015; Imperial College London et al. 2015; Lindner et al., 2010, 2012; Nita et al. 2013). Ziel, der im ersten Schritt durchgeführten Literaturrecherche, war es daher, geeignete Nachhaltigkeitskriterien zu sammeln, die die Identifikation von Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Holzproduktionsketten im Kontext einer Bioökonomieregion unterstützen könnten. Da sich die Fallstudienregion in Deutschland befindet, wurden hauptsächlich europäische und deutsche Studien berücksichtigt. Einen Überblick über die wesentliche Literatur sowie die damit verbundenen relevanten Nachhaltigkeitskriterien bietet Tabelle 3. Um die Identifikation und Adaption regionalisierter Kriterien vorstrukturieren zu können, wurde die Literatur dahingehend analysiert und diskutiert, welche Kriterien den Anforderungen an die Bewertung von holzbasierten Wertschöpfungsketten in Mitteldeutschland am besten entsprechen.

Der Untersuchungsrahmen der verschiedenen Bewertungskonzepte umfasste ein breites Spektrum räumlicher Skalen. Einige EU-Projekte konzentrierten sich auf die nationale Ebene, wobei nationale Statistiken zum Einsatz kamen, einige lediglich auf die Technologiebewertung, die nachhaltige Bereitstellung von Biomasse, regionale Strategien oder die Nachhaltigkeit von Produktionspfaden. Im Allgemeinen wurden in den meisten berücksichtigten Studien zwischen 20 und 35 Nachhaltigkeitskriterien nach dem „Triple-Bottom-Line“-Ansatz (d.h. ökologische, soziale und ökonomische Dimensionen) angewendet, die sich aber dennoch hauptsächlich auf Umweltaspekte konzentrierten.

Der Rahmen des SUMINISTRO-Monitoringsystems ist allerdings breiter als bei den meisten der in Tabelle 3 aufgeführten Projekte und wird von keinem dieser vollständig erreicht. Es gibt aber Ansätze, Ziele und Kriterien in den bereits existierenden Nachhaltigkeitsbewertungen, die übertragen werden können oder die sich als robuste Evaluierungskriterien in einer breiten Berücksichtigung in den Studien erweisen haben. Das SUMINISTRO-Tool zielt außerdem darauf ab, weitere bedeutende sozioökonomische Kriterien und Indikatoren in Bezug auf die Entkopplung von fossilen Produkten und Indikatoren für die Bewertung der effizienten Nutzung von Sekundärrohstoffen und Integration von Materialflüssen zu integrieren. Daher ist es für die Erstellung eines geeigneten Zielsystems und Indikatorensets regionaler Ressourcen für die regionale Planung besonders wichtig, Sachbilanzdaten und Auswirkungen zu berücksichtigen, die in globalen, europaweiten oder nationalen Bewertungsrahmen vernachlässigt oder mit einer geringen regionalen Auflösung betrachtet wurden.

**Tabelle 3: Nachhaltigkeitskriterien für die Bewertung von Bioökonomieregionen. Aus [14].**

<b>Selected sustainability metrics</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>Technical and environmental criteria</b>							
Biomass availability	x	x	x	x	x	x	x
Resource use efficiency	x		x		x		x
Energy efficiency	x		x		x		
Land use efficiency	x	x	x		x		
Cascading factors		x	x		x	x	x
Waste avoidance and minimization	x	x	x		x		x
Water use efficiency	x	x	x			x	x
Self-sufficiency of energy supply		x	x	x	x		x
Decoupling from use of fossil resources	x	x	x			x	x
Ecodesign and Circular economy					x		
Renewable power and heat		x	x	x			x
Avoidance of persistent, toxic and bioaccumulating substances		x			x		x
Decarbonisation of the industry		x	x				x
<b>Organisational and socio-economic criteria</b>							
Cluster and regional networking					x	x	x
Competitive products		x		x	x	x	x
R&D employment		x	x	x	x		
Employment of qualified/unskilled workers					x		
Average/Fair Income of employees							
Rate of SME/ start-up formation						x	
Creation of added value	x	x	x	x		x	
Public health and safety of workers							

### 3.2 Ergebnisse

Verschiedene, renommierte Forschungseinrichtungen Europas, aktiv auf dem Gebiet des Nachhaltigkeitsmonitorings, haben bereits Projekte und Assessment-Studien durchgeführt, welche sich auf die Nachhaltigkeit von Bioökonomiestrategien und –technologien als auch von biobasierten Produkten konzentrieren. Als ein Ergebnis dieser Arbeiten sind Nachhaltigkeitskriterien für die Bewertung von Bioökonomieregionen, biobasierten Wertschöpfungsketten und Prozesstechnologien entwickelt worden, welche unterschiedliche Skalen bewerten können: räumliche, administrative, Markt- und Produktionsskalen. Insbesondere wurden Faktoren vorgeschlagen, die eine nachhaltige Entwicklung der Bioökonomie im ländlichen und urbanen Raum ermöglichen. Außerdem wurden diese und weitere Nachhaltigkeitskriterien zur Bewertung von forst- und landwirtschaftlichen Wertschöpfungsketten oder der reinen Produktion von Plattformchemikalien in der Bioökonomie in Fallstudien für West-, Nord- und Südeuropa getestet (Imperial College London et al., 2015; Lindner et al., 2010, 2012; Fritsche und Iriarte, 2014; Nita et al., 2013; Haase, 2012).



Die Auflösung der räumlich spezifischen und prozess-spezifischen Indikatoren als auch die Gruppierung disaggregierter Nachhaltigkeitskriterien wurde jedoch noch nicht skalenübergreifend, d.h. von einzelnen Prozesseinheiten hin zur Simulation gesamter Wertschöpfungsketten für verschiedene Produkte innerhalb regionaler Cluster, durchgeführt. Außerdem wurde der zeitliche Bewertungsrahmen entweder für den Status-quo gewählt oder für zukünftige Nachhaltigkeit. Die Zusammenführung von detaillierteren prozess-spezifischen Koeffizienten zukünftiger biobasierter Wertschöpfungsketten für ein etabliertes regionales Produktionssystem ist bisher noch nicht mit einem hohen Grad an Auflösung oder auf aggregierter Ebene (sLCA und LCA zusammengeführt mit einer Kombination von Markt- und Politikinstrumentenanalyse) umgesetzt worden, insbesondere mit Hinblick auf an Fallstudien orientierten Datenerhebungen für bestehende Leistungsprofile und Nachhaltigkeits-Score-Cards. Deshalb wurde mit dem Nachhaltigkeitsmonitoring basierend auf der erweiterten LCA eine Methode entwickelt, welche regionale Charakteristika abbilden kann, um geeignetere Methoden für eine Clusterregion anzubieten.

Das Rahmenkonzept von SUMINISTRO (Abbildung 5) zeigt die regionalen Prozessketten und Unternehmen, welche sich dem erweiterten LCA, das das sLCA und LCA vereint, unterziehen und dann in einem Nachhaltigkeitsmonitoring verglichen werden können. Das Nachhaltigkeitsmonitoring berücksichtigt verschiedene Management Strategien und Stakeholderbewertungen sowie die globalen Nachhaltigkeitskriterien aus der Fachliteratur für die abzubildenden ökologischen und sozio-ökonomischen Indikatoren und die diesen übergeordneten Nachhaltigkeitsziele.

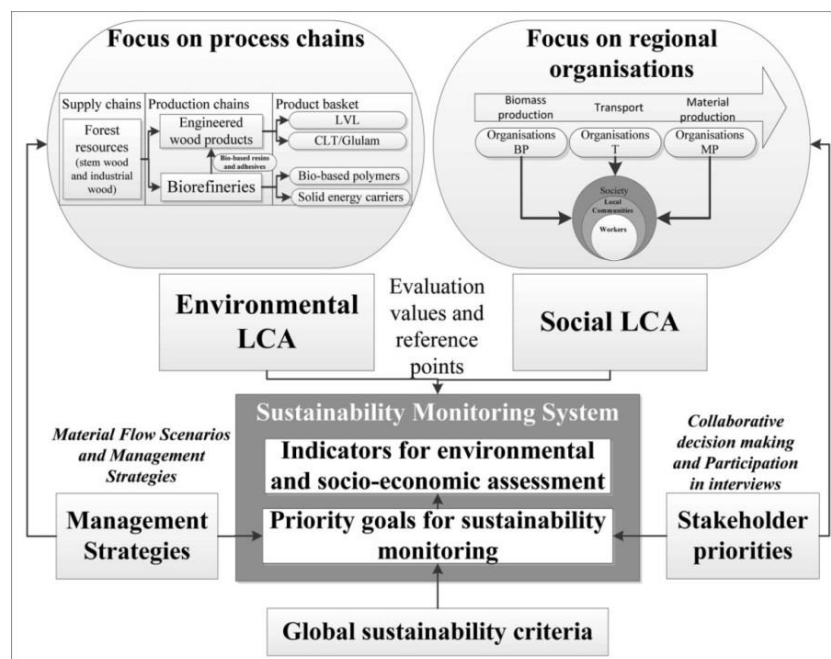


Abbildung 5: Rahmenkonzept zur Entwicklung eines Nachhaltigkeitsmonitorings. Aus [14].

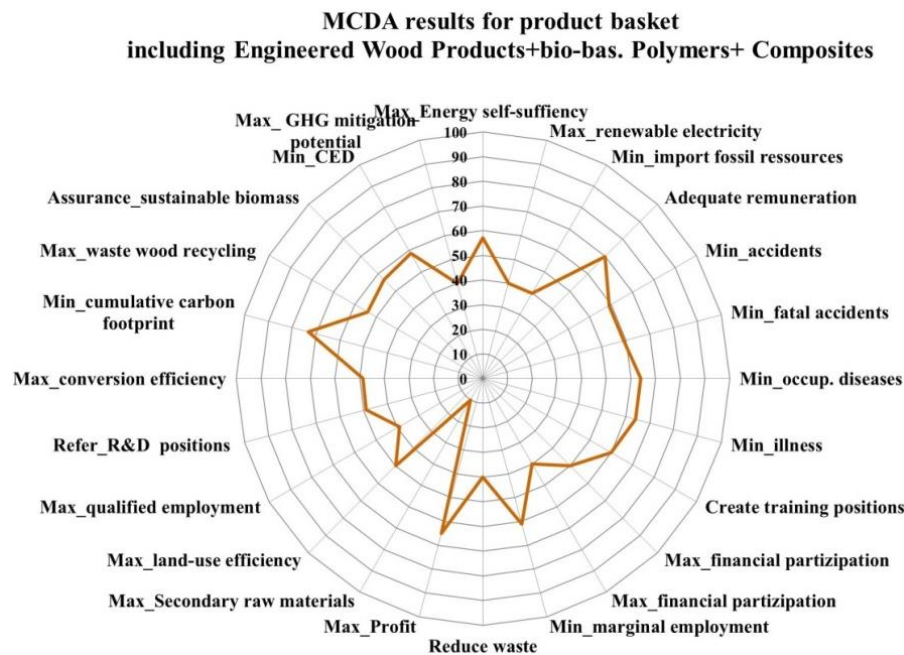
Die Wertschöpfungsketten der Fallstudienregion wurden durch Kalibrieren von Nutzenfunktionen für 25 Indizes mit 55 ausgewählten Indikatoren bewertet. Die Indikatorensets für das Monitoring der Ressourcenproduktivität und Ressourcenbasis sind in Tabelle 4 zu dargestellt, die Ergebnisse des Multikriterien-Bewertungsverfahrens in Abbildung 6. Detaillierte Beschreibungen zum gewählten Indikatorset und zur Festlegung der Nachhaltigkeitskriterien des MCDA sind im Anhang V der Dissertation von J. Hildebrandt (2018a) zu finden. In Anhang VI der gleichen Publikation sind ebenso alle Ergebnisse zum Referenzproduktkorb und den Bewertungsfunktionen zu finden (für die Wirkungsabschätzung LCIA).

**Tabelle 4 Indikatorsets zum Monitoring von: Oben - Ressourcenproduktivität, Unten – Ressourcenbasis. Aus [14].**

Category Goal	Index Sub-index	Indicator	Unit	Equation/Measure/Data sources
<b>Maximization of the resource productivity</b>	<b>Minimization of water use</b>			
		Consumption of ground and surface water	m <sup>3</sup> /t	Life Cycle Inventories and Water Footprint data
	<b>Maximization of the efficiency in use of biomass resources</b>			
		Stoichiometric efficiency	% w/w	
		Flows of enthalpy	% E/E	Enthalpy of formation (products) compared to Enthalpy of formation (feedstocks)
	<b>Reduction of fossil-based additives and auxiliaries</b>			
		More efficient use resins and adhesives	% w/w	Life Cycle Inventories for product specific resin dosing
		Substitution of fossil-based adhesives and resins	% w/w	Amount of fossil-based resins and adhesives substituted by bio-based alternatives
	<b>Increase of cascading use of bio-based secondary raw materials</b>			
		Reduction of waste in production chains	% w/w	
		Share of secondary raw materials in the input resources	% w/w	
	<b>Reduction of the cumulative energy demand</b>			
	Increase of heat reuse and power generation from by-products	MJ/t	Inventory-based	
	Reduction of steam and power demand	MJ/t		
<b>Reduction of GHG emissions</b>				
	Carbon footprint for product basket	t CO <sub>2</sub> -eqv.	Cumulated GHG emissions for entire production processes from cradle-to-gate	
	Saved emissions	t CO <sub>2</sub> -eqv.	Saved GHG emissions from gate-to-grave compared to substituted energy carriers and materials	
<b>Maximization of the material efficiency</b>				
<b>Maintaining the resource basis</b>	<b>Increase or steady extend of external certification of sustainable forestry in the catchment of the wood resources</b>			
		Fractions of input raw materials externally certified for their origin from sustainably managed forest catchments	% w/w	<b>Questionnaire-based and inventory-based</b>
	<b>Maximization of the recycled share at the End of product life</b>			
		Fraction of waste wood suitable for multi-stage cascade use	% w/w	<b>Inventory- and scenario-based</b>
		Fraction of polymers suitable for multi-stage cascade use	% w/w	<b>Inventory- and scenario-based</b>
	<b>Increase of the energy self-sufficiency of utility services such as steam and power supply</b>			
		Cumulated heat and power produced from bark, wood chips and other saw mill by products	kWh <sub>SS</sub> / kWh <sub>total</sub>	<b>Inventory-based</b>
	<b>Increase of the share of electricity from renewable sources in the production processes</b>			
	Cumulated share of electricity provided from renewable sources in the overall electricity mix	kWh <sub>RE</sub> / kWh <sub>total</sub>		
<b>Minimization of the share of imported fossil-resources</b>				
	Cumulated share of fossil-resources (natural gas, resins, adhesives)	t/ t Output	Inventory-based, cumulated consumption of non-renewable fossil resources	

GHG: Green House Gases, MJ: Megajoule, w/w: Weight percentage

Die Ergebnisse in Abbildung 6 zeigen, dass eine angemessene Vergütung, vergleichsweise hohe Energieautarkie, Effizienz bei der Umwandlung von Biomasse, der aggregierte CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und eine akzeptable Flächennutzungseffizienz gute Ansatzpunkte für die Förderung einer nachhaltigen Entwicklung hin zu regionalen Bioökonomiesystemen schaffen. Die Anteile an Ausbildungs- und F&E-Positionen könnten jedoch im Vergleich zu Referenzsektoren erhöht werden. Die erwarteten Vorteile im Bereich der Kaskadennutzung durch steigende Anteile sekundärer Rohstoffe oder eine bessere Produktrecyclbarkeit sind beim Upscaling der vorgeschlagenen Produktinnovationen noch nicht absehbar.



**Abbildung 6: Multikriterien-Bewertung (MCDA) der untersuchten holzbasierten Wertschöpfungsketten in der Fallstudienregion. Aus [14].**

Das vorgestellte MCDA-Monitoring-Instrument ist ein voll funktionsfähiges Tool, das sowohl international etablierte Nachhaltigkeitsindikatoren wie Flächennutzungseffizienz, Energieeffizienz und Maximierung der Selbstversorgung mit Energie beinhaltet, als auch neue Indikatoren wie Kaskadennutzung, sozioökonomische Faktoren, ökonomische Indikatoren für angemessene Entlohnung und Gesundheits- und Sicherheitsfragen integriert. Lediglich Leistungskennzahlen aus der Betriebswirtschaft stehen nicht im Fokus dieses Tools. Somit sollten nur die wettbewerbsfähigsten Produktinnovationen der Bewertung zugeführt werden. Es kann zur kontinuierlichen Überwachung von zu fossilen Technologien alternativen Prozess- und Produktinnovationen eingesetzt werden, die von Interessengruppen aus Industrie und Wissenschaft umgesetzt werden.

Das Nachhaltigkeitsmonitoring biobasierter Produkte aus Bioökonomie-Netzwerken in einer Region sollte nicht nur den Einfluss von Bioökonomiestrategien auf die Nutzung begrenzter regionaler Holzressourcen überwachen, sondern auch versuchen, die Gesamtauswirkungen eines potenziellen zukünftigen Angebots und der Nachfrage nach Produkten bei einer intensivierten Nutzung von NawaRo zu erfassen (Pfau et al., 2014).

## 4 Zusammenfassung

Zunächst wurden für die erweiterte Produkt-Lebenszyklusanalyse ein Ziel und ein Untersuchungsrahmen gewählt. Dies mündete in der Erstellung einer Sachbilanz der im SCBE erzeugten beziehungsweise der geplanten Produkte – das Konzept des Produktkorbes wurde erstellt. In diesem Zusammenhang entstand ein Product Carbon Footprint und eine Auswertung der gewählten Wirkungsabschätzungskategorien für die BioEconomy Region. Bioökonomieregionen anhand einer Lebenszyklusperspektive auf dieser Basis zu bewerten, stellt einen Schlüsselaspekt dar, um regionale Vor- und Nachteile der Integration von biobasierten Wertschöpfungsketten erkennen zu können.

Für das Nachhaltigkeitsmonitoring wurde eine Methodik zur Gewichtung von Optimierungskriterien für die Verknüpfung von Informationen aus der Prozessoptimierung, der erweiterten LCA sowie weiteren relevanten Kenngrößen mit Multikriterien-Analyse erstellt. Auf der Grundlage dieses Nachhaltigkeitsmonitorings wurden Entwicklungsszenarien für nachhaltige Stoffströme in der BioEconomy Region erstellt. Ebenso führte dieser Teil des Projekts zu der Erarbeitung eines Konzepts für ein integriertes System zur Bewertung und zum Monitoring der erzeugten Stoffströme hinsichtlich der generellen Ziele des Vorhabens (nachhaltige Maximierung der Wertschöpfung von Non-Food-Biomasse mit Schwerpunkt Holz durch Koppel- und Kaskadennutzung zur Erzeugung von Chemikalien, neuen Materialien, Werkstoffen und Energie). Das vorgestellte MCDA Monitoring-Tool kann für ein kontinuierliches Monitoring der Prozessalternativen und Produktinnovationen genutzt werden, welche von Stakeholdern aus Industrie und Wissenschaft zur Anwendung vorgeschlagen werden. Es wird angestrebt, die Bewertungsergebnisse des MCDA Monitorings zum Aufbau einer klimafreundlichen Clusterstrategie zu verwenden und damit zu einem nachhaltigeren Technologieentwicklungsprozess beizutragen.

## 5 Ausblick – Weiterer Forschungsbedarf

Eine Reihe von Aspekten, welche laut Hildebrandt (2018a) der Weiterentwicklung bedürfen, findet sich besonders im Bereich der Entscheidungsträger und deren Möglichkeiten für Handlungsentscheidungen sowie in einem Monitoring der Bioökonomie.

Die Ergebnisse des SUMINISTRO Modells zeigen, dass das Potential zur Verringerung der Umweltauswirkungen, wie die Vermeidung von Treibhausgasen, beispielsweise durch die Substitution von Klebstoffen und Harzen sowie fossilen Energieträgern mittels biobasierter Alternativen klare Vorteile gegenüber den rein fossil-basierten Produktionssystemen aufweisen. Jedoch sind der Substitution von Harzen und Klebstoffen Grenzen gesetzt, was die Umsetzung zur Treibhausgasvermeidung erschwert. Gleichermäßen schränken die mittelfristigen Abhängigkeiten bei der Verfügbarkeit von Prozessenergie als auch der größer werdende Radius des Einzugsgebiets für Rohstoffe aufgrund der Bedarfserhöhung ein.

Außer für die Wiederaufbereitung von Fasern und Gips aus Gipspaneelen wurden bisher keine Systeme, die eine Rückführungslogistik oder geschlossene Kreisläufe beinhalten, in der im Bericht behandelten Fallstudie vorgeschlagen. Ob zukünftig das Engagement der Stakeholder aus der regionalen Industrie für Lösungen in Richtung Kreislaufwirtschaft zunehmen wird, bleibt bisher unklar.

Betrachtet man die steigende Zahl von Hybridmaterialien im Bauwesen, so bleibt jedoch dahingestellt inwiefern Kreislaufsysteme für mehr modulare Bausysteme entstehen können, welche vorbeugend die Inbetriebnahme-, Stilllegungs- und Wiedernutzungsphasen des ursprünglichen Produkts in der Projektentwicklung sowie die Bewertungsphasen betrachten.

Potentiale zur Arbeitsplatzschaffung sind nicht vorhersehbar, da unsicher bleibt, in welchem Ausmaß die neuen Arbeitsplätze in der Buchenholzindustrie die Verluste in den traditionellen Unternehmen der Weichholzverarbeitung ausgleichen können.

Die Frage, ob Zellstoff- und Papierfabriken oder chemische Refiner-Anlagen geeignetere Referenzsysteme für Bioraffinerie-Anlagen hinsichtlich der sozio-ökonomischen Leistungsprofile sind, bleibt ebenfalls vage.

## 6 Literaturverzeichnis

- Bezama, A. (2016). Let us discuss how cascading can help implement the circular economy and the bio-economy strategies. *Waste Manage. Res.* 34 (7), 593 – 594.
- Budzinski, M., Nitzsche, R. (2016). Comparative economic and environmental assessment of four beech wood based biorefinery concepts. *Bioresour. Technol.* 216 , 613 – 621.
- Budzinski, M., Sisca, M., Thrän, D. (Eingereicht). Consequential LCA and LCC using linear programming: An illustrative example of biorefineries.
- Cappellin, R., R. Wink. (2009). International knowledge and innovation networks: knowledge creation and innovation in medium technology clusters. *New horizons in regional science*. Cheltenham, UK; Northampton, USA: Edward Elgar.
- Coordination team BERST, LEI Wageningen (2015). *BioEconomy Regional Strategy Toolkit - For benchmarking and developing strategies*.
- Fritsche, U.R., L. Iriarte (2014). Sustainability criteria and indicators for the bio-based economy in Europe: State of discussion and way forward. *Energies*, 7 (11): 6825–6836.
- Haase, M. (2012). *Entwicklung eines Energie- und Stoffstrommodells zur ökonomischen und ökologischen Bewertung der Herstellung chemischer Grundstoffe aus Lignocellulose*. KIT Scientific Publ., Karlsruhe.
- Hildebrandt, J., Bezama, A., Thrän, D., Jähkel, A. (2018b). *Handbuch: Anwendung des MCDA Tools für ein Nachhaltigkeitsmonitoring auf der Web-Plattform “D-Sight®” Handbuch für BMBF*.
- Imperial College London, JAMK & Region of Central Finland, CERTH & Region of Western Macedonia, University of Ljubljana, BioCampus Straubing GmbH & FNR, Madrid Biocluster & Parque Científico de Madrid, Wageningen University, Gemeente Westland & Biobased Delta. (2015). A representative set of case studies. Public Deliverable - D 3.2.
- [http://www3.lei.wur.nl/BerstPublications/D3.2%20RepresentativeSetOfCaseStudies%20\(v1\)\\_10June15.pdf](http://www3.lei.wur.nl/BerstPublications/D3.2%20RepresentativeSetOfCaseStudies%20(v1)_10June15.pdf). Zugriff 27.03.2018.
- Ingrao, C., Bacenetti, J., Bezama, A., Blok, V., Geldermann, J., Goglio, P., Koukios, E.G., Lindner, M., Nemecek, T., Siracusa, V., Zabaniotou, A., Huisinigh, D. (2016). Agricultural and forest biomass for food, materials and energy: bio-economy as the cornerstone to cleaner production and more sustainable consumption patterns for accelerating the transition towards equitable, sustainable, post fossil-carbon societies. *J. Clean Prod.* 117 , 4 – 6.
- Jukka Teräs, Gunnar Lindberg, Liisa Perjo, Alberto Giacometti (2014). *Bioeconomy in the Nordic region: Regional case studies*. Vol. Working Paper 2014:4. Stockholm, Sweden: Nordregio. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:843815/FULLTEXT01.pdf>. Zugriff 27.03.2018.
- Krombholz, A., Theumer, T., Hildebrandt, J., Budzinski, M., Weber, A. (2015). LCA and mechanics of beech fiber laminates with lignin based phenolic resin systems. In: 11 Dresden: Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH (IHD).
- Lindner, M., et al. (2010). ToSIA—A tool for sustainability impact assessment of forest-wood-chains. *Ecol. Model.*, 221 (18): 2197–2205.

- Lindner, M., et al. (2012). Conducting sustainability impact assessments of forestry-wood chains: examples of ToSIA applications, *Eur. J. For. Res.*, 131 (1): 21–34.
- Massari, S., Sonnemann, G., Balkau, F. (Eds.) Life cycle approaches to sustainable regional development. [S.l.]: Routledge, 2016.
- Nita, V., Benini, L., Ciupagea, C., Kavalov, B., Pelletier, N. (2013). Bio-economy and sustainability: a potential contribution to the Bio-economy Observatory. European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg.
- 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. *Bioresour. Technol.* 200 , 928 – 939.
- Pfau, S., Hagens, J., Dankbaar, B., Smits, A. (2014). Visions of Sustainability in Bioeconomy Research, *Sustainability*, 6 (3): 1222–1249.
- Siebert, A., Bezama, A., O’Keeffe, S., Thrän, D. (2018a). Social life cycle assessment: in pursuit of a framework for assessing wood-based products from bioeconomy regions in Germany. *Int. J. Life Cycle Assess.* 23 (3), 651 – 662
- Siebert, A., Bezama, A., O’Keeffe, S., Thrän, D. (2018b). Social life cycle assessment indices and indicators to monitor the social implications of wood-based products. *J. Clean Prod.* 172 , 4074 - 4084.
- Walther, G. 2010. Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke: überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus. Gabler, Wiesbaden.
- Weiss, M., Haufe, J., Carus, M., Brandão, M., Bringezu, S., Hermann, B., Patel, M.K. (2012). A review of the environmental impacts of biobased materials. *Journal of Industrial Ecology*, 16: 169–181.
- Wurpts, K. (2013). Mit Clustern zur BioÖkonomie Eine internationale Bestandsaufnahme zur Einführung und Grundlage für Benchmarking und Evaluierung des Spitzencluster BioÖkonomie Mitteldeutschland. Leipzig Graduate School of Management, Leipzig, September 2013.  
<http://www.hhl.de/fileadmin/texte/publikationen/arbeitspapiere/hhlap0121.pdf>. Zugriff 08.05.18.
- Thrän, D., Bezama, A., (2017). The knowledge-based bioeconomy and its impact in our work-ing field. *Waste Manage. Res.* 35 (7), 689 – 690.
- Thrän, D., Bezama, A., Gawel, E., Purkus, A., Hagemann, N., Köck, W., Ludwig, G., Moesenfechtel, U., Zeug, W., Jähkel, A. (2018). Veröffentlichung der Ergebnisse von Forschungsvorhaben im BMBF-Programm Spitzencluster-BioEconomy: „TG 5, Begleitforschung: Nachhaltige wettbewerbsstrategische Handlungskonzepte und Steuerungsinstrumente des BioEconomy-Clusters in Mitteldeutschland“. Schlussbericht für BMBF.

## 7 Entstandene Publikationen bezüglich der Entwicklung von SUMINISTRO

### Zeitschriftenbeiträge

- [1] Hildebrandt, J., Bezama, A., Thrän, D. (2017a): Cascade use indicators for selected biopolymers: Are we aiming for the right solutions in the design for recycling of bio-based polymers? Waste Manage. Res. 35 (4), 367 – 378
- [2] Hildebrandt, J., Hagemann, N., Thrän, D. (2017b): The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in Europe. Sust. Cities Soc. 34 , 405 – 418

*Darüber hinaus, folgende Veröffentlichungen für internationale Journals befinden sich in der Vorbereitung.*

- [3] Bezama, A., O’Keeffe, S., Siebert, A., Hildebrandt, J., Thrän, D. (In review: Decision pending on major revisions): Waste in time of circularities.
- [4] Bezama, A., O’Keeffe, S., Siebert, A., Hildebrandt, J., Szarka, N., Thrän, D. (In preparation): Challenges for implementing the bioeconomy strategy in a regional scale
- [5] Hildebrandt, J., Bezama, A., Thrän, D. (In preparation): A region is more than a product basket - Framing sustainability assessments for wood-based bioeconomy regions.
- [6] Hildebrandt, J., Budzinski, M., Nitzsche, R., Weber, A., Krombholz, A., Thrän, D., Bezama, A. (Submitted): Technical-environmental comparative assessment of alternative material compositions of beech wood-based fiber laminates with lignin based phenolic resin systems
- [7] Hildebrandt, J., O’Keeffe, S., Bezama, A., Thrän, D. (In review: Accepted with revisions): Revealing the environmental advantages of industrial symbiosis in wood-based bioeconomy networks – An assessment from a life cycle perspective
- [8] Hildebrandt, J., Siebert, A., Thrän, D., Bezama, A. (In preparation): The bigger the spider web the more flies to catch: Aggregating sustainability metrics for monitoring the sustainability of bioeconomy region
- [9] Hildebrandt, J., Thrän, D., Bezama, A. (In preparation): Modelling decarbonisations pathways of waste wood cascades under the bioeconomy strategy and under policy uncertainties considering energy transition, waste trading and incineration capacities.

*Eingereichte Dissertation an Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät:*

- [10] Hildebrandt, J. (2018a) „Monitoring the sustainability of added-value networks within bioeconomy regions - Establishing a MCDA aggregation procedure (“SUMINISTRO”) and applying it to the practical case of the Leading-Edge Cluster BioEconomy -“.



## **Monografien, Konferenz- und Buchbeiträge**

[11] Bezama, A.; Siebert, A.; Hildebrandt, J.; Thrän, D. (2017). Integration of LCA, LCC, and SLCA methods for assessing a bioeconomy region. In: Massari, S.; Sonnemann, G.; Balkau, Fritz (Hrsg.) Life cycle approaches to sustainable regional development. New York: Routledge. ISBN: 978-1-138-94060-4. pp. 259–264.

[12] Hildebrandt, J.; Bezama, A.; Thrän, D. (2017c). Analyse alternativer Kaskadennutzungssysteme für lignozellulose-basierte Materialien in der Bioökonomie. In: Bockreis, A.; Faulstich, M.; Flamme, S.; Kranert, M.; Mocker, M.; Nelles, M.; Quicker, P.; Rettenberger, G.; Rotter, Vera Susanne (Hrsg.) 7. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft: am 16. und 17. März 2017 an der RWTH Aachen. 1. Auflage: Innsbruck University Press. ISBN: 978-3-903122-78-9. S. 73–77.

[13] Hildebrandt, J.; Budzinski, M.; Thrän, D.; Bezama, A. (2017d). Assessing a Bioeconomy Network from an Integrated Life Cycle Perspective. In: Ek, L.; Ehrnrooth, H.; Scarlat, N.; Grassi, A.; Helm, P. (Hrsg.) Papers of the 25th European Biomass Conference: Setting the course for a biobases economy. Extracted from the Proceedings of the International Conference. Florence (Italien): ETA-Florence Renewable Energies. S. 1560–1565.

[14] Hildebrandt, J.; Siebert, A.; Thrän, D.; Bezama, A. (2017e). Monitoring Material Flows of a Bi-oconomy Region. In: Ek, L.; Ehrnrooth, H.; Scarlat, N.; Grassi, A.; Helm, P. (Hrsg.) Papers of the 25th European Biomass Conference: Setting the course for a biobases economy. Extracted from the Proceedings of the International Conference. Florence (Italien): ETA-Florence Renewable Energies. S. 1566–1574.

[15] Hildebrandt, J., Bezama, A., Thrän, D. (2015): Identification and evaluation of overriding goals in a sustainability monitoring system for a wood-based bioeconomy region. Conference book of abstracts from the Science Day of the CASTLE Conference "Towards a Sustainable Bioeconomy - Innovative Methods and Solutions for the Agriculture and Forest Sectors" in Barcelona, Spain, 21-23 October, 2015. p. 62 – 64.

[16] Hildebrandt, J., Bezama, A., Thrän, D., (2015): Cascade use indicators for selected biopolymers: are we aiming for the right solutions in design for recycling (DfR) of bio-based compo-sites and polymers? 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik, Croatia, 27 Sep 2015 - 2 Oct 2015 SDEWES Conference Proceedings , p. 1 – 15

[17] Hildebrandt, J., Budzinski, M., Siebert, A., Bezama, A., Thrän, D., (2015): Further developments of Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) frameworks in the context of bioeconomy. In: Gawel, E., Thrän, D., Bruckner, T., Holländer, R., Weinsziehr, T., Verhoog, M., (eds.)

Zehn Jahre transdisziplinäre Nachhaltigkeitsforschung an der Universität Leipzig : Festschrift anlässlich des zehnjährigen Bestehens des Instituts für Infrastruktur und Ressourcenmanagement (IIRM). Studien zu Infrastruktur und Ressourcenmanagement - Studies in infrastructure and resources management, 5 Logos-Verlag, Berlin, p. 125 - 130

[18] Hildebrandt, J., Siebert, A., Bezama, A., Majer, S., Budzinski, M., Thrän, D., (2015): Assessment tools for Sustainability Monitoring of added-value networks in the bioeconomy. Conference Proceedings of the Global Bioeconomy Summit, Berlin 2015. Office of the Bioeconomy Council, Berlin, p. 103 – 103.

[19] Krombholz, A., Theumer, T., Hildebrandt, J., Budzinski, M., Weber, A., (2015): Werkstoffmechanische und ökobilanzielle Bewertung von Buchenfaser-Laminaten mit ligninbasierten PF-Harz-Systemen. Tagungsband des 11. Holzwerkstoffkolloquiums des Instituts für Holztechnologie (IHD) Dresden. Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH, Dresden,

[20] Hildebrandt, J., Bezama, A., (2014): Entwicklungstreiber für die Modellierung der Altholz-kaskade bis 2050. In: Pomberger, R., Adam, J., Aldrian, A., Arnberger, A., Höllen, D., Kreindl, G., Lorber, K.E., Sarc, R., Schwarz, T., Sedlazeck, P., Wellacher, M., Wolfsberger, T., (Hrsg.). Tagungsband zur 12. DepoTech 2014 - Abfallwirtschaft, Abfallverwertung und Recycling, Deponietechnik und Altlasten in Leoben, Österreich, 04.-07.11.2014. Inst. für Nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik, Leoben, S. 661 – 664

[21] Hildebrandt, J., Bezama, A., Thrän, D., (2014): A hybrid-MCDA tool for assessment of added value networks in a woodbased bioeconomy. Proceedings of the Bioenergy from Forest Conference, Helsinki, Finland from 15th to 18th September

[22] Hildebrandt, J., Bezama, A., Thrän, D., (2014): Establishing a robust sustainability index for the assessment of bioeconomy regions. Conference Proceedings of the International Conference and Utility Exhibition 2014 (ICUE 2014) on Green Energy for Sustainable Development of the Asian Institute of Technology, Thailand and the IEEE Power and Energy Society, Bangkok, 19-21 March 2014

### **Ergebnispräsentationen auf Konferenzen und wissenschaftlichen Workshops**

[23] Bezama, A., Thrän, D., Siebert, A., Hildebrandt, J., O’Keeffe, S., Gröngröft, A., Majer, S. (2014): A review on the challenges, opportunities and needed research for implementing the bioeconomy strategy in a regional scale. Proceedings of the 13th International Symposium on Bioplastics, Biocomposites & Biorefining: Moving towards a Sustainable Bioeconomy. Guelph, Ontario, Canada

[24] Bezama, A.; Hildebrandt, J.; Thrän, D. (06.2016). (Plastic) Waste in times of circularities. Vortrag gehalten: 2nd SEE SDEWES Conference, Piran (Slovenien), 15.-18.06.2016.

[25] Bezama, A.; Budzinski, M.; Hildebrandt, J.; Nitzsche, R.; O’Keeffe, Sinéad, Siebert, Anke; Thrän, D. (11.2016). Product-oriented sustainability assessment of a bioeconomy region in Germany: Forschungszentrum Pinkafeld. Vortrag gehalten: e-nova Internationaler Congress 2016, Pinkafeld, Österreich, 25.11.2016.

[26] Hildebrandt, J.; Bezama, A.; O’Keeffe, S.; Siebert, A.; Budzinski, M.; Thrän, D. (2017f). Evaluating the environmental impacts of implementing a bioeconomy region from a life cycle perspective. Vortrag gehalten: LCM 2017, Luxemburg, 03.-06.09.2017.

[27] Hildebrandt, J.; Bezama, A.; O’Keeffe, S.; Siebert, A.; Budzinski, M.; Thrän, D. (2017g). Integrated life cycle assessment of a bioeconomy region: Evaluating the environmental impacts of implementing a bioeconomy region. Vortrag gehalten: 12th SDEWES, Dubrovnik (Kroatien), 06.10.2017.

[28] Hildebrandt, J, Bezama, A., Thrän, D. (2014): A hybrid-MCDA tool for assessment of added value networks in a wood-based bioeconomy region. Bioenergy from Forest Conference 2014, September 16 -17, 2014 Helsinki, Finland.

[29] Hildebrandt, J, Bezama, A., Thrän, D. (2014): Establishing a Robust Sustainability Index for the Assessment of Bioeconomy Regions. In: Conference Proceedings of the International Conference and Utility Exhibition 2014 (ICUE 2014) on Green Energy for Sustainable Development. Asian Institute of Technology, Thailand and the IEEE Power and Energy Society, Bang-kok/Pattaya, Thailand 2014

[30] Thrän, D.; Bezama, A. (2017). Opening & approach: How to manage Bioeconomy Regions? Lessons learnt, visions & tools. Vortrag gehalten: UFZ Final Workshop BioEconomy 2017, Leipzig, 16.03.2017