

Forschungsbericht BWPLUS

Algae4BioEcoBW

-

Identifikation von innovativen Prozessketten einer biobasierten Wirtschaft: Analyse und Integration in ein bioökonomisches Standortmodell für Baden-Württemberg

von

Enno Bahrs, Elisabeth Angenendt, Eckart Petig, Wilhelm Gamer,
Beate Zimmermann, Sebastian Weickert
Frank Schultmann, Andreas Rudi

Universität Hohenheim
Fachgebiet Landwirtschaftliche Betriebslehre (UHOH-ILB)
Fachgebiet Agrar- und Ernährungspolitik (UHO-IAM)

Karlsruher Institut für Technologie
Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktionswirtschaft und
Logistik (KIT-IIP)

Förderkennzeichen: BWBÖ 17006

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre
Sicherung (BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

November 2018

Inhalt

Zusammenfassung	3
1 Einleitung.....	4
2 Aufgabenstellung.....	5
3 Stand der Forschung.....	5
3.1 Mikroalgen.....	5
3.2 Modellierung.....	8
3.2.1 Landwirtschaftliche Angebotsmodell EFEM	9
3.2.2 Techno-ökonomisches Standortmodell BiOLoCaTe	11
3.2.3 Modellschnittstelle: Datenübergabe zwischen EFEM und BiOLoCaTe.....	17
4 Planung und Ablauf des Forschungsvorhabens	17
5 Ergebnisse	19
5.1 Kostenstrukturen Mikroalgenanlagen und Szenarienbeschreibung	19
5.1.1 Phototrophe Kultivierung	19
5.1.2 Heterotrophe Kultivierung	21
5.2 Modellergebnisse	25
5.2.1 Standortbezogenes Biomasseangebot für die Bioökonomie in Baden-Württemberg	25
5.2.2 Techno-ökonomische Standortanalyse für ausgewählte innovative Prozessketten	27
5.3 Diskussion.....	37
6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	40
7 Beitrag der Ergebnisse zu Zielen des Förderprogramms	40
8 Verwertung und Forschungstransfer.....	41
9 Literatur	42
Anhang	46

Zusammenfassung

Eine Vielzahl an Technologien und Absatzwegen einer sich entwickelnden Bioökonomie sind noch unbekannt. Modelle sind in der Lage, Potenziale sowie Chancen und Risiken aufzuzeigen, um mögliche Entwicklungspfade der Bioökonomie zu bewerten. Energetische und stoffliche Prozessketten können das vorhandene Angebot an biogenen Rohstoffen in Baden-Württemberg zwar verwerten, jedoch nicht unter wirtschaftlich sinnvollen Gesichtspunkten. Der vorliegende Ansatz kombiniert die energetische und stoffliche Verwertung agrarischer Biomasse mit der Mikroalgenkultivierung und basiert auf Ergebnissen eines speziell für bioökonomische Fragestellungen entwickelten Modellverbunds, der sich in drei Untersuchungsebenen gliedert. Die erste Ebene umfasst die Abschätzung agrarischer Biomassepotentiale durch das landwirtschaftliche Angebotsmodell EFEM (Economic Farm Emission Model). Dabei wird ausgehend von regionalen Vergleichsgebietsgruppen das preisabhängige Reststroh- und Miscanthusaufkommen in Baden-Württemberg auf Gemeindeebene modelliert. Die zweite Ebene untersucht die technologische Umsetzung und Wirtschaftlichkeit verschiedener Arten der Mikroalgenkultivierung zur Verwertung biogener Substrate aus agrarischen Rohstoffen. Unterschieden wird neben der Reaktorgröße auch nach dem gewählten Konversionsverfahren zwischen der phototrophen und heterotrophen Kultivierung der Mikroalgen. Die dritte Ebene integriert die erste und zweite Ebene in dem techno-ökonomischen Standortoptimierungsmodell BiOLoCaTe (Biomass value chain integrated Optimization for Location, Capacity and Technology planning), um eine Konzeptbewertung des vorgestellten Prozesspfads für Baden-Württemberg durchzuführen. Die Anbindung einer phototrophen Mikroalgenkultivierung an eine Biomasseverbrennung und einer heterotrophen Mikroalgenkultivierung an eine Lignocellulose Bioraffinerie werden untersucht. Basierend auf einer intensiven Literaturlauswertung wird die phototrophe Mikroalgenkultivierung, die den Kohlenstoff aus der Biomasseverbrennung nutzen sollte, bereits in der zweiten Untersuchungsebene als ungeeignet bewertet. Trotz hoher Umweltstandards ist die Qualität des Rauchgases bei der Verbrennung von Reststroh und Miscanthus unzureichend, um von phototrophen Mikroalgen verwertet zu werden. Im Gegensatz dazu erscheint die heterotrophe Kultivierung von Mikroalgen in einer Lignocellulose Bioraffinerie vielversprechend. Eine Kombination aus der Veräußerung und Weiterverwertung der Biomassebestandteile in Mikroalgenreaktoren ist unter den getroffenen Annahmen (insb. Preisannahmen) wirtschaftlich. Die Biomasse wird dabei im Organosolv-Verfahren in ihre Bestandteile zerlegt, um anschließend über die Hydrolyse und Abtrennung Lignin und Zucker zu extrahieren. Das qualitativ hochwertige Organosolv-Lignin wird am Markt verkauft, die extrahierte Glukose kann von Mikroalgen wertschöpfend verwertet werden. Im Rahmen dieser Konzeptstudie wird angenommen, dass das dadurch hergestellte Algenpulver als Eiweißsubstitut am Markt vertrieben wird und tierisches Eiweiß ersetzt. Das Konzept der Lignocellulose Bioraffinerie kann durch die Mikroalgenkultivierung aufgewertet werden, sodass bereits kleineren dezentralen Anlagen ein profitabler Betrieb ermöglicht wird. Die optimalen Standorte für diese Anlagen liegen in Regionen, die ein relativ hohes Biomasseaufkommen

aufweisen, wie bspw. der Nordosten und der zentrale Nordwesten Baden-Württembergs. Das preisabhängige Angebot von Reststroh und Miscanthus beeinflusst durch ihre Bestandteile das Volumen der verkaufsfähigen Endprodukte. Durch einen erhöhten Anteil an Lignin und Zucker hat Miscanthus eine vorteilhaftere Inhaltsstoffzusammensetzung gegenüber Stroh für den betrachteten Verwertungspfad. Die Verwertung von Stroh, als landwirtschaftlicher Reststoff, ist jedoch kostengünstiger und stellt vor dem Hintergrund der Flächenkonkurrenz somit einen Vorteil gegenüber Miscanthus dar. Nichtsdestotrotz kann die regionale Verwertung beider Biomassearten zu einer Ausweitung von bioökonomischen Prozessketten beitragen.

1 Einleitung

Weltweit stehen Politiker vor der großen Herausforderung, Wirtschaftswachstum, soziale Ungleichheit, Klimawandel, endliche natürliche Ressourcen und Bevölkerungswachstum in Einklang zu bringen. Der Übergang von einer petrochemischen zu einer biobasierten Wirtschaft wird hierfür als vielversprechende Lösung angesehen (Schütte, 2018). Vor diesem Hintergrund haben viele Länder und Organisationen, wie z.B. die OECD, Strategien zur Förderung der Bioökonomie entwickelt. Eine neue Studie des Bioökonomierats der Bundesregierung geht davon aus, dass weltweit bereits 50 Länder Bioökonomiestrategien verabschiedet haben (Bioökonomierat, 2018).

Die angestrebte Biologisierung der Wirtschaft wird mit einer verstärkten Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Biomasse verbunden sein und in Konkurrenz zur weltweiten Nahrungs- und Futtermittelproduktion stehen. Diese Wettbewerbssituation wird weiterhin verschärft, da bis 2050 ein zusätzlicher Nahrungsmittelbedarf von 50-70% prognostiziert wird (Philp, 2018). Um die sich entwickelnde Bioökonomie nachhaltig zu gestalten, haben viele der oben genannten bioökonomischen Strategien einen Fokus auf Forschung und Innovation gelegt (Meyer, 2017).

Eine Vielzahl zukunftsorientierter biobasierter Produktionsverfahren gibt es derzeit nur im Labormaßstab und es werden lange Forschungs- und Entwicklungszeiten erforderlich sein, damit sie sich in einem höheren Entwicklungsstadium etablieren können (Philp, 2018). Efken et al. (2016) untersuchten anhand von statistischen Daten für relevanten Branchen die Bedeutung der Bioökonomie in Deutschland. Die Ergebnisse zeigen, dass dem Bereich der Bioökonomie in Deutschland ca. 10 % der Beschäftigten und 6 % des Bruttonutzenprodukts im Jahr 2010 zugerechnet werden können. Davon ist der größte Anteil den traditionellen Bereichen der Agrar- und Forstwirtschaft und den Ernährungs- und Futtermittelbranchen zuzuordnen. Der Einsatz von Biomasse in neuen industriellen Prozessen ist, mit Ausnahme des stark subventionierten Bioenergiesektors, noch von untergeordneter Bedeutung und kaum messbar.

2 Aufgabenstellung

Die Arbeiten im Rahmen dieser Konzeptstudie sollen aufzeigen, wie bisher bekannte energetische und stoffliche bioökonomische Prozessketten, um Prozesse der Mikroalgenproduktion erweitert werden können. Durch diese potenziellen Prozesserweiterungen kann, im Sinne einer Kreislaufwirtschaft, sowohl die ökonomische als auch die ökologische Nachhaltigkeit gesteigert werden. Mit Hilfe eines Modellverbundes aus dem landwirtschaftlichen Angebotsmodell EFEM (**Economic Farm Emission Model**) der Universität Hohenheim (UHO-ILB) und dem techno-ökonomischen Standortoptimierungsmodell BiOLoCaTe (**Biomass Value Chain Integrated Optimization for Location, Capacity, and Technology planning**) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT-IIP), werden an Beispielen eine standortbezogene ökonomische Bewertung dieser neuen und innovativen Prozessketten untersucht. Anhand der Modellergebnisse werden erste Überlegungen hinsichtlich Standortwahl und Ausgestaltung von Pilotanlagen in Baden-Württemberg aufgezeigt.

3 Stand der Forschung

Nachfolgend wird zum einen ein Überblick über verschiedenen Produktionsprozesse von Mikroalgen gegeben (Kapitel 3.1). Zum anderen werden Modellansätze zur Standortoptimierung von bioökonomischen Prozessketten vorgestellt. Dabei soll kurz dargelegt werden, welche Anforderungen solche Modellansätze erfüllen sollten. Des Weiteren werden die in der Konzeptstudie verwendeten Modelle EFEM und BiOLoCaTe beschrieben.

3.1 Mikroalgen

Bei der phototrophen Mikroalgenkultivierung wird Licht (natürliches und/oder künstliches Licht) als Energie- und CO₂ als Kohlenstoffquelle zur Erzeugung von Biomasse verwendet. Die Anlagen zur Kultivierung von Mikroalgen benötigen im Allgemeinen keine landwirtschaftlich genutzten Flächen. Dadurch kann diese in Zukunft immer rarer werdende Ressource zur Erzeugung von Lebens- und Futtermittel geschont werden, was in Hinsicht auf die steigende Weltbevölkerung einer der größten Vorteile der Mikroalgenkultivierung darstellt. Weltweit werden jährlich circa 10.000 t mikroalgenbasierende Biomasse produziert, vorwiegend unaufgeschlossen aus *Chlorella*- oder *Arthrospira*-Arten (siehe Tabelle 1). Dabei liegt der europäische Marktanteil bei ca. 5 % (Vigani et al., 2015). Neben unaufgeschlossener Biomasse werden auch, wie in Tabelle 1 aufgelistet, Mikroalgenextrakte wie die natürlichen Farbstoffe Astaxanthin (rot), Beta-Carotin (rot bis orange) und Phycocyanin (blau) produziert. Der Preis so genannter „High-value“ Produkte ist sehr hoch, sodass sich die Kultivierung von Mikroalgen insbesondere in geschlossenen Systemen wirtschaftlich lohnt. Durch die enorme Anzahl an Mikroalgenarten ist das Potenzial zur Steigerung des weltweiten Angebots groß. Insbesondere in Europa wird dies jedoch durch die „Novel food regulation“ (EC) No. 258/97 erschwert.

Tabelle 1: Marktangaben zugelassener mikroalgenbasierender Produkte für die Produktion von Lebens- und Futtermittel (^aBorowitzka, 2013; ^bEriksen, 2016; ^cVernès et al., 2016; ^dVigani et al., 2015)

Mikroalgenprodukt	Produktionsvolumen (t _{BMTG} a ⁻¹)	Herstelleranzahl	Marktwert der jährlichen Produktion	Potentielle Märkte (synthetische oder natürliche Produkte)
Unaufgeschlossene Mikroalgenbiomasse				
<i>Arthrospira</i>	5000 ^{a,d}	> 15 ^d	40 Mio. US\$ ^d	Keine synthetischen Alternativen ^d
<i>Chlorella</i>	2000 ^d	> 70 ^d	38 Mio. US\$ ^d	Keine synthetischen Alternativen ^d
Extrakte				
Astaxanthin (<i>Hae-matococcus pluvialis</i>)	300 ^d	> 8 ^d	10 Mio. US\$ ^d	150-240 Mio. US\$ ^{a,b}
Phycobilin-Protein Pigmente (incl. Phycocyanin)	Nicht dokumentiert	> 2 ^d	5-10 Mio. US\$ ^c	> 60 Mio. US\$ ^{a,b}
EPA/DHA (<i>Phaeodactylum tricornutum</i>)	240 ^d	> 4 ^d	300 Mio. US\$ ^a	14 Mrd. US\$ ^d
β-Carotene (<i>Dunaliella salina</i> , <i>Nannochloropsis</i> sp.)	1200 ^d	> 10 ^d	23-81 Mio. US\$ ^b	250-280 Mio. US\$ ^{a,b}

Bei den phototrophen Kultivierungstechniken von Mikroalgen unterscheidet man zwischen offenen und geschlossenen Systemen. Offene Systeme (Open Pond Systeme), wie Open Raceway Ponds sind vergleichsweise kostengünstig in der Anschaffung und Produktion (durch relativ simplen Aufbau), haben einen geringen Energiebedarf und sind einfach zu reinigen und Instand zu halten. Daher wird dieses System in den größten Kultivierungsanlagen weltweit verwendet (siehe Abbildung 1). Open Pond Systeme sind jedoch durch einen hohen Flächenbedarf, einer schlechten Mischbarkeit, Licht- und CO₂-Verteilung und einer daraus folgenden geringen Biomasseproduktivität charakterisiert. Des Weiteren sind offene Systeme nur für wenige Arten geeignet (z.B. *Arthrospira* und *Dunaliella*), da das hohe Kontaminationsrisiko nur durch extreme Bedingungen wie ein hoher Salzgehalt oder pH-Wert minimiert werden kann. Die Kultivierung ist stark durch die klimatischen Bedingungen des Standortes beeinflusst, sodass sich nur Standorte mit gemäßigten Klima und einer hohen Anzahl an Sonnenstunden über das Jahr (wie Hawaii, USA oder der Mittelmeerraum) eignen.



Abbildung 1: Linkes Bild zeigt Cyanotech auf Hawaii (Milledge, 2011) und rechtes Bild Earthrise Farms in Kalifornien [<http://ieaghg.org/publications/greenhouse-news/61-greenhouse-issues-december-2005-number-80>, 06.06.2018]

Geschlossene Systeme wie Röhren- oder Flachplatten-Photobioreaktoren (PBR) erzielen höhere Biomasseproduktivitäten, da sie aus großen von Sonnenlicht durchfluteten Flächen bestehen. Diese Systeme sind ebenfalls für die Freilandkultivierung geeignet, besitzen ein verringertes Kontaminationsrisiko, sind sterilisier- und temperierbar (Kultivierung in Gewächshäusern). Die Systeme sind jedoch hinsichtlich industrieller Produktion schwierig zu skalieren und durch hohe Energieverbräuche und hohe Anschaffungskosten charakterisiert. Vorwiegend werden Glas oder durchsichtige Kunststoffe zur PBR-Herstellung verwendet. Diese können bei dichten Kulturen durch Biofilmbildung jedoch leicht zu Verschmutzen führen, was einen erhöhten Reinigungsaufwand zur Folge hat.



Abbildung 2: Links: Röhren-Photobioreaktor an der Universität Wageningen in den Niederlanden [<http://www.biosolarcells.nl/en/onderzoek/algen/06.06.2018>]

Rechts: Flachplatten-Photobioreaktor am Fraunhofer CBP in Leuna, Deutschland

[https://www.igb.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2015/microalgae_-_produced-on-a-commercial-scale.html, 06.06.2018]

Bestimmte Mikroalgenarten wie *Chlorella vulgaris* können in Stahlfermentern (Rührkesselreaktoren) heterotroph mit einer organischen energiereichen C-Quelle (vorwiegend Zucker) im Dunkeln schneller und dichter wachsen im Vergleich zu phototrophen Mikroalgenkulturen mit

Licht als Energie- und CO₂ als Kohlenstoffquelle. Weitere Vorteile der heterotrophen Kultivierung sind die bereits vorhandene gut skalierbare Fermentationstechnik (z.B. Hefezellfermentation zur Gewinnung von Ethanol), die Standort- und Jahreszeitunabhängigkeit (Morales-Sánchez et al., 2017), reduzierte Biomasse-Aufarbeitungskosten, Kontrolle der Substratkonzentration, der geringe Flächenbedarf, die Möglichkeit der Herstellung unter Reinraumbedingungen, die recht einfache Sterilisierbarkeit, die Möglichkeit axenischer Kultivierung sowie der guten Steuerung und Kontrolle der Kultivierungsbedingungen. Nachteile im Vergleich zur phototrophen Kultivierung sind vor allem der hohe Sauerstoffbedarf und der Ausstoß von CO₂, die schwierige und energieintensive Durchmischung bei hoher Viskosität und das erhöhte Risiko von Aggregatformierung und der daraus folgende osmotischen Stress (Bumbak et al., 2011).

3.2 Modellierung

Durch die Simulation möglicher Entwicklungspfade der Bioökonomie oder einer "Industrie 5.0", wie sie zum Teil auch schon genannt wird (Schütte, 2018), können mögliche Chancen und vermeidbare Fehlentwicklungen des Transformationsprozesses aufgezeigt werden. Die dabei verwendeten Modellansätze müssen eine umfassende Betrachtung des gesamten bioökonomischen Komplexes ermöglichen. Es müssen Wechselwirkungen zwischen Ressourcen, Produktion, Konsum, Märkte und Branchen sowie der Umweltwirkungen gleichzeitig analysiert werden (O'Brien et al., 2017). Einen Überblick über die verschiedenen Modellansätze, die für eine ganzheitliche Betrachtung der Bioökonomie benötigt werden, geben Angenendt et al. (2018).

In Baden-Württemberg hat die Landesregierung das Forschungsprogramm Bioökonomie Baden-Württemberg initiiert, aus dem ein übergreifendes Kompetenznetz Modellierung hervorgegangen ist, das mögliche Entwicklungen der Bioökonomie für verschiedene Formen der Biomassebereitstellungen, Nutzungspfade und Sektoren analysiert. Hierfür werden allgemeine und partielle Gleichgewichts-, Energiesystem-, Materialfluss-, Ökobilanzierungs-, landwirtschaftliche Betriebsmodelle sowie Standortoptimierungsansätze für Biomassekonversionsanlagen eingesetzt. Dabei lassen sich die meisten Modelle für integrative Modellierungsszenarien mit sogenannten „soft links“ verknüpfen. Es können aber auch einzelne Modellansätze zur Beantwortung spezifische Fragestellungen auf einer niedrigeren räumlichen Ebene miteinander gekoppelt werden (Petig et al., 2018). Speziell für bioökonomische Fragestellungen auf der Ebene von Baden-Württemberg wurde eine Schnittstelle zwischen dem landwirtschaftlichen Angebotsmodell EFEM und dem techno-ökonomischen Standortoptimierungsmodell Bi-OLoCaTe entwickelt (Abbildung 3). Durch die Modellkopplung lassen sich potenzielle Standorte von Biomassekonversionsanlagen techno-ökonomisch bewerten.

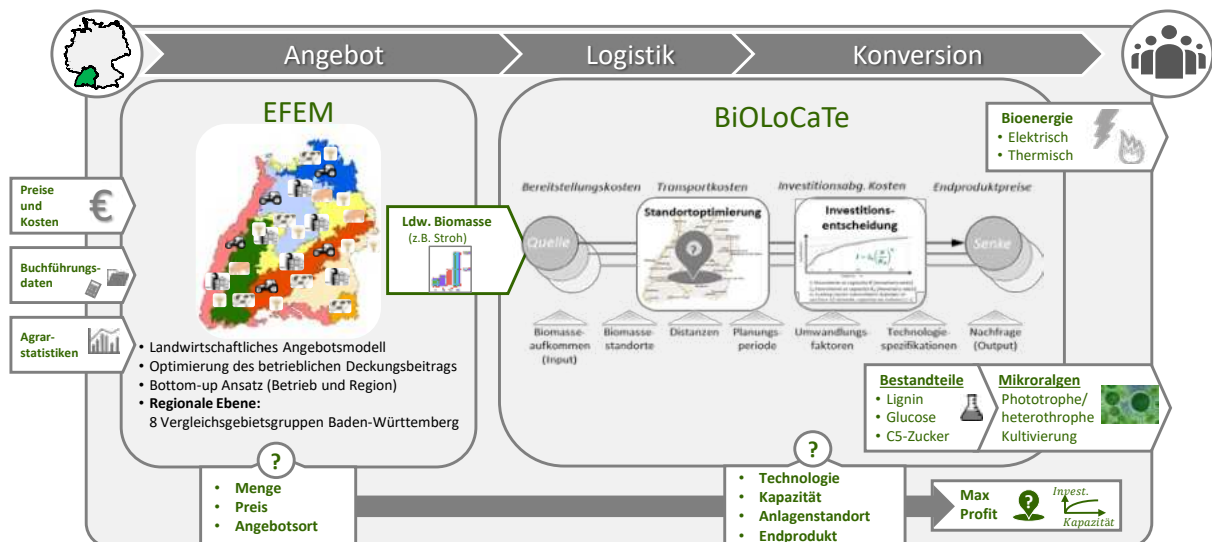


Abbildung 3: Schematische Übersicht der EFEM-BiOLOCaTe Modellkopplung

3.2.1 Landwirtschaftliche Angebotsmodell EFEM

Für das Forschungsprojekt wurde das landwirtschaftliche Angebotsmodell EFEM eingesetzt. Dieses Modell wurde im Fachgebiet für Landwirtschaftliche Betriebslehre entwickelt und bereits zur Beantwortung von unterschiedlichen umweltökonomischen Fragestellungen im Bereich der landwirtschaftlichen Produktion eingesetzt.

EFEM ist ein komparativ statisches lineares Programmierungsmodell, das den gesamtbetrieblichen Deckungsbeitrag maximiert. Es ist ein *Bottom-up* Ansatz, der auf einzelbetrieblicher und regionaler Ebene eingesetzt werden kann. Die Regionalisierung erfolgt durch die Hochrechnung der einzelbetrieblichen Ergebnisse. Dabei erfolgt die weitere regionale Untergliederung Baden-Württembergs anhand von Vergleichsgebietsgruppen (VGG). Diese Untergliederung basiert auf Kriterien ähnlicher natürlicher landwirtschaftlicher Ertragsfähigkeit, wobei geologische, topographische und klimatische Gegebenheiten maßgeblich sind (LEL, 2015). Das Modell besteht aus drei Teilmodulen, dem Betriebsstruktur-, dem Produktions- und dem Hochrechnungsmodul.

Die Betriebsmittel- und Erzeugerpreise sind dabei dem Modell exogen vorgegeben, sowie auch die Kapazitätsgrenzen der im Modell abgebildeten Betriebe. Die Definition der Betriebsmodelle für das Betriebsstrukturmodell erfolgt auf Basis der Buchführungsdaten des Testbetriebsnetzes von Baden-Württemberg. Die Einteilung und die Auswahl der typischen Betriebe erfolgt nach Betriebstypen anhand der EU-Klassifizierung. Die Kapazitäten der ausgewählten typischen Betriebe bilden den Restriktionsrahmen des linearen Optimierungsprozesses (Betriebsstrukturmodul).

Kernstück von EFEM ist das Produktionsmodul. Hier sind alle wichtigen pflanzenbaulichen und tierischen Produktionsverfahren integriert. Diese lassen sich hinsichtlich Erträgen, Intensität-

ten, Leistungen und Kosten regional unterscheiden. Neben den konventionellen Produktionsverfahren sind alle wichtigen durch Agrarumweltmaßnahmen geförderten Produktionsvarianten integriert. Einige der in EFEM berücksichtigten Ackerbaukulturen können sowohl dem Nahrungsmittel-/ Futtermittelmarkt als auch dem Bioenergiepfad zugeführt werden. Regionaltypische Anbaustrukturen werden durch modellinterne Fruchtfolgerestriktionen für die einzelnen VVG berücksichtigt.

Bei der Berechnung der Deckungsbeiträge der einzelnen Produktionsverfahren wurden Preis-, Ertrags- und Kostendurchschnittswerte über mehrere Jahre gebildet, um jährliche Schwankungen auszugleichen. In die Berechnung fließen alle variablen Kosten inklusive der Maschinenkosten ein. Bei der Grünlandbewirtschaftung werden die drei verschiedenen Bewirtschaftungssysteme Weide, Heu- und Silagenutzung unterschieden, die jeweils in der Schnitthäufigkeit und Düngeintensität variiert werden können. Der Grünlandaufwuchs kann außerdem zur Biogasgewinnung verwendet werden. Auch bei den Grünlandverfahren wurden die MEKA- bzw. FAKT-Fördermaßnahmen in EFEM integriert.

Für Miscanthus, der ein Schwerpunkt in dieser Konzeptstudie darstellt, wurde eine Anbauphase von 20 Jahren angenommen mit einer Etablierungszeit von einem Jahr in der keine Ernte durchgeführt wird. Die einmaligen Kosten für Pflanzung und Rekultivierung, sowie die wiederkehrenden für Ernte und Düngung wurden für die Anbauzeit annualisiert. Miscanthus hat im Vergleich zu den traditionellen Produktionszweigen eine sehr lange Kultivierungszeit in der keine wechselnde Fruchtfolge auf dem genutzten Ackerland möglich ist. Zusätzlich ist der Miscanthusanbau derzeit noch wenig verbreitet wodurch potentielle Anbauer ein höheres Risiko durch fehlende regionale Beratung im Vergleich zu andere landwirtschaftlichen Kulturpflanzen haben. Um diese Risiko in EFEM abzubilden ist eine Risikoprämie (willingness-to-accept) für den Miscanthusanbau implementiert, die zusätzlich zu den Produktionskosten anfällt. Der Wert dieser Risikoprämie basiert auf einem Choice Experiment, das im Rahmen des Projektes „Agrarökonomische Analyse von Verfahren zur Erzeugung lignozellulosehaltiger Biomasse und deren Akzeptanz in der Landwirtschaft“ aus dem *Forschungsprogramm Bioökonomie Baden-Württemberg* durchgeführt wurde (Gillich et al., in review). Des Weiteren wurden die maximalen Anbauflächen von Miscanthus in den verschiedenen VGG begrenzt. Diese Werte beinhalten klimatische und naturschutzfachliche Restriktionen für den Miscanthusanbau, die im Rahmen des BWPLUS Projektes „Nachwachsende Energieträger und Biodiversität: naturschutzbezogene und ökonomische Entwicklung und Bewertung von Anbauszenarien (NawEnNat) und Abschätzung der Produktionspotenziale für den Anbau von Energiepflanzen zur CO₂-Bindung in Baden-Württemberg und deren ökologische und ökonomische Bewertung“ ermittelt wurden (Kaule et al., 2011).

Bei der Tierproduktion wird die Milchviehhaltung, inkl. Färsen zur Bestandsergänzung, weibliche und männliche Kälber, Bullen- und Färsenmast, Mutterkuhhaltung, die Veredelungsproduktion mit dem Produktionsschwerpunkt Schweinehaltung (Schweinemast und Zuchtsauen) in EFEM abgebildet. Um bei den Modellsimulationen die Einhaltung der wichtigsten Cross

Compliance Verpflichtungen einzuhalten, sind in EFEM neben den Fruchtfolgerestriktionen auch Humus- und Stickstoffbilanzen, sowie die Obergrenzen für organische Düngung im Rahmen der gültigen Düngeverordnung integriert.

Die Projektion der einzelbetrieblichen Ergebnisse auf die regionale Ebene erfolgt mit Hochrechnungsfaktoren, die mit Hilfe eines linearen Optimierungsansatzes ermittelt werden (Hochrechnungsmodul). Die Hochrechnungsfaktoren werden dabei aus den regionalen Kapazitäten der landwirtschaftlichen Regionalstatistik abgeleitet. Eine genaue Beschreibung dieser Vorgehensweise und von EFEM geben Kazenwadel (1999) und Schäfer (2006). Aktuelle Anwendungen von EFEM sind in Krimly et al. (2016) und Wagner et al. (2017) beschrieben.

EFEM wird für die nachfolgenden Modellszenarien auf das Referenzjahr 2010 kalibriert. Der Abgleich der modellierten Tierzahlen, Flächenanteile und der Flächennutzung mit den Daten der Agrarstrukturerhebungen 2010 des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg diente der Validierung der Abbildungsgüte von EFEM. Die Modellergebnisse zeigen für die pflanzenbauliche Produktion mit Abweichungen von max. 10 % eine gute Übereinstimmung mit den statistischen Daten. Lediglich die Bedeutung von Klee gras wird mit -25 % der modellierten Fläche deutlich gegenüber der Realität unterschätzt. Der Gesamtumfang von Ackerfutter wird mit einer Abweichung von -2 % allerdings gut abgebildet. Bei der tierischen Produktion führen die integrierten Stallplatzrestriktionen zu Abweichungen im Vergleich zur Statistik von höchstens 7 %.

3.2.2 Techno-ökonomisches Standortmodell BiOLoCaTe

Das verwendete Modell BiOLoCaTe ist ein lineares gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell zur strategischen Planung biomassebasierter Wertschöpfungsketten, das basierend auf verfügbarem Biomasseaufkommen eine Standortoptimierung von Konversionsanlagen bei gleichzeitiger Technologie- und Kapazitätsentscheidung durchführt. Die Bewertung integriert die Prozesse Bereitstellung, Logistik und Konversion und erfolgt auf dem erzielbaren Gesamtgewinn aus der Veräußerung elektrischer und thermischer Bioenergie oder biobasierter Erzeugnisse. Daraus resultierende Modellergebnisse können zur Entscheidungsunterstützung bei der regionalen Planung biomassebasierter Wertschöpfungsketten verwendet werden.

Bei der Gestaltung biomassebasierter Wertschöpfungsketten ist eine Vielzahl strategischer Entscheidungen zu treffen. Hierbei ist zu beachten, dass die Planungsaufgaben sich gegenseitig beeinflussen und deshalb mit ihren Wechselwirkungen betrachtet werden sollten (Schwaderer, 2012). Ein wesentlicher Aspekt dabei ist die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Investitionen in den Bau der Biomassekonversionsanlagen. Diese beinhaltet die Bruttoinvestition und die Betriebskosten (bestehend aus Energiekosten, Kosten für Wartung, Instandhaltung, Betriebsmittel, Resteentsorgung, Versicherung, Steuern und Personalkosten). Die Einnahmen des laufenden Betriebes und die entstehenden Kosten werden für die geplante Nutzungsdauer der Anlage mittels Annuitätenmethode abschätzt (FNR, 2014).

Im vorliegenden Anwendungsfall bildet die bioenergetische Verwertung von Biomasse die Grundlage für die Modellierung der Wertschöpfungskette. Den Ausgangspunkt hierfür bilden die Biomassequellen h , welche die Biomasseart b bereitstellen. Die jeweiligen Biomassearten werden zu potenziellen Standorten i transportiert, um die Biomassen mit den Konversionstechnologien p zu den Endprodukten elektrische und thermische Energie oder organischen Komponenten zu verarbeiten (vgl. Tabelle 2). Eine Konversionstechnologie p (z.B. Verbrennung) vereint ein Konversionsverfahren t (z.B. Festbettverbrennung) sowie die installierte elektrische Leistung und den Biomasseinput als Kapazität des Konversionsverfahrens. Die installierte elektrische Leistung entspricht dem erzeugten Endprodukt, welches in ein Netz eingespeist und veräußert wird. Konversionstechnologien werden in ihrer Gesamtheit modelliert, so dass einzelne Produktionsschritte an verschiedenen Standorten als auch Vorbehandlungsmaßnahmen und mögliche Zwischenprodukten nicht abgebildet werden. Innerhalb des Optimierungsmodells determiniert die Entscheidungsvariable m_{pbhi} den kontinuierlichen Massestrom und v_{pbi} die ganzzahlige Standortentscheidung.

Tabelle 2: Indexmengen, Variablen sowie Parameter und Gleichungen von BiOLoCaTe

Indexmengen		Entscheidungsvariablen	
$p \in \{1, \dots, P'', P', P\}$	Konversionstechnologien	$m_{pbhi} \geq 0$	Kontinuierliche Variable: Massestrom Biomasse [$t_{FM} a^{-1}$]
$b \in \{1, \dots, B\}$	Biomassearten	$\forall p \in \{1, \dots, P\}$	
$h \in \{1, \dots, H\}$	Biomassequellen	$\forall b \in \{1, \dots, B\}$	
$i \in \{1, \dots, I\}$	Mögliche Standorte	$\forall h \in \{1, \dots, H\}$	
$t \in \{1, \dots, T\}$	Konversionsverfahren	$\forall i \in \{1, \dots, I\}$	
$n \in \{1, \dots, N\}$	Intervalle	$v_{pbi} \in \mathbb{N}_0$	Ganzzahlige Variable: Standortentscheidung
		$\forall p \in \{1, \dots, P\}$	
		$\forall b \in \{1, \dots, B\}$	
		$\forall i \in \{1, \dots, I\}$	
Weitere Variablen			
$z^{\text{ökonomisch}}$	Zielfunktionswert der ökonomischen Bewertung [$\text{€ } a^{-1}$]		
K^x	Kosten des Prozesses x (Bereitstellung, Logistik) [$\text{€ } a^{-1}$]		
$G^{\text{Konversion}}$	Gesamtgewinn [$\text{€ } a^{-1}$]		
$p^{el}(V_p, X_p^{el})$	Verkaufspreis für elektrischen Energie in Abhängigkeit der Anlagenverfügbarkeit und der installierten elektrischen Leistung [€ kWh_{el}^{-1}]		
$w^{th}(X_p^{th})$	Relativer Anteil der erzeugten thermischen Energie, die verkauft wird in Abhängigkeit von der installierten thermischen Leistung		
Parameter			
a_{bh}	Angebotsmenge der Biomasseart b aus der Biomassequelle h [$t_{FM} a^{-1}$]		
c_b^{Ber}	Kosten für die Bereitstellung der Biomasseart b [$\text{€ } t_{FM}^{-1}$]		
$c_b^{Log_fix}$	Entfernungsunabhängige Logistikkosten der Biomasseart b [$\text{€ } t_{FM}^{-1}$]		
$c_b^{Log_var}$	Entfernungsabhängige Logistikkosten der Biomasseart b [$\text{€ } (t_{FM} * \text{km})^{-1}$]		
d_{hi}	Entfernung von der Biomassequelle h zum Standort i [km]		
I_p	Investition für die Konversionstechnologie p [€]		
I_p^{CAPEX}, I_p^{OPEX}	Basiswert für die Investitionsfunktion der Konversionstechnologie p : [€], [$\text{€ } t^{-1}$], [€ kWh^{-1}]		
g_p	Gewinn durch die Konversion mit der Konversionstechnologie p [$\text{€ } a^{-1}$]		

p^{th}	Verkaufspreis für thermische Energie [€ kWh_{th}^{-1}]
p_p^x	Produktpreis x (für Lignin, Eiweißsubstitute, C6-Zucker): [€ t_{FM}^{-1}]
q^{th}	Ausbaukosten für das Wärmenetz [€ kWh_{th}^{-1}]
lhv_b	Heizwert der Biomasseart b [MJ t_{FM}^{-1}]
n_p^{CAPEX}, n_p^{OPEX}	Skalierungsfaktor der Kapitalaufwendungen (0,7) und der Betriebsaufwendungen (0,95) der Technologie p : [-]
$\beta_t^{min}, \beta_t^{max}$	Unter-/Obergrenze für installierte elektr. Leistung eines Konversionsverfahrens t [MW_{el}]
β_p, β_p^0	Basiskapazität und realisierte Kapazität der Technologie p : [$\text{t}_{FM} a^{-1}$]
f_{pb}	Biomassemenge zur Konversion durch die Konversionstechnologie p [$\text{t}_{FM} a^{-1}$]
η_p^{el}	Elektrischer Wirkungsgrad der Konversionstechnologie p
η_p^{th}	Thermischer Wirkungsgrad der Konversionstechnologie p
o^{th}	Relativer Verlust der thermischen Energie im Wärmenetz
V_p	Anlagenverfügbarkeit der Konversionstechnologie p [$h a^{-1}$]
X_p^{el}	Installierte elektrische Leistung der Konversionstechnologie p [MW_{el}]
X_p^{th}	Installierte thermische Leistung der Konversionstechnologie p [MW_{th}]
ϑ_{bp}^x	Konversionsfaktor zur Umwandlung der Biomasse b zu Produkt x (für Lignin, Eiweißsubstitute, C6-Zucker) durch die Technologie p : [-]

Modellgleichungen

Zielfunktion	$\max z^{\text{ökonomisch}} = G^{\text{Konversion}} - K^{\text{Bereitstellung}} - K^{\text{Logistik}}$	(1)	
Gesamtgewinn	$G^{\text{Konversion}} = \sum_{p=1}^P \sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^I g_p \cdot v_{pbi}$	(2)	
Bereitstellungskosten	$K^{\text{Bereitstellung}} = \sum_{p=1}^P \sum_{b=1}^B \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I c_b^{\text{Ber}} \cdot m_{pbhi}$	(3)	
Logistikkosten	$K^{\text{Logistik}} = \sum_{b=1}^B \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I (c_b^{\text{Log.fix}} + c_b^{\text{Log.var}} \cdot d_{hi}) \cdot \sum_{p=1}^P m_{pbhi}$	(4)	
Bereitstellungsangebot	$\sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I m_{pbhi} \leq a_{bh}$	$\forall b \in \{1, \dots, B\}$ $\forall h \in \{1, \dots, H\}$	(5)
Konversion	$X_p^{th} = \frac{X_p^{el}}{\eta_p^{el}} \cdot \eta_p^{th}$	$\forall p \in \{1, \dots, P\}$	(6)
Biomasseinput	$f_{pb} = \frac{X_p^{el} \cdot V_p \cdot 3600 \frac{\text{S}}{\text{h}}}{lhv_b \cdot \eta_p^{el}}$	$\forall p \in \{1, \dots, P\}$ $\forall b \in \{1, \dots, B\}$	(7)
Anlagenversorgung	$\sum_{h=1}^H m_{pbhi} = f_{pb} \cdot v_{pbi}$	$\forall p \in \{1, \dots, P\}$ $\forall b \in \{1, \dots, B\}$ $\forall i \in \{1, \dots, I\}$	(8)
Anlagengewinn der Bioenergie-technologie	$g_p = (10 \cdot p^{el}(V_p, X_p^{el}) \cdot X_p^{el} + 10 \cdot (p^{th} - q^{th}) \cdot (1 - o^{th}) \cdot w^{th}(X_p^{th}) \cdot X_p^{th}) \cdot V_p - I_p$	$\forall p \in \{1, \dots, P\}$	(9)
Anlagengewinn der Mikroalgen-bioraffinerie	$g_p = p_p^x \cdot \vartheta_{bp}^x \cdot f_{bp} - \left(I_p^{CAPEX} \left(\frac{\beta_p}{\beta_p^0} \right)^{n^{CAPEX}} + I_p^{OPEX} \cdot \left(\frac{\beta_p}{\beta_p^0} \right)^{n^{OPEX}} \right)$	$\forall b \in \{1, \dots, B\}$ $\forall p \in \{1, \dots, P\}$	(10)
Kapazitätsgrenzen	$\beta_t^{min} \leq X_p^{el} \leq \beta_t^{max}$	$\forall p \in \{1, \dots, P\}$ $\forall t \in \{1, \dots, T\}$	(11)

Mittels KWK-Technologien wird über das Konversionsverfahren der Verbrennung (7) (8) gleichzeitig elektrische und thermische Energie aus Biomasse (5) gewonnen. Die erzeugte Energie berechnet sich aus technischen Wirkungsgraden und der Anlagenverfügbarkeit als auch impliziten Eingangsgrößen wie dem Wassergehalt (6). Der Preis für elektrische Energie bemisst sich für eine zwanzigjährige Nutzungsdauer der Anlage nach der Förderhöhe aus der Vergütung gemäß EEG 2014 für das Produktionsjahr 2015 und orientiert sich an der Bemessungsleistung der Anlage (9). Während elektrische Energie vollständig veräußert wird, kann

thermische Energie unter Berücksichtigung von Ausbaurkosten und Wärmeverlusten zu einem angenommenen Preis von 0,06 € pro kWh_{th} verkauft werden (9). Zur Berechnung des Gesamtgewinns werden neben den Einnahmen die getätigten Anlageninvestitionen und verschiedene Kostenarten miteinbezogen (1) (9). Die finale Investitionsentscheidung hängt neben den Reststoffkosten und der preisabhängigen Biomasseangebotsmenge, wesentlich von der Größendegression ab, welche die Analgenkapazität definiert. In Anlehnung an Koch (2009) und Schatka (2011) nutzt der vorliegende Modellierungsansatz einzelne diskrete Werte der degressiven Kostenkurve zur Investitionsabschätzung. Die daraus entstehenden Eiweißsubstitute werden am Markt verkauft. Die Kapazitätsbereiche der Konversionstechnologien, die dasselbe Konversionsverfahren nutzen (P'), werden dabei durch die minimale und maximale Leistung beschränkt (11) (You & Wang, 2011). Im Gegensatz zur Veräußerung von Bioenergie wird in der Mikroalgenbioraffinerie Lignin zum Marktpreis verkauft und der Hydrolysezucker in heterotrophen Reaktoren mit Mikroalgen zum Eiweißsubstitut verwertet (10). Diese Modellerweiterung um die Mikroalgenkultivierung beruht auf Ergebnissen aus der Untersuchung möglicher Mikroalgenkultivierungsformen in Kapitel 3.1. Zur Verrechnung relevanten Eingangsdaten in das Optimierungsmodell wurde ein spezielles Makro programmiert.

Das vorgestellte gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodell integriert strategische Planungsaufgaben der Standortplanung, Verfahrensauswahl und Kapazitätsplanung und wird im Folgenden auf die Fragestellung dieser Konzeptstudie angewendet. Eingangsdaten umfassen dabei das räumlich aufgelöste und preisabhängige Strohangebot aus dem landwirtschaftlichen Angebotsmodell EFEM. Basierend darauf wird eine ökonomische Bewertung der biomassebasierten Wertschöpfungsketten vollzogen und die Verwertung von Reststroh in Baden-Württemberg untersucht.

Damit potentielle Standorte für Biomassekonversionsanalgen identifiziert werden können, wird eine Eignungsprüfung durchgeführt, um nach verschiedenen Kriterien die regionale Beschaffenheit Baden-Württembergs zu bewerten. Hierfür wurden die folgenden sechs Hauptkriterien definiert:



Jedem Kriterium wurden weitere Unterkriterien zugeordnet, um eine möglichst detaillierte Bewertung vornehmen zu können. Diese Kriterien wurden innerhalb einer Masterarbeit am KIT-IIP als die wesentlichen zur Eignungsbewertung von Standorten für Biomassekonversionsanalgen definiert. Anschließend wurden die Kriterien unter Zuhilfenahme von zehn Expertenmeinungen im Paarweisen Vergleich gewichtet und mittels der AHP-Methode (Analytic Hierarchy Process) quantifiziert.

Die Ergebnisse aus dem Fragebogen und der Kriteriengewichtung wurden für eine Eignungsuntersuchung in ein Geographisches Informationssystem (GIS) überführt. Der Fragebogen ist

exemplarisch im Anhang aufgeführt. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Eignungsuntersuchung in Form einer Heatmap und die abgeleiteten 33 potentiellen Anlagenstandorte dargestellt. Diese Auswahl entspricht Standorten mit der höchsten Eignung für die Errichtung von Anlagen zur Konversion lignocellulosehaltiger Biomasse in Baden-Württemberg. Die finalen Ergebnisse der Masterarbeit und der Eignungsuntersuchung werden vom Studierenden am 27.-28. September auf der „Upper Rhine Cluster for Sustainability Research - Conférence Internationale 2018“ in Strasbourg vorgestellt.

Ausgehend von den identifizierten möglichen Anlagenstandorten (den Biomassesenken) und unter Berücksichtigung des Biomasseaufkommens für jede Gemeinde (den Biomassequellen) wurden die tatsächlichen Straßenentfernungen zwischen den Quellen und den Senken ermittelt. Das aufgespannte Transportnetzwerk liegt einer 33x1103 Transportmatrix zugrunde. Fehlende Distanzen (ca. 10 %) wurden mit einem Straßenlagefaktor von 1,6 abgeschätzt. Dieser Faktor repräsentiert das Verhältnis zwischen der euklidischen Distanz und der tatsächlichen Straßenentfernung in Baden-Württemberg.

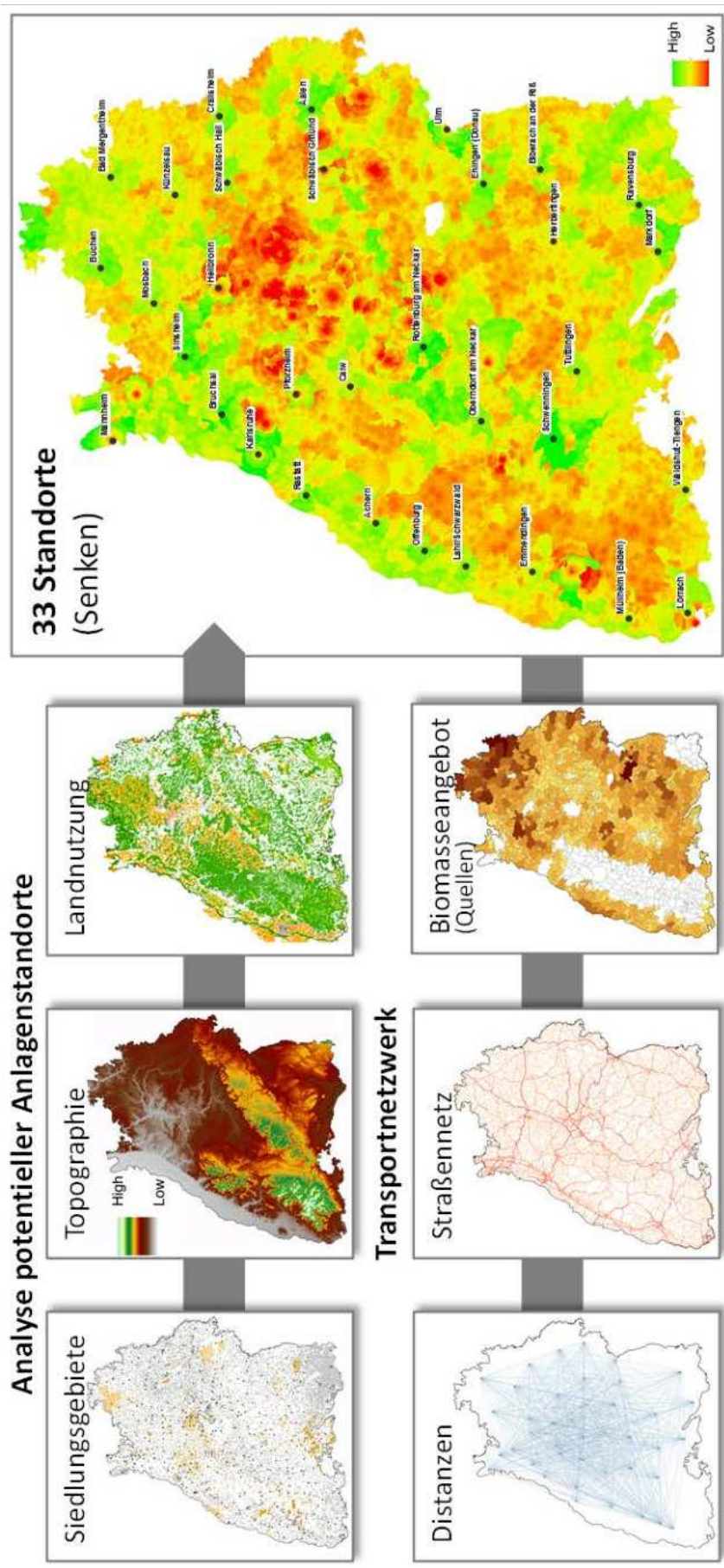


Abbildung 4: Identifizierung geeigneter Standorte für Biomassekonversionsanlagen nach der Eignung (Grün: geeignet; Rot: ungeeignet) unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien für 33 potentielle Anlagenstandorte in Baden-Württemberg

3.2.3 Modellschnittstelle: Datenübergabe zwischen EFEM und BiOLoCaTe

Während die Berücksichtigung der Substratnachfrage von BiOLoCaTe auf Gemeindeebene erfolgt, rechnet EFEM auf der Ebene von VGG. Dementsprechend muss das modellierte Bio-masseangebot von dieser größeren räumlichen Einheit auf die Gemeindeebene verteilt werden. Aus dem modellierten Stroh- und Miscanthusangebot wird dabei zunächst der durchschnittliche Ertrag für jede VGG berechnet, indem das gesamte modellierte Angebot der VGG auf die jeweilige Ackerfläche verteilt wird. Anschließend wird dieser durchschnittliche Ertrag den einzelnen Gemeinden nach VGG Zugehörigkeit zugewiesen. Der Stroh- und Miscanthusertrag wird dann mit der jeweiligen Ackerfläche der einzelnen Gemeinden multipliziert und ergibt so das Angebot in Tonne Frischmasse pro Gemeinde. Diese Mengen werden abschließend an BiOLoCaTe zur Standortoptimierung übergeben. Die für die Verteilung benötigte Größe der Ackerfläche der Gemeinden wird der Landwirtschaftszählung 2010 entnommen. Als Angebotsstandort dient in dieser Untersuchung der geografische Mittelpunkt der jeweiligen Gemeinde. Da in EFEM nicht die gesamte Strohnachfrage aus der Tierproduktion berücksichtigt wird (z.B. Pferdehaltung), wird diese Nachfrage anhand der relevanten Tierzahlen aus der Statistik und Produktionskennzahlen der Tierhaltung (KTBL, 2017; Rösemann et al., 2015) berechnet und von dem modellierten Angebot aus EFEM abgezogen.

4 Planung und Ablauf des Forschungsvorhabens

Die im Projektantrag geplanten vier Arbeitspakete konnten weitestgehend planungsgemäß durchgeführt werden und werden nachfolgend beschrieben (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Arbeitsplan im Rahmen der Projektlaufzeit

Arbeitsprogramm	Wochen ab Projektbeginn											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Projekttreffen												
1.1. Planungstreffen, Datendefinition	■		■		■		M2		M3			
1.1. Szenariendefinition							■		■			
1.2. Evaluierung der Untersuchungsergebnisse											■	
1.3. Endberichterstellung												■
2. Identifikation Produktionsprozesse Alge												
2.1. Literatursauswertung	■			M1								
2.2. Festlegung Produktionsprozesse					■		■					
2.3. Ermittlung Kosten- und Erlösstruktur						■						
3. EFEM Modellierung												
3.1. Modellkalibrierung					■			M4				
3.2. Modelldurchlauf							■		■			
3.3. Datenübergabe an BiOLoCaTe									■			
4. BiOLoCaTe Modellierung												
4.1. Modellanpassung	■											
4.2. Modelldurchlauf											■	
4.3. Szenarienanalyse												M5

Meilensteine

M1: Die für die für die modellbasierte Analyse identifizierten Algenkultivierungsprozesse sind festgelegt.

M2: Vorläufige Szenarien werden definiert und in einem Expertenworkshop diskutiert.

M3: Endgültige Szenarien sind definiert.

M4: Standortbezogenes Biomasseangebot für relevante Kulturen wird an BiOLoCaTe übergeben.

M5: Techno-ökonomische Standortanalyse für die ausgewählten innovativen Prozessketten ist abgeschlossen. Standorte und Ausgestaltung geeigneter Pilotanlagen werden definiert.

1. Projekttreffen (UHO-ILB, UHO-IAM, KIT-IIP)

Der kurze Bearbeitungszeitraum und die interdisziplinäre Fragestellung haben zahlreiche Projekttreffen zur Definition des Datenbedarfs und der Festlegung von realitätsnahen Modellszenarien für Baden-Württemberg (**M2, M3**) erfordert. Durch die gemeinsame intensive Evaluierung der Untersuchungsergebnisse, konnten Empfehlungen für potenzielle Pilotanlagen im Bereich von innovativen Prozessketten von Biomassekonversions- und Algenkultivierungsanlagen abgeleitet werden (vgl. Kapitel 5.3). Leider konnte der geplante Expertenworkshop in der kurzen Bearbeitungszeit nicht durchgeführt werden. Stattdessen wurden telefonisch Experten zu den getroffenen Annahmen befragt.

2. Identifikation Produktionsprozesse Alge (UHO-IAM, UHO-ILB, KIT-IIP)

Anhand von Literaturlauswertungen sollen für Baden-Württemberg geeignete Produktionsprozesse für die phototrophe und heterotrophe Mikroalgenkultivierung identifiziert werden. Dies beinhaltet insbesondere den Einbezug von wirtschaftlichen und klimatischen Standorteigenschaften innerhalb des Landes. Des Weiteren werden die benötigten Kosten- und Erlösstrukturen erfasst und als Eingangsparameter für die BiOLoCaTe Modellierung bereitgestellt. Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 2 werden in Kapitel 5.1 beschrieben (**M1**).

3. EFEM Modellierung (UHO-ILB)

Mit Hilfe des landwirtschaftlichen Angebotsmodell EFEM wurde analysiert, inwieweit die Landwirtschaft in Baden-Württemberg unter derzeitigen agrarpolitischen Rahmenbedingungen Biomasse für die untersuchten Prozessketten bereitstellen kann. EFEM liefert die benötigten Inputdaten für die anschließenden standortökonomischen Wirtschaftlichkeitsberechnungen mit BiOLoCaTe. Die Schnittstellen zwischen EFEM und BiOLoCaTe waren bereits geschaffen, so dass man trotz des kurzen Bearbeitungszeitraums des Projektes realitätsnahe Szenarien modelbasiert berechnen konnte. Die Ergebnisse sind in Kapitel 3.2.1 dargestellt (**M4**).

4. BiOLoCaTe Modellierung (KIT-IIP)

Im Rahmen der Konzeptstudie wurde BiOLoCaTe so angepasst werden, dass ausgewählte Prozessketten von Biomassekonversions- und Algenkultivierungsanlagen analysiert werden konnten. Anhand der Modellszenarien wurden die betrachteten Prozesspfade techno-ökonomisch bewertet (vgl. Kapitel 5.2.2). Aussagen zur Technologieauswahl und Standortplanung werden in Kapitel 5.3 dargelegt (**M5**).

5 Ergebnisse

5.1 Kostenstrukturen Mikroalgenanlagen und Szenarienbeschreibung

M1: Die für die modellbasierte Analyse identifizierten Algenkultivierungsprozesse sind festgelegt.

Bei der Verbrennung von Stroh zur Gewinnung von Wärme kann das CO₂-reiche Rauchgas in geschlossenen Photobioreaktoren (z.B. Röhren oder Platten-PBR) durch Mikroalgen phototroph genutzt werden, um z.B. proteinreiche Biomasse als Lebens- und Futtermittel zu vermarkten.

Bei der Herstellung von Lignin durch das Organosolv-Verfahren aus lignocellulosehaltiger Biomasse wie Holz, Stroh oder Miscanthus entstehen neben der primären Gewinnung von Lignin, C6- (Glukose) und C5-Zucker (Xylose). Xylose könnte als organische Kohlenstoff- und Energiequelle heterotroph (Fermentation im Dunkeln) durch Mikroalgen wie *Chlorella vulgaris* oder *Chlorella pyrenoidosa* zur Herstellung lipid- und proteinreicher Biomasse genutzt werden.

M2: Vorläufige Szenarien werden definiert und in einem Expertenworkshop diskutiert.

Nach ausführlicher Literaturrecherche ist die heterotrophe Kultivierung von Mikroalgen mit Xylose aus der Gewinnung von Lignin mittels Organosolv-Verfahren nicht möglich. Xylose kann ausschließlich mixotroph zur Kultivierung von Mikroalgen in Photobioreaktoren genutzt werden. Zusätzlich ist Xylose mit dem wachstumshemmenden Aldehyd Furfural verunreinigt. Daher wird ausschließlich Glukose als organische Kohlenstoff- und Energiequelle in Betracht gezogen. Die heterotrophische Kultivierung mit Glukose in Stahlfermentern ist in Europa, insbesondere in Deutschland nach Aussage von Jörg Ullmann (Dipl.-Biologe, Autor und Geschäftsführer *Roquette Klötze GmbH & Co. KG*) die bevorzugte und bisher einzige Kultivierungstechnik um Mikroalgenbiomasse ganzjährig und im Vergleich zur phototrophen Kultivierung bei deutlich geringeren Kosten zu kultivieren. Das gewonnene gelbe Mikroalgenpulver aus *Chlorella pyrenoidosa* kann laut Aussage von Kirsten Knuffmann (geschäftsführende Inhaberin von *purerau*) und den Informationen auf der Homepage von *purerau* (<http://www.purerau.de/bobei-backen-ohne-butter-und-ei.html>, 04.06.2018) 1:1 Eier und Butter in Backwaren ersetzen.

5.1.1 Phototrophe Kultivierung

Für die Kostenkalkulierung der phototrophen Kultivierung von Mikroalgen wurden die Daten aus der Veröffentlichung von Ación et al. (2012) verwendet. In dieser Arbeit wird die Kultivierung von *Scenedesmus almeriensis* (9,60 % Fette, 43,20 % Proteine, 15,50 % Kohlenhydrate, 0,55 % Lutein) in einem Röhren-Photobioreaktorsystem (R-PBR aus PMMA) in Almeria, Spanien beschrieben. Die Anlage hat eine Fläche von 425,60 m² mit einem auf zehn Module aufgeteilten Kultivierungsvolumen von 30,40 m³. Mit einer jährlichen Betriebszeit von 300 Tagen

im Jahr können 3,83 t Biomassetrockengewicht (BMTG) pro Jahr produziert werden. Das entspricht einer täglichen volumetrischen Produktivität von $0,42 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Zur besseren Temperierung wurde die Anlage innerhalb eines Gewächshauses errichtet. Der Energiebedarf der Anlage beträgt 15 kWh m^{-3} (Acién et al., 2012).

Zur Versorgung der Mikroalgenkultur benötigen die R-PBR Pumpen zur Luft- und Medienzufuhr, Vorratsbehälter und Ozon-Sterilisationseinheiten zur Medienbereitstellung sowie Dekanter und Gefriertrockner zur Ernte und Trocknung der Biomasse. Nach der Berechnung von Acién et al. (2012) ergeben sich Kosten in Höhe von $69,30 \text{ € kg}^{-1}$ BMTG. Nach Neuberechnung der Kosten zur Nachvollziehung der Methode nach Acién et al. (2012) wurde ein Rechenfehler bei der Kalkulierung der Lohn- und Personalkosten für drei benötigte Anlagearbeiter festgestellt, sodass sich die Kosten auf $110,52 \text{ € kg}^{-1}$ erhöhen (Zur Kontrolle wurde eine zweite Methode zur Kalkulierung der Kosten für die beschriebene Kultivierungsanlage in Acién et al. (2012) nach Taberero et al. (2012) angewendet. Dazu wurde die Angaben in Acién et al. (2012) wie Nährstoffverbrauch, der Energiebedarf und die dazugehörigen Kosten übernommen. Nach der beschriebenen Methode von Taberero et al. (2012), die Szenarien zur Kalkulation bei niedrigen und hohen Kosten beinhaltet, wurde eine Kostenspanne von $101,19 \text{ € kg}^{-1}$ bis $107,83 \text{ € kg}^{-1}$ BMTG berechnet. In Klötze, Sachsen-Anhalt befindet sich derzeit eine der größten Mikroalgenkultivierungsanlagen Europas ((Pulz, 2001), persönliche Informationen). Auf einer Fläche von 1,20 ha und einem Kultivierungsvolumen von 665 m^3 (19 Module mit je 35 m^3 Volumen). Die phototrophe Kultivierung erfolgt in R-PBR aus Glas. Durch diese Maßstabsvergrößerung können die Kosten für die Kultivierung von *Scenedesmus almeriensis* nach der Methodik von Acién et al. (2012) auf $29,60 \text{ € kg}^{-1}$ und nach Taberero et al. (2012) deutliche auf $20,52 \text{ € kg}^{-1}$ bis $23,97 \text{ € kg}^{-1}$ BMTG sinken. Gründe dafür sind die größeren R-PBR Module mit $35,00 \text{ m}^3$ anstelle von $3,04 \text{ m}^3$ je Modul und die mit sieben Angestellten (persönliche Information) deutlich reduzieren Lohnkosten je m^2 Anlagefläche. Der Strompreis wurde von $0,10 \text{ € kWh}^{-1}$ aus Acién et al. (2012) auf $0,175 \text{ € kWh}^{-1}$ (Gewerbestrompreis für Baden-Württemberg von 2016; (ECOFYS Germany GmbH & Berlin, 2017)) angehoben.

Eine weitere detaillierte Anlagenbeschreibung findet sich in der Veröffentlichung von Tredici et al. (2016). In dieser wird die Kultivierung von *Tetraselmis suecica* (Salzwasser, 40 % Proteine, 20 % Fette) in Folien-PBR (aus LDPE), welche wie eine schmale Wand („Green Wall Panel“) in Metallgestellen angeordnet sind, in Imperia, Italien beschrieben. Die Anlage hat eine Fläche von 1 ha und ein Kultivierungsvolumen von $315,20 \text{ m}^3$, das in acht Module (je $39,40 \text{ m}^3$) unterteilt ist. Mit einer Kultivierungszeit von 245 Tagen im Jahr können jährliche 36,75 t BMTG geerntet werden, was eine volumetrische Produktivität von $0,48 \text{ g l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ entspricht. Wie die die Anlagen mit Röhren-Kultivierungssystem befinden sie die Folienreaktormodule zur effektiveren Temperierung der Kulturen innerhalb eines Gewächshauses. Nach Tredici et al. (2016) kann feuchte Biomasse mit einem Trockengewichtsanteil von 20 % (vollständige Trocknung nicht einberechnet) für $12,40 \text{ € kg}^{-1}$ produziert werden. Mit der Methodik zur Kostenkalkulation von Acién et al. (2012) und der vollständigen Trocknung der Biomasse durch den Einsatz

einer Gefriertrocknungsanlage (Kosten und Strombedarf wie in Acién et al. (2012) beschrieben) wurden Kosten in Höhe von 23,64 € kg⁻¹ (ohne Trocknung 22,25 € kg⁻¹) berechnet.

Zusammenfassend können in Anlagen über einen Hektar Fläche unabhängig vom Kultivierungssystem nach Acién et al. (2012) und Tredici et al. (2016) Mikroalgen mit den Kosten von 23,64 bis 29,60 € pro kg BMTG kultiviert werden (siehe Tabelle 4). Die Ergebnisse zeigen ebenfalls, dass sich die Kosten durch die Maßstabsvergrößerung von Pilot- zu Produktionsanlagen deutlich verringern.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Kostenkalkulationen nach Acién et al. (2012)

Mikroalgen -spezies	PBR	Fläche [m ²]	Volumen [m ³]	Kapazität [t _{BMTG} a ⁻¹]	Preis [€ kg ⁻¹ BMTG]	Quelle
<i>Scenedesmus almeriensis</i>	Röhren	425,60	30,40	3,80	110,52	nach Acién et al. (2012)
<i>Scenedesmus almeriensis</i>	Röhren	12.000	665,00	83,79	29,60	nach Acién et al. (2012), modifiziert
<i>Tetraselmis suecica</i>	Folien	10.000	315,20	36,75	23,64	nach Tredici et al. (2016)

Laut Literaturrecherche ist die Nutzung von Rauchgas für die Kultivierung von Mikroalgen möglich (Ho et al., 2008; Rahaman et al., 2011; Takabe et al., 2017). Da jedoch die Kosten zur Kultivierung phototroph erzeugter nicht aufgeschlossener Mikroalgenbiomasse sehr hoch und Produkte für den Einsatz als Nahrungs- und Futtermittel beschränkt bis gar nicht konkurrenzfähig sind, wird die Nutzung von Rauchgas aus der Verbrennung von Stroh nicht weiter betrachtet (Teil 1 der Szenariodefinition **M3**).

5.1.2 Heterotrophe Kultivierung

Xylose ist ein C5-Zucker, der bei der Gewinnung von Lignin durch das Organosolv-Verfahren abfällt. Nach Leasing et al. (2011) kann dieses Abfallprodukt mixotroph durch *Chlorella* sp. KKU-S2 abgebaut werden. Bei einem mixotrophen Verfahren werden Mikroalgen in Photobioreaktoren mit Licht und organischen Kohlenstoffquellen, in diesem Fall Xylose, kultiviert. Jedoch ist die abfallende Xylose mit Furfural verunreinigt. Furfural ist ein heterozyklisches Aldehyd und kann nachweislich das Wachstum von Mikroalgen hemmen (Miazek et al., 2014). Xylose für die mixotrophe Kultivierung von Mikroalgen nutzen zu können, müsste diese vorher aufgereinigt werden. Da jedoch noch nicht abgeschätzt werden kann, welchen Aufwand und Kosten für diesen Prozess entstehen könnten, wird auf die Verwendung von Xylose zur mixotrophen Kultivierung von Mikroalgen verzichtet.

Bei der Gewinnung von Lignin aus lignocellulosehaltiger Biomasse wie Stroh fallen 30-60 % Glukose an (vgl. Abbildung 9). *Chlorella vulgaris* kann nachweislich in Stahlfermentern (Rührkesselreaktoren) heterotroph mit Glukose als Kohlenstoff- und Energiequelle schneller und

dichter wachsen im Vergleich zur phototrophen Kultivierung in Photobioreaktoren (Liang et al., 2009). Heterotrophe Mikroalgenbiomasse aus *Chlorella pyrenoidosa* kann, laut Aussage von Kirsten Knuffmann (geschäftsführende Inhaberin von *pureraw*) und den Informationen auf der Homepage von *pureraw* (<http://www.pureraw.de/bobei-backen-ohne-butter-und-ei.html>, 04.06.2018), Eier und Butter im Verhältnis 1:1 in Backwaren ersetzen und bereits unter den Markennamen BOBEI für etwa 45 € kg⁻¹ erworben werden.

Nach dem Agrarmärkte-Jahresbericht von 2017 (Richard Riester et al., 2017) wurden in Baden-Württemberg ca. 160.000 t Eier verbraucht. Das entspricht einen BMTG von ca. 30.500 t Trockeneipulver (14,55 € kg_{BMTG}⁻¹, 23 % Trockengewicht pro Ei mit einem Durchschnittsgewicht von 62 g je Ei). Daraus ableitend wurde der Verkaufspreis für das Algenpulver für die Standortoptimierung auf 10 € kg_{BMTG}⁻¹ festgelegt. Bei einer Abdeckung von 10 % des Marktes würde das einer jährlichen Produktion von 3.050 t_{BMTG} heterotroph kultivierter Mikroalgenbiomasse entsprechen. Der Selbstversorgungsgrad mit Eiern in Deutschland betrug nach Richard Riester et al. (2017) 2016 70 %. Bei einer Produktion von 30 % des Konsums an Eiern in Baden-Württemberg müssten jährlich 9.150 t_{BMTG} heterotroph kultivierte Mikroalgenbiomasse gewonnen werden, um den Selbstversorgungsanteil auf 100 % zu erhöhen. Diese zwei Szenarien wurden nach **M3** (Teil 2) definiert und gehen in die Berechnung der Kosten zur Kultivierung von heterotropher Mikroalgenbiomasse ein.

Doucha and Lívanský (2012) konnte in 600 l-Fermentern mit *Chlorella vulgaris* eine volumetrische Produktivität von 29,19 g l⁻¹ d⁻¹ bei einer maximalen Zellkonzentration von 81,60 g l⁻¹ nachweisen. Dabei wurden pro kg gebildete BMTG 1,86 kg Glukose abgebaut. In der linearen Wachstumsphase mit einer Startkonzentration von 20 g l⁻¹ und einer Endkonzentration von 80 g l⁻¹ bei einer Kultivierungszeit 30 h beträgt die volumetrische Produktivität 48 g l⁻¹ d⁻¹. Diese Parameter wurden zur Kalkulierung der Kostenstrukturen einer ganzjährigen Kultivierung von *Chlorella vulgaris* nach Doucha & Lívanský (2012) in 11,75 oder 150 m³ Fermentern nach der Methodik aus Tabernerio et al. (2012) verwendet (Berechnung bei niedrigen und hohen Kostenstrukturen).

Nach persönlichen Informationen durch Gespräche mit Kirsten Knuffmann und durch die Patentschrift von Solazyme Roquette Nutritionals, LLC und Solazyme, Inc. (US 2011/0256282 A1) zur wird *Chlorella pyrenoidosa* heterotroph mit Glukose als Energie- und Kohlenstoffquelle in Rührkesselfermentern kultiviert, nach der Ernte per Rührwerkskugelmühle aufgeschlossen, anschließend aufkonzentriert (z.B. durch einen Separator) und abschließend getrocknet (z.B. durch Gefriertrocknung). Für die Kostenkalkulation wurden folgend die benötigten Roh- bzw. Nährstoffe und Geräte mit dazugehörigen Kosten und Energieverbräuchen (siehe Tabelle 5 und Tabelle 6) ermittelt. Die benötigten Nährstoffe wurden aus der Arbeit (Doucha & Lívanský, 2012) zur heterotrophen Kultivierung von *Chlorella vulgaris* übernommen und passende Preise per Internetrecherche ermittelt. Die Kosten der Chemikalien zur Herstellung der Nährmedien betragen etwa 10 % der Produktionskosten. Für die Ernte der Biomasse aus den Fer-

mentern wurde kein Gerät aufgelistet. Der Kosten- und der Energiebedarf entspricht nach Tabernerio et al. (2012) etwa 30 % der Kultivierung in den Rührkesselfermentern. Die Leistung der in die Kostenstrukturen einbezogenen Fermenter (11,75 und 150 m³) wurden anhand von Leistungsangaben von Rührkesselfermentern mit Volumen von 30 bis 19.000 l aus Junker (2004) berechnet.

Tabelle 5: Leistung bzw. Energieverbräuche der Geräte zur heterotrophen Kultivierung von Chlorella vulgaris. Der Strompreis für Industrie und Gewerbe betrug 2016 in Baden-Württemberg 17,48 Cent kWh⁻¹ (ECOFYS Germany GmbH & Berlin, 2017).

Gerät	Detail	Leistung/Energieverbrauch je Einheit	Quelle
Fermenter	11 m ³	43.560 W	(Junker, 2004)
Fermenter	75 m ³	132.000 W	(Junker, 2004)
Fermenter	150 m ³	198.000 W	(Junker, 2004)
Rührwerkskugelmühle	3 m ³ h ⁻¹	0,43 kWh kg _{BMTG} ⁻¹	(Safi et al., 2017)
Separator	4 m ³ h ⁻¹	5.500 W	(Acién et al., 2012)
Gefriertrockner	70 kg d ⁻¹	2.300 W	(Acién et al., 2012)

Tabelle 6: Kosten der Geräte zur heterotrophen Kultivierung von Chlorella vulgaris

Gerät	Detail	Preis [€ je Einheit]	Quelle
Fermenter	11 m ³	21.785	Einzelpreis für 350 m ³ Fermenter aus dem Jahre 2012 aus Harrison et al. (2015), Umrechnung in € mit Einbeziehung der Inflationsrate bis April 2018 nach http://www.usinflationcalculator.com und der Kosten kleinerer Reaktoren nach Tredici et al. (2016)
Fermenter	75 m ³	117.715	
Fermenter	150 m ³	200.749	
Rührwerkskugelmühle	3 m ³ h ⁻¹	350.000	Persönliche Information
Separator	4 m ³ h ⁻¹	45.000	(Acién et al., 2012)
Gefriertrockner	70,00 kg d ⁻¹	111.000	(Acién et al., 2012)

Anhand der ermittelten Kosten und Verbräuche für benötigte Nährstoffe und Geräte, wie in Tabelle 5 und Tabelle 6 aufgelistet, konnten nach der Methode von Tabernerio et al. (2012) die Produktionskosten für die heterotrophe Kultivierung von *Chlorella vulgaris* berechnet werden. Die Ergebnisse wurden in Abbildung 5, Abbildung 6 und Tabelle 7 zusammengefasst. Die Kohlenstoff- und Energiequelle Glukose als Nebenprodukt des Organosolv-Verfahrens zur Gewinnung von Lignin geht mit dem Preis von 0 € kg⁻¹ in die Berechnung ein. Die Kosten sinken dabei bei Vergrößerung des Reaktorvolumens und durch die Erhöhung der Produktionskapazität von 3.050 auf 9.150 t_{BMTG} pro Jahr (Abdeckung von 10 bzw. 30 % des Konsums an Eiern in Baden-Württemberg). Die Investitionskosten steigen durch die Vergrößerung der Produktionskapazität durch die Erhöhung der Anzahl benötigter Geräte zur Kultivierung und Aufarbeitung der Mikroalgenbiomasse, sinken jedoch durch den Einsatz größerer Reaktoren.

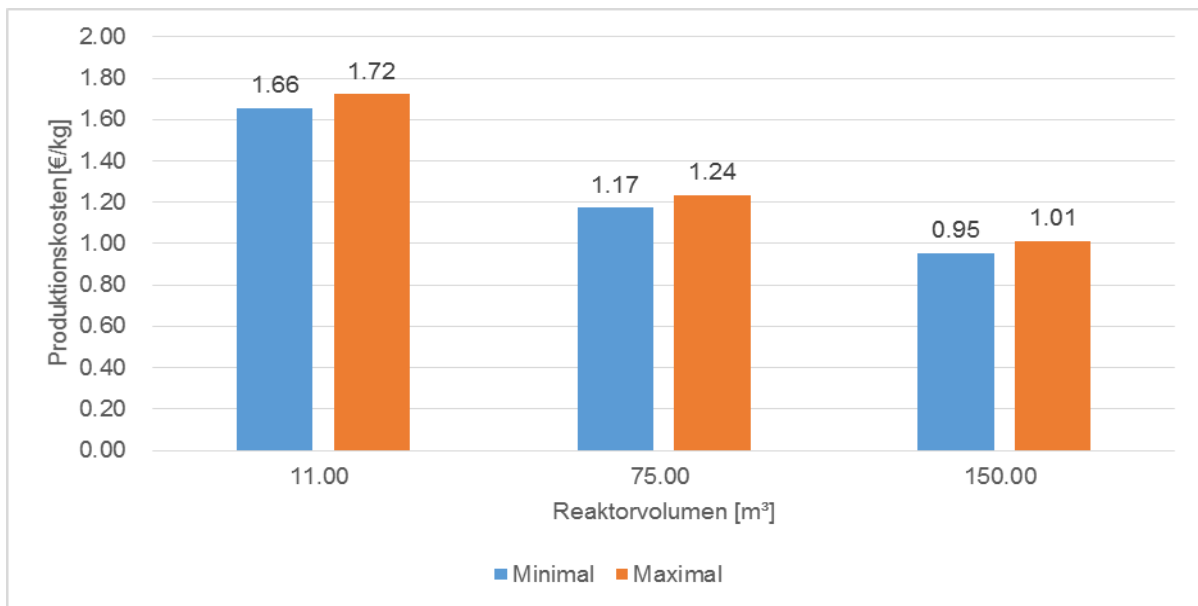


Abbildung 5: Produktionskosten heterotropher Mikroalgenbiomasse aus *Chlorella vulgaris* mit einer jährlichen Kultivierung von 3.050 t_{BMTG} in Abhängigkeit des Reaktorvolumens bei minimalen und maximalen Produktionskosten nach Tabernero et al. (2012)

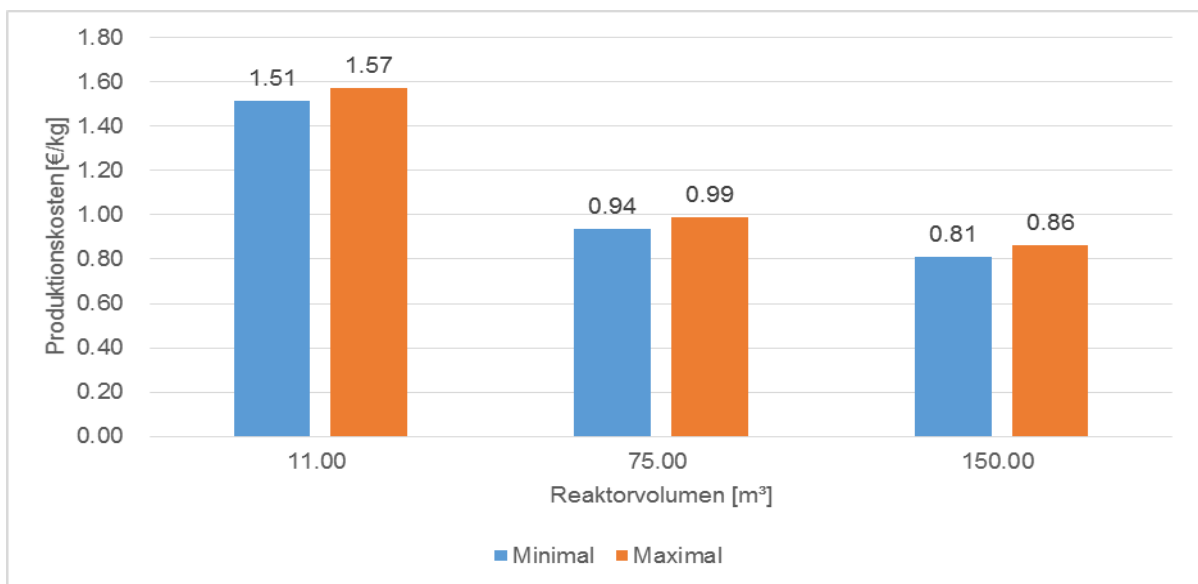


Abbildung 6: Produktionskosten heterotropher Mikroalgenbiomasse aus *Chlorella vulgaris* mit einer jährlichen Kultivierung von 9.150 t_{BMTG} in Abhängigkeit des Reaktorvolumens bei minimalen und maximalen Produktionskosten nach Tabernero et al. (2012)

*Tabelle 7: Investitionskosten für eine Anlage zu Kultivierung von jährlich 3.050,00 t_{BMTG} und 9.150,00 t_{BMTG} heterotropher Biomasse aus *Chlorella vulgaris* in Abhängigkeit des Reaktorvolumens bei minimalen und maximalen Produktionskosten nach Taberner et al. (2012)*

Reaktorvolumen [m ³]	11	75	150
Jährl. Produktion [t _{BMTG} a ⁻¹]	3.050		
Min. Investitionskosten [Mio. €]	4,47	4,18	3,85
Max. Investitionskosten [Mio. €]	7,25	6,78	6,25
Jährl. Produktion [t _{BMTG} a ⁻¹]	9.150		
Min. Investitionskosten [Mio. €]	11,98	10,64	10,13
Max. Investitionskosten [Mio. €]	19,44	17,26	16,43

5.2 Modellergebnisse

5.2.1 Standortbezogenes Biomasseangebot für die Bioökonomie in Baden-Württemberg

In diesem Kapitel ist das modellierte preisabhängige Biomasseangebot von Stroh und Miscanthus für die Regionen Baden-Württembergs dargestellt. Abbildung 7 zeigt die Strohangebotskurven der einzelnen VGG. Grundsätzlich steigt mit höherem Preis das Strohangebot, allerdings zeigen die einzelnen Regionen unterschiedliche Verläufe des Angebots. Bei 30 € t_{FM}⁻¹ gibt es, mit Ausnahme von Bauland/Hohenlohe (VGG 8) in keiner Region ein Strohangebot. Bis zu einem Strohpreis von 40 € t_{FM}⁻¹ bleiben die Strohangebotsmengen auf einem relativ konstanten, niedrigen Niveau. Zwischen 50 und 60 € t_{FM}⁻¹ zeigen die meisten Regionen dann einen relativ starken Anstieg des Angebots. In VGG 1 (Unterland/Gäue), VGG 6 (Oberland/Donau) und VGG 8 steigt das maximale Strohangebot auf ca. 500 kt_{FM}. Die Vergleichsgebietsgruppen Rhein/Bodensee und Alb/Baar (VGG 2 und VGG 4) stellen maximal ca. 300 kt_{FM} Stroh bereit und VGG 7 (Albvorland/Schwäbischer Wald) hat ein maximales Strohangebot von 170 kt_{FM}. In den Regionen Schwarzwald und Allgäu (VGG 3 und VGG 5) wird selbst bei einem Strohpreis von 80 € t_{FM} kein Stroh angeboten. Diese beiden Regionen sind durch eine hohe Nutzungskonkurrenz um das Ackerland durch eine ausgedehnte Rinderhaltung und Milchviehhaltung charakterisiert. Dadurch wird das Ackerland hauptsächlich zur Futterproduktion (Silomais und Klee gras) genutzt und dementsprechend haben diese Regionen auch einen relativ geringen Anteil von Getreide in der Fruchtfolge. Die großen Angebotsmengen in VGG 1, VGG 6 und VGG 8 sind auf den hohen Getreideanteil in der Fruchtfolge zurückzuführen, die ab einem Strohpreis der die Bergungskosten deckt, für die Bioraffinieren zur Verfügung gestellt werden. Wenn dies gegeben ist, wird zunächst das Stroh der vorhandenen Getreideproduktion genutzt ohne dass es Änderungen der Fruchtfolge gibt. Bei einem höheren Strohpreis wird die Profitabilität des Getreideanbaus, bedingt durch die Koppelproduktion von Stroh und Korn, auch bei einem konstanten Getreidepreis gesteigert. Durch die höhere relative Vorzüglichkeit werden dann andere Kulturen in der Fruchtfolge verdrängt. Dies trifft hauptsächlich die Produktion von Silomais als Biogassubstrat.

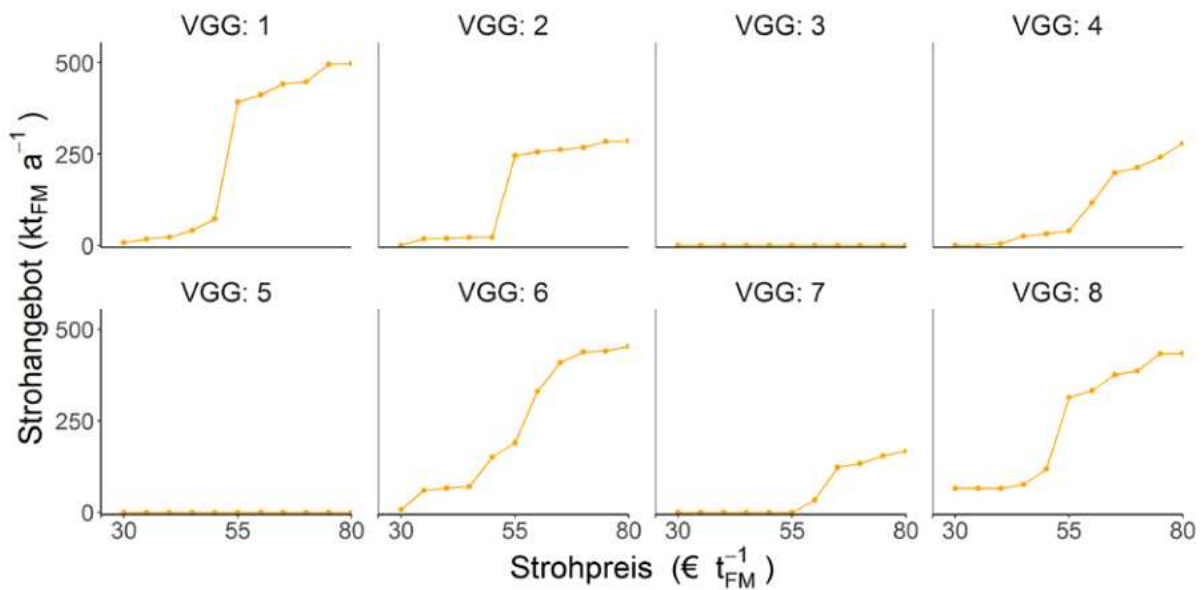


Abbildung 7: Preisabhängiges Strohangebot in den verschiedenen Regionen (VGG) Baden-Württembergs

Abbildung 8 zeigt das preisabhängige Miscanthusangebot der einzelnen Regionen. Grundsätzlich steigt auch das Miscanthusangebot mit zunehmenden Preis, allerdings zeigen sich deutlich größere regionale Unterschiede als beim Strohangebot. VGG 3, VGG4 und VGG 5 haben aufgrund der klimatischen und Naturschutz bedingten Restriktionen kein Angebot an Miscanthus. In den anderen Regionen wird ab einem Miscanthuspreis von 60 € t_{TM} Miscanthus für die Bio-raffinerien bereitgestellt. VGG 1 hat mit ca. 700 kt_{TM} das größte Miscanthusangebot, gefolgt von VGG 8 mit rund 350 kt_{TM} , VGG 2 mit 250 kt_{TM} und VGG 7 mit 140 kt_{TM} . In VGG 6 ist die angebotene Miscanthusmenge mit 36 kt_{TM} auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau.

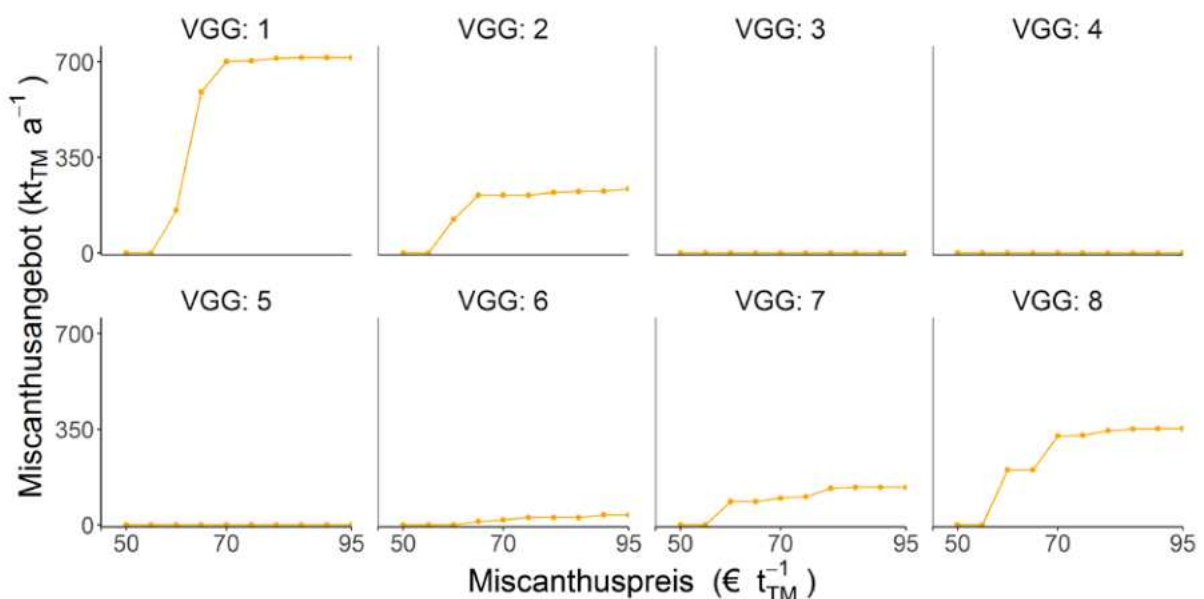


Abbildung 8: Preisabhängiges Miscanthusangebot in den verschiedenen Regionen (VGG) Baden-Württembergs

Anders als die Strohproduktion steht der Miscanthusanbau in direkter Konkurrenz mit den anderen landwirtschaftlichen Kulturen um die Ackerfläche. Die Ausweitung des Miscanthusanbaus geht dementsprechend direkt zu Lasten der meisten anderen Kulturen. So geht beispielsweise der Getreideanbau (Sommer- und Wintergetreide) bei einem Miscanthuspreis von 95 € t_{TM}^{-1} um 14% in Baden-Württemberg zurück. Der Winterrapsanbau geht bei diesem Miscanthuspreis um 13% und der Körnermaisbau um 17% zurück. Darüber hinaus reduziert sich auch die Fläche zum Silomaisbau, allerdings mit 6% deutlich geringer als im Strohszenario. Somit hat die Nutzung von Miscanthus umfangreichere Auswirkungen auf die Fruchtfolge in den Regionen als die Nutzung von Stroh und kann so auch zu einer Verengung der Fruchtfolge führen.

M4: Standortbezogenes Biomasseangebot für relevante Kulturen wird an BiOLoCaTe übergeben.

5.2.2 *Techno-ökonomische Standortanalyse für ausgewählte innovative Prozessketten*

Die techno-ökonomische Bewertung umfasst die komplette Wertschöpfungskette von der Bereitstellung über den Transport bis hin zur Konversion der Biomasse. Die Daten zur Biomassebereitstellung werden vom landwirtschaftlichen Angebotsmodell EFEM an das Standortoptimierungsmodell BiOLoCaTe übergeben und umfassen bereitgestellte Stroh- und Miscanthusmengen für unterschiedliche Preise pro Gemeinde. Diese liegen für Stroh bei 30-80 € t_{FM}^{-1} und für Miscanthus bei 60-95 € t_{TM}^{-1} . Der Biomasetransport wird basierend auf Literaturwerten erfasst. Die Transportkosten ergeben sich somit aus für Stroh von 15 € t^{-1} und für Miscanthus von 9 € t^{-1} entfernungsunabhängiger sowie für Stroh von 0,17 € $t_{km_{FM}}^{-1}$ und für Miscanthus von 0,18 € $t_{km_{FM}}^{-1}$ entfernungsunabhängiger Kosten (in Anlehnung an Schwaderer (2012) Rogers and Brammer (2009) und Kappler (2008)). Daten zu Massenströmen und Konversionsfaktoren in der Bioraffinerie, die aus lignocellulosehaltiger Biomasse über das Organosolv-Verfahren die Kompetenten Lignin, Cellulose und Hemicellulose extrahiert, basieren auf dem Bericht des FNR-Projekts „Lignocellulose Bioraffinerie, Phase 2“ (Engel et al., 2014) und der Dissertation von Martina Haase am KIT-IIP (Haase, 2012). Der Glukosestrom aus der Lignocellulose Bioraffinerie wird für die heterotrophe Mikroalgenkultivierung verwendet. Das Lignin wird zu einem Marktpreis von 1.000 € t^{-1} verkauft. Je nach Qualität des Lignins schwanken die Marktpreise zwischen 750-1300 € t^{-1} für Organosolv-Lignin (Bruijninx et al., 2016; Rettenmaier et al., 2014; Smirnova & Zetzl, 2016; Wild et al., 2014). Der übrige C6-Zuckerstrom wird als Abfallstrom behandelt. Obwohl zahlreiche Ansätze existieren diesen Abfallstrom zu verwerten, beschränkt dessen heterogene Zusammensetzung eine sinnvolle Aufbereitung. Abbildung 9 führt den Konversionsprozess innerhalb der Lignocellulose Bioraffinerie für die Konversion von Stroh und Miscanthus illustrativ auf.

Miscanthus Stroh	100%	Organosolv-Verfahren		Lignin Mikroalgen Eiweißsubstitute 54 %
		Lignin (10-30 %)	19%	
		Glucose (30-60 %)	43%	
		andere Zucker (20-40 %)	24%	
				14%
				38%
				29%

Abbildung 9: Übersicht der verwendeten Konversionsfaktoren beim Organosolv-Verfahren in Prozent (in Anlehnung an Engel et al. (2014) und Kaltschmitt et al. (2009))

Szenarioergebnisse zur minimalen Verwertung von Reststroh und Miscanthus

Das Szenario zur minimalen Verwertung ist dadurch charakterisiert, dass lediglich 1 % des Potentials an Reststroh oder Miscanthus Baden-Württembergs einer kleindimensionierten Lignocellulose Bioraffinerie zugeführt werden. Entsprechend den Ergebnissen aus der Kostenstruktur unterschiedlicher Mikroalgenkultivierungskonfigurationen aus Kapitel 5.1 wurde gemäß den geringsten Gesamtkosten eine Reaktorgröße von 150 m³ ausgewählt. Aufgrund von Skaleneffekten ist der Betrieb einer Reaktorgröße von 150 m³ wirtschaftlicher als der Betrieb kleinerer Reaktoren wie die beiden in Kapitel 3.1 untersuchten Reaktorgrößen von 11 m³ und 75 m³. Diese gewählte Konfiguration umfasst zwei Fermenter und stellt somit ein Gesamtvolumen von 260 m³ für die Kultivierung von Mikroalgen bereit, um etwa 3.000 t Algenpulver pro Jahr herzustellen. Für die Mikroalgenkultivierung werden etwa 5.700 t Glukose aus der Lignocellulose Bioraffinerie verwendet, um Stroh und Miscanthus durch das Organosolv-Verfahren in die Komponenten Lignin, Cellulose und Hemicellulose aufzuspalten und diese in einem weiteren Prozessschritt zu hochwertigem Organosolv-Lignin, Glukose und C₅-Zuckern aufzubereiten. Die Glukose wird anschließend in einer heterotrophen Mikroalgenkultivierung verwertet, um Algenpulver herzustellen, welches als Eiweißsubstitut veräußert werden kann. Damit die komplette Menge von 5.700 t an Glukose für die Mikroalgenkultivierung bereitgestellt werden kann, müssen jährlich etwa 15.000 t_{FM} Stroh oder 13.500 t_{TM} Miscanthus beschafft werden. Die Unterscheidung zwischen Frischmasse (FM) und Trockenmasse (TM) wird hier zwar getroffen, jedoch ist diese im Gegensatz zur thermochemischen Umwandlung für die biochemische Umwandlung mittels Organosolv-Verfahren nicht notwendig und wird daher im Folgenden nicht fortgeführt. Die modellierten preisabhängigen Angebotsmengen werden vom landwirtschaftlichen Angebotsmodell EFEM an das Standortoptimierungsmodell BiOLOCaTe übergeben.

Ergebnisse der minimalen Reststrohverwertung

Das Ergebnis der Standortoptimierung für die minimale Verwertung von Stroh an einem einzigen Standort ist in Abbildung 10 dargestellt. Ein optimaler Standort wird in der Umgebung von Heilbronn gefunden. Das Stroh wird zum geringstmöglichen Preis von 30 € t⁻¹ aus 122

Nachbargemeinden beschafft. Der Gesamtgewinn der Anlage ist wesentlich vom Ligninpreis sowie vom Preis des Algenpulvers abhängig. Bei dem angenommenen Ligninpreis von 1.000 € t^{-1} (1 € kg^{-1}) und dem Algenpulverpreis von 10.000 € t^{-1} (10 € kg^{-1}) ist ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage möglich. Insgesamt werden etwa 2.100 t Lignin pro Jahr produziert und verkauft. Der jährliche Gesamtgewinn beläuft sich auf etwa 14 Mio. € bei einem Anlagen-gewinn von 14,8 Mio. € abzüglich Logistikkosten von 0,35 Mio. € und Bereitstellungskosten von 0,45 Mio. €. Der angenommene Preis für Algenpulver von 10 € kg^{-1} liegt somit deutlich über dem Breakeven-Preis von $5,20 \text{ € kg}^{-1}$. Ein wirtschaftlicher Betrieb der Lignocellulose Bio-raffinerie ohne die Ankopplung der Mikroalgenkultivierung ist unter den gegebenen Annah-men nicht möglich. Somit könnte die höhere Wertschöpfung der Biomasse durch die Mikroal-genkultivierung die Umsetzung des dezentralen Bioraffineriekonzeptes fördern.

Bei dem Szenario, das eine Substitution von 30 % der Eiernachfrage Baden-Württembergs vor-sieht, würde eine Strohmenge von 50.000 t a^{-1} eingesetzt. Dies entspricht etwa 30 % des mo-dellierten Strohaufkommens von Baden-Württemberg, woraus ca. 10.000 t a^{-1} Algenpulver produziert werden könnte.

Verwendete Strohmenge pro Gemeinde

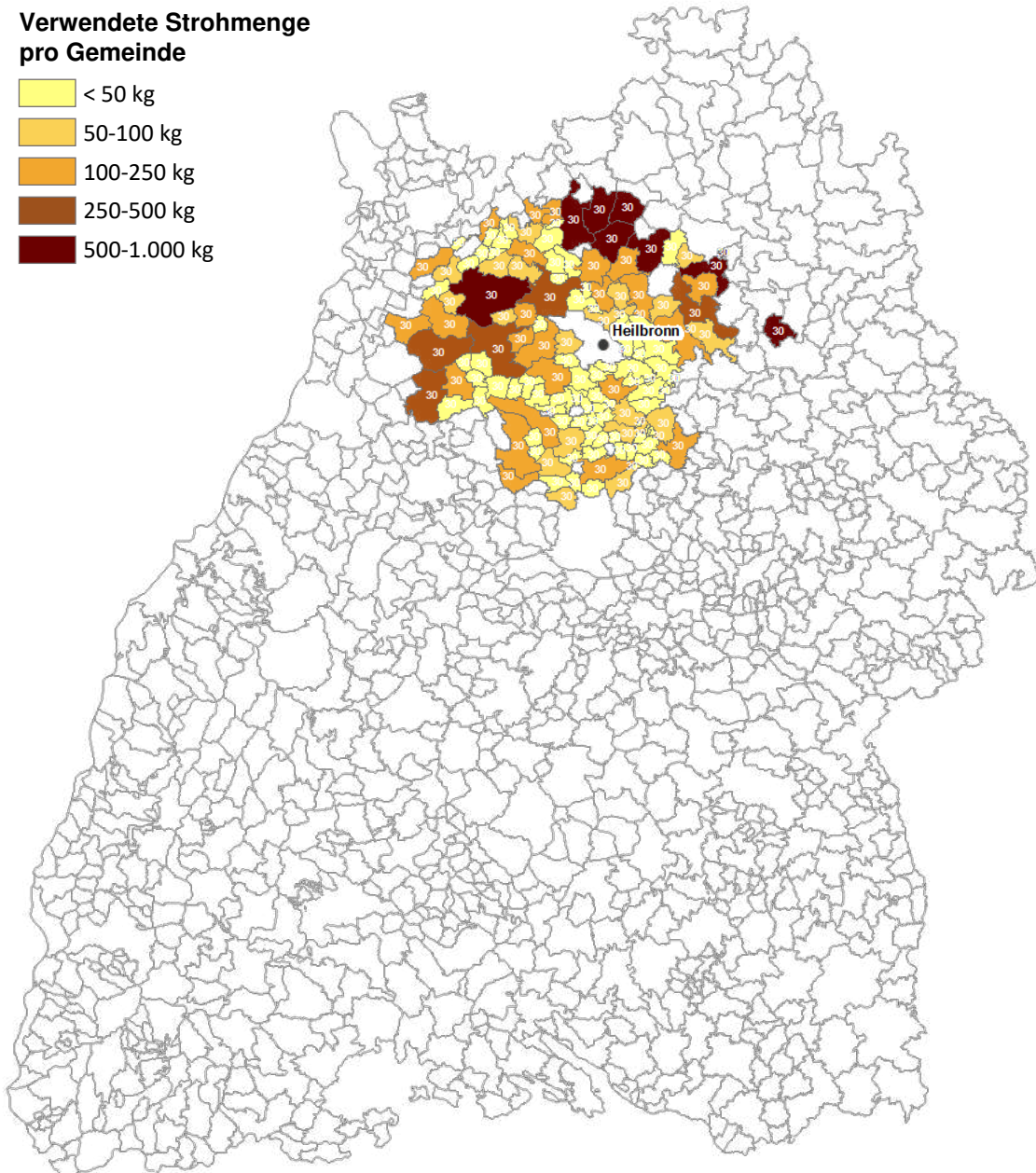
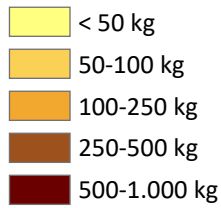







Abbildung 10: Ergebnis der Standortoptimierung der Lignocellulose Bioraffinerie und der angebundenen heterotrophen Mikroalgenkultivierung für einen Standort und in Abhängigkeit vom Bereitstellungspreis zur minimalen Strohverwertung

Ergebnisse der minimalen Miscanthusverwertung

Abbildung 11 stellt die Ergebnisse der Standortoptimierung für die minimale Miscanthusverwertung dar. Im Vergleich Reststrohverwertung bleibt der optimale Standort erhalten (Heilbronn), jedoch erhöht sich der Gesamtgewinn um ein Prozent bei einer Änderung der Biomasseinputmenge von $15.000 \text{ t}_{\text{FM}} \text{ a}^{-1}$ Stroh auf $13.500 \text{ t}_{\text{TM}} \text{ a}^{-1}$ Miscanthus bei einer gleichbleibenden Herstellmenge des Algenpulvers von 3.000 t a^{-1} . Miscanthus wird wie das Reststroh zum geringstmöglichen Preis von 60 € t^{-1} beschafft. Aufgrund der unterschiedlichen Verteilung der Reststroh- und Miscanthuspotentiale wird der Miscanthus lediglich aus 24 Gemeinden

verwertet. Weiterhin ist hervorzuheben, dass sich im Vergleich zur Reststrohverwertung die Bereitstellkosten erwartungsgemäß verdoppeln und sich die Transportkosten in etwa halbieren. Auch bei diesem Szenario wäre die Verwertung von Biomasse in einer Lignocellulose Bio-raffinerie ohne die Anbindung einer Mikroalgenkultivierung unwirtschaftlich. Erst durch die wertschöpfende Verwertung der Glukose durch die Mikroalgen werden profitable Ergebnisse ermöglicht.

**Verwendete
Miscanthusmenge
pro Gemeinde**

-  < 250 kg
-  250-500 kg
-  500-1.000 kg
-  1.000-1.500 kg
-  1.500-3.200 kg

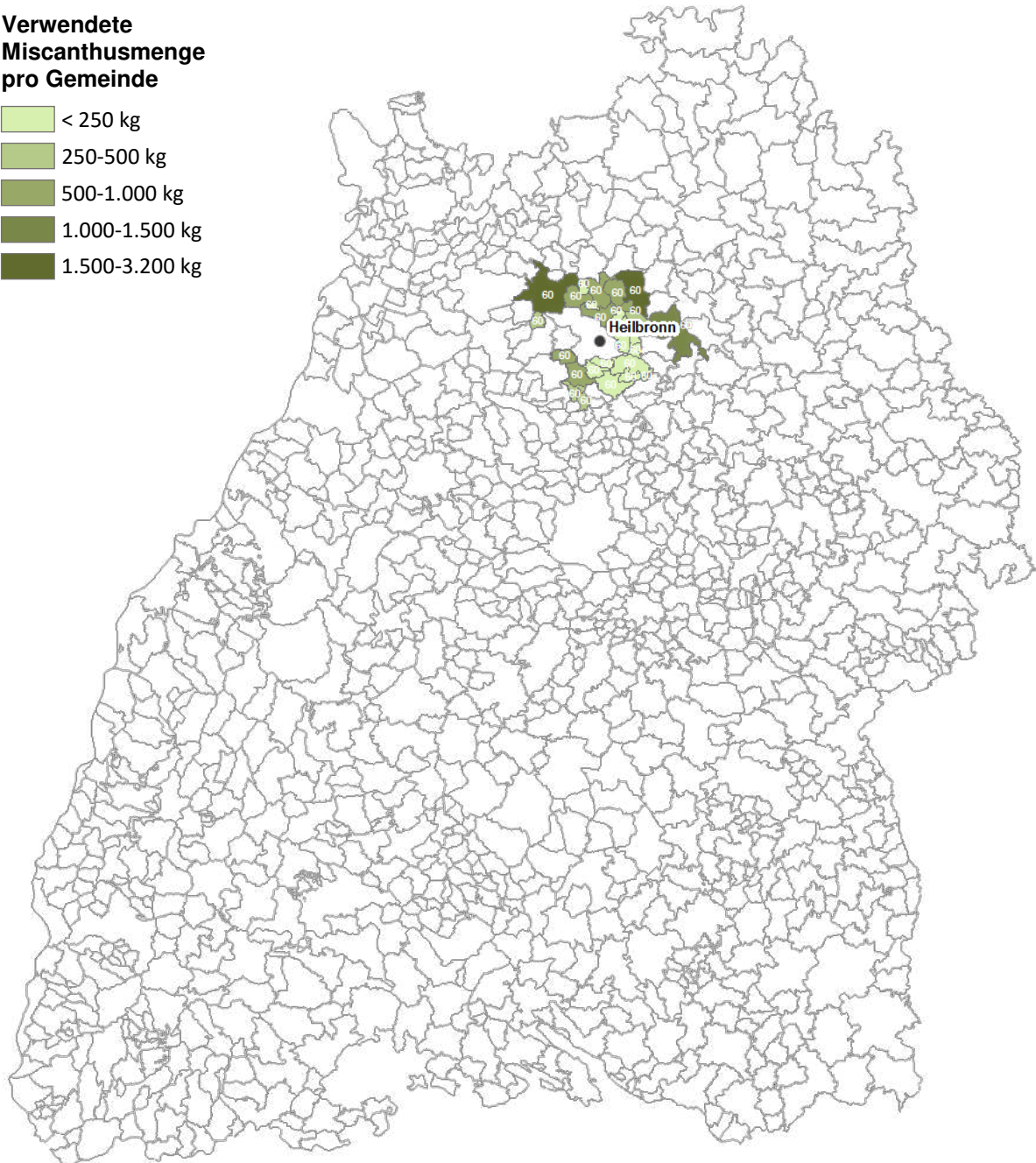


Abbildung 11: Ergebnis der Standortoptimierung der Lignocellulose Bio-raffinerie und der angebundenen heterotrophen Mikroalgenkultivierung für einen Standort und in Abhängigkeit vom Bereitstellungspreis zur minimalen Miscanthusverwertung

Szenarioergebnisse zur maximalen Verwertung von Reststroh und Miscanthus

Zahlreiche Studien schätzen eine umsetzbare Kapazität einer Lignocellulose Bioraffinerie auf 400.000 t Biomasse-Input pro Jahr (Haase, 2012; Laure et al., 2014; Piotrowski et al., 2013). Eine Anlage in dieser Größenordnung würde bei einem jährlichen Betrieb von 8.000 Stunden 50 t an Biomasseinput, 0,76 t Ethanol und 200 t Wasser pro Stunde benötigen und dabei 7 t Lignin (56.000 t a^{-1}), 20 t Glukose (160.000 t a^{-1}) und etwa 11 t C₅-Zucker (88.000 t a^{-1}) extrahieren. Die Annahme, dass 10 % der Glukosemenge für die Mikroalgenkultivierung verwendet werden (ca. 16.000 t a^{-1}), führt bei einem Konversionsfaktor von 0,54 zu einer Algenpulvermenge von etwa 8.800 t a^{-1} pro Bioraffinerie.

Vergleicht man die Ergebnisse des Standortoptimierungsmodells für die Fälle mit und ohne eine Mikroalgenkultivierung miteinander, fallen deutliche Unterschiede auf.

Ergebnisse der maximalen Reststrohverwertung

Die Standortoptimierung ohne die Mikroalgenkultivierung führt zu der Errichtung von zwei Bioraffineriestandorten (Pforzheim und Bad Mergentheim). Die Biomasse wird zu durchschnittlichen Bereitstellungspreisen von 43 € t^{-1} aus 776 Gemeinden beschafft. Der jährliche Gesamtgewinn beider Anlagen beträgt 5 Mio. €. Dieser ergibt sich aus dem Anlagengewinnen von etwa 64 Mio. € resultierend aus dem Verkauf von 56.161 t Lignin (1.000 € t^{-1}), 144.000 t Glukose (350 € t^{-1}) und 91.200 t C₅-Zucker (200 € t^{-1}) abzüglich der Transport- von 20 Mio. € und Bereitstellungskosten von 39 Mio. €. Abbildung 12 stellt die beiden Anlagenstandorte und die Transportflüsse als auch die Bereitstellungsmenge und den Bereitstellungspreis pro Gemeinde da.

Im Gegensatz zum Verzicht der Mikroalgenkultivierung führt deren Anbindung an die Lignocellulose Bioraffinerie zu einer erheblichen Gewinnsteigerung durch den Verkauf des Algenpulvers. Die erhöhte Wertschöpfung durch die Verwertung der Glukose in heterotrophen Mikroalgenreaktoren am Bioraffineriestandort steigert den Gewinn, sodass nahezu das gesamte Reststrohaufkommen Baden-Württembergs an fünf Bioraffineriestandorten verwertet wird. Die Ergebnisse der Standortoptimierung sind in Abbildung 12 abgebildet und stellen die Biomasseflüsse zu den fünf Standorten (Bad Mergentheim, Sinsheim, Aalen, Rottenburg am Neckar, Herbertingen) dar. Vergleicht man die Anzahl der Gemeinden und die durchschnittlichen Bereitstellungskosten der einzelnen Anlagenstandorte miteinander, fällt auf, dass der Standort Herbertingen von 165 Gemeinden aus zu einem durchschnittlichen Bereitstellungspreis von 67 € t^{-1} , der Standort Rottenburg am Neckar von 241 Gemeinden aus zu einem durchschnittlichen Bereitstellungspreis von 68 € t^{-1} , der Standort Sinsheim von 192 Gemeinden aus zu einem durchschnittlichen Bereitstellungspreis von 69 € t^{-1} , der Standort Aalen von 227 Gemeinden aus zu einem durchschnittlichen Bereitstellungspreis von 72 € t^{-1} und der Standort Bad-Mergentheim von 55 Gemeinden aus zu einem durchschnittlichen Bereitstellungspreis von 70 € t^{-1} beliefert wird. Die Anzahl der Gemeinden und der durchschnittliche Bereitstellungspreis geben Auskunft über die Güte eines Standorts. Entsprechend wird hier

der Standort Bad Mergentheim favorisiert. Wird jedoch die Anzahl an möglichen Anlagenstandorten auf einen reduziert, ergibt der Standort Heilbronn die optimale Lösung.

Die erhöhte Wertschöpfung durch die Mikroalgen erlaubt es, die Biomasse aus 876 Gemeinden zu höheren Preisen einzukaufen, sodass sich die durchschnittlichen Bereitstellungspreise für die fünf Standorte auf 69 € t^{-1} erhöhen. Der jährliche Gesamtgewinn aller fünf Anlagen beläuft sich auf etwa 250 Mio. € (50 Mio. € pro Anlage). Die jährlichen gesamten Transportkosten umfassen 51 Mio. € und die Bereitstellungskosten 138 Mio. €. Der Erlös aus dem Algenpulververkauf bei einem Preis von 10 € kg^{-1} Algenpulver und einer 10-%igen Glukoseverwertung (16.000 t) macht mehr als 40 % des Gesamterlöses aus. Die erzeugte Menge an Algenpulver beträgt etwa 44.000 t a^{-1} und könnte die gesamte Nachfrage Baden-Württembergs nach Eiweiß aus Eiern abdecken. Pro Bioraffinerie werden dafür sechs 150 m^3 Mikroalgenreaktoren mit einem Gesamtvolumen von 780 m^3 errichtet. Die detaillierte Kostenstruktur eines 150 m^3 Mikroalgenreaktors ist in Kapitel 3.1. aufgelistet.

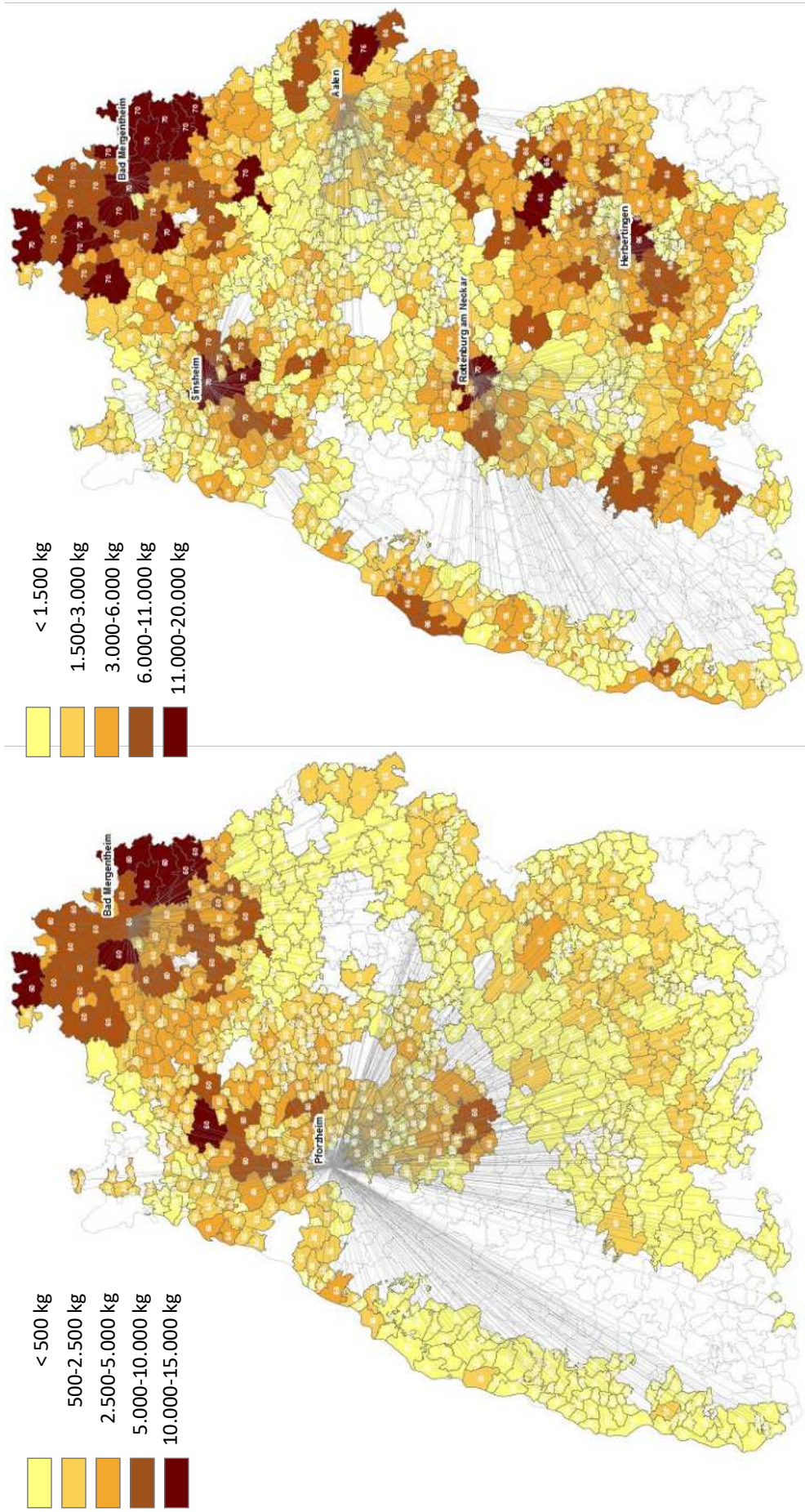


Abbildung 12: Ergebnis der Standortoptimierung der Lignocellulose Bioaffinerie ohne (links) und mit (rechts) einer angebondenen heterotrophen Mikroalgenkultivierung in Abhängigkeit von Bereitstellungs-, preis-, -ort für Reststroh

Ergebnisse der maximalen Miscanthusverwertung

Die maximal zugeführte Menge an Miscanthus für eine Lignocellulose Bioraffinerie wird wie beim Reststroh mit 400.000 t a^{-1} angenommen. Ebenfalls werden lediglich 10 % der Glukosemenge für die Mikroalgen genutzt, sodass die Anzahl von sechs Mikroalgenreaktoren erhalten bleibt. Im Unterschied zur Reststrohverwertung ergibt sich jedoch folgender Aspekt. Es existiert kein Unterschied zwischen der Standortoptimierung von Lignocellulose Bioraffinerien mit und ohne eine Anbindung der Mikroalgenkultivierung. In beiden Fällen werden die drei gleichen Standorte gewählt. Die transportierten Mengen und die Anzahl der 747 Gemeinden als auch die durchschnittlichen Miscanthuspreise von 66 € t^{-1} bleiben unverändert. Wird die Anzahl der zu beliefernden Anlagen miteinander verglichen, so fällt auf, dass die Anlage am Standort Bad Mergentheim von 118 Gemeinden aus zu einem durchschnittlichen Bereitstellungspreis von 65 € t^{-1} , die Anlage am Standort Sinsheim von 175 Gemeinden aus zu einem durchschnittlichen Bereitstellungspreis von etwa 66 € t^{-1} und die Anlage am Standort Rottenburg am Neckar von 456 Gemeinden aus zu einem durchschnittlichen Bereitstellungspreis von ebenfalls 66 € t^{-1} beliefert wird. Identisch mit der Lösung aus der Strohverwertung stellt der Standort Bad Mergentheim aufgrund der geringen Anzahl an Gemeinden und des durchschnittlichen Bereitstellungspreises einen attraktiven Standort dar. Der Standort Heilbronn ergibt jedoch auch bei der Miscanthusverwertung den optimalen Standort, wenn die Anzahl an möglichen Anlagenstandorten auf einen reduziert wird.

Es wird nahezu das komplette Miscanthusangebot verwertet, was vergleichbar ist mit dem Ergebnis der Strohverwertung. Der Unterschied liegt jedoch in der Anzahl der Anlagen, die durch das Biomasseaufkommen begrenzt werden. Wohingegen insgesamt fünf Anlagen errichtet werden, um Stroh zu verwerten, werden für die Miscanthusverwertung drei Anlagen errichtet, die jeweils sechs 150 m^3 – Mikroalgenreaktoren angebonden haben. Jeder der drei Anlagenstandorte hat einen jährlichen Biomassebedarf von 400.000 t , sodass insgesamt jährlich fast das höchstmögliche Miscanthuspotential von $1.200.000 \text{ t}$ verarbeitet wird, um ca. 70 kt Lignin, 172 kt Glukose (hiervon werden 10 % für die Herstellung von Mikroalgen verwendet) und 57 kt C_5 -Zucker herzustellen und am Markt zu verkaufen. Der gesamte jährliche Gewinn beträgt in etwa 215 Mio. € und integriert Transportkosten von $22,4 \text{ Mio. €}$ und Bereitstellungskosten von $80,5 \text{ Mio. €}$. Pro Anlage wird somit ein durchschnittlicher Gewinn von etwa 72 Mio. € erzielt. Wird jedoch auf die Mikroalgenkultivierung verzichtet, schrumpft der Gewinn pro Anlage auf etwa 5 Mio. € . Somit erhöht sich die Wirtschaftlichkeit der vorgestellten Lignocellulose Bioraffineriekonzeptes durch die Mikroalgenkultivierung in einem großen Maße.

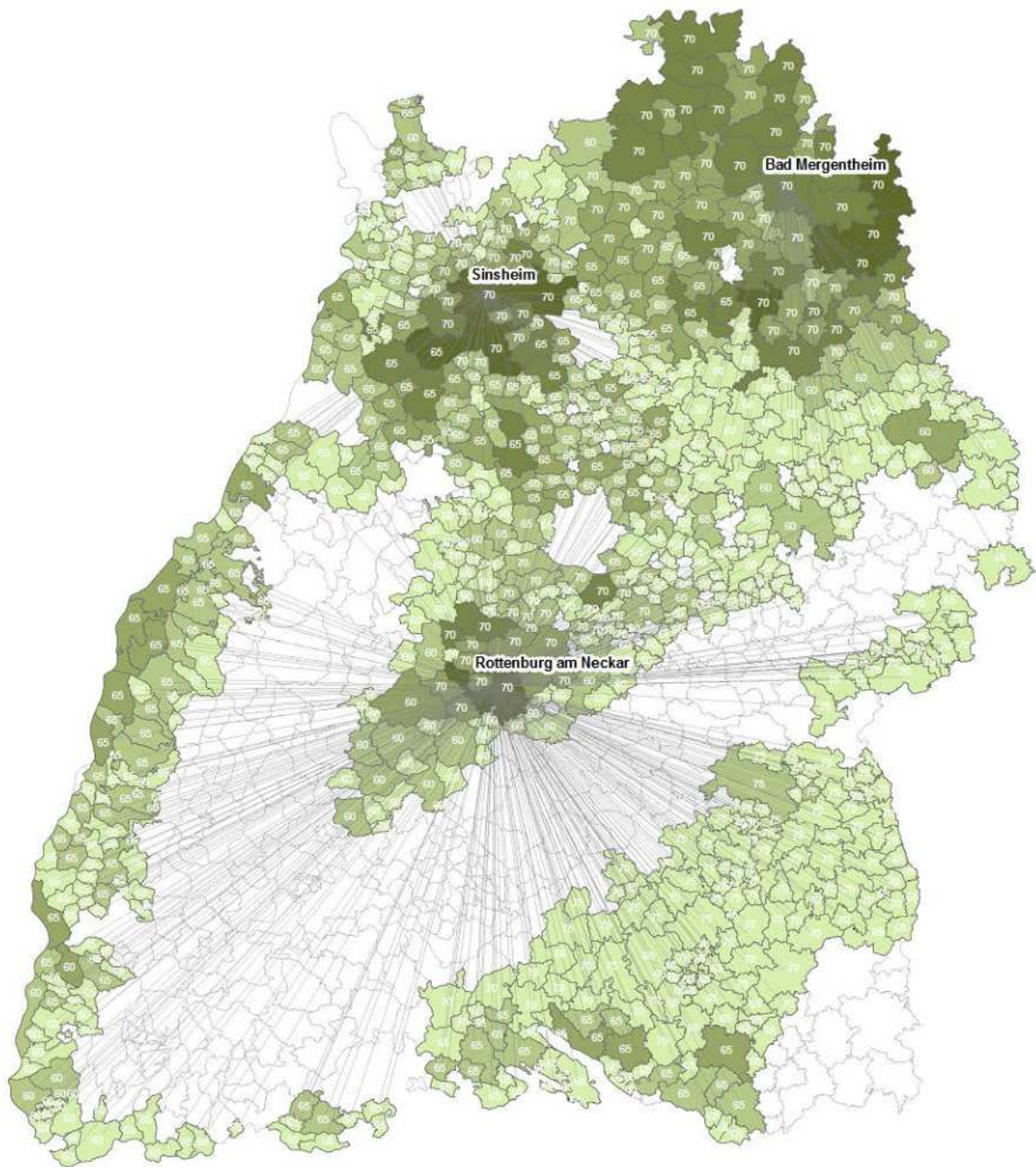


Abbildung 13: Ergebnis der Standortoptimierung der Lignocellulose Bioraffinerie mit einer angebundene heterotrophe Mikroalgenkultivierung in Abhängigkeit von Bereitstellungsmenge-, preis-, -ort für Miscanthus

M5: Techno-ökonomische Standortanalyse für die ausgewählten innovativen Prozessketten ist abgeschlossen. Standorte und Ausgestaltung geeigneter Pilotanlagen werden definiert.

5.3 Diskussion

Durch die hohen Kosten ist phototroph erzeugte Mikroalgenbiomasse in geschlossenen Photobioreaktoren derzeit als Nahrungs- und Futtermittel auf dem Markt weder konkurrenzfähig noch wirtschaftlich nachhaltig (Tredici et al., 2016). Als Substitut für kommerzielle Nahrungsmittel, wie Fleisch, Fisch oder Molkereiprodukte oder Futtermittel wie Soja kann Mikroalgenbiomasse nur bei einem Zehntel der aktuellen Kultivierungskosten in Betracht gezogen werden (Draaisma et al., 2013). Nach Berechnungen aus Veröffentlichungen von Norsker et al. (2011), Draaisma et al. (2013) und Tredici et al. (2016) können die Kosten durch eine Vergrößerung der Kultivierungsanlagen mit geschlossenen Systemen ab 100 ha auf 3,20 bis 12,20 € kg⁻¹ BMTG reduziert werden (in Abhängigkeit der zu kultivierenden Mikroalgenart, des Systems und des Standortes). Durch den großen Flächenbedarf, den hohen Produktions- und Investitionskosten ist die Erzeugung von phototropher Mikroalgenbiomasse zur primären Reduktion des CO₂-Ausstoßes von Verbrennungsanlagen ebenfalls ungeeignet (Epp, 2017). Aus den oben erwähnten Gründen wird die phototrophe Kultivierung von Mikroalgen vorwiegend für die Herstellung so genannter hochpreisiger „High-value“ Produkte wie ungesättigte Fettsäuren (Omega-3-Fettsäuren) und Farbstoffe (Astaxanthin, Lutein, Phycocyanin, Beta-Carotin) in Betracht gezogen. Jedoch wurde bei den Berechnungen in Kapitel Phototrophe Kultivierung ausschließlich die Erzeugung von trockener Mikroalgenbiomasse intakter unaufgeschlossener Zellen betrachtet. Der Aufschluss von Zellen (z.B. in Rührwerkskugelmühle) wurde im Vergleich zu den Berechnungen in Heterotrophe Kultivierung nicht einbezogen. Dieser Schritt ist bei der phototrophen Kultivierung aufgrund der niedrigen Wachstumsraten mit hohen Kosten verbunden.

Die heterotrophe Kultivierung von Mikroalgen ist unabhängig von klimatischen Bedingungen. Dadurch ist es möglich, ganzjährig bei konstanten Wachstumsraten Biomasse zu gewinnen. Während der chemischen Extraktion von Lignin aus holzartiger Biomasse entsteht bis zu 40 % Glukose und andere C₅-Zucker wie Xylose. Die gewonnene Glukose kann als Kohlenstoff- und Energiequelle für die heterotrophe Kultivierung von Mikroalgen wie *Chlorella vulgaris* verwendet werden, um hochwertige Biomasse mit einem hohen Anteil an gesättigter Fettsäuren von bis zu 40 % und einen Proteinanteil von bis zu 15 % zu erzeugen. Diese besitzt im Vergleich zur phototroph erzeugten grünen Biomasse eine weiße bis gelbliche Farbe mit einem neutralen Aroma. Dadurch erschließen sich in der Nahrungsmittelindustrie viele Möglichkeiten der Verarbeitung. Durch die deutlich niedrigeren Produktionskosten kann heterotroph erzeugte Biomasse als Substitut für Eier (bzw. Eipulver) unter den Modellannahmen wirtschaftlich nachhaltig produziert werden. Hier ist allerdings zu klären ob das Eipulver aus ernährungswissenschaftlicher Sicht 1:1 durch Algenpulver substituiert werden kann. Da das Algenpulver nur eine Kombination aus Ei und Butter ersetzen kann, sollte darüber hinaus bei weiteren Untersuchungen der tatsächliche Absatzmarkt bestimmt werden.

Die Auflistung aller benötigten Geräte und Betriebsstoffe kann recht einfach gestaltet, sodass die reale Erzeugung von heterotropher Mikroalgenbiomasse mit höheren Kosten verbunden

ist. Unter anderem wurde die Erzeugung von Druckluft und Kühlwasser nicht berücksichtigt. Des Weiteren fehlen Geräte, Chemikalien und benötigte Betriebszeit zur Reinigung und Sterilisation der Fermenter und der gewonnenen Biomasse. Die Energieverbräuche der in die Kostenstrukturen einbezogenen Fermenter (11, 75 und 150 m³) wurden nach Junker (2004) berechnet. In dieser Veröffentlichung wurden jedoch nur Leistungsangaben von Fermentern im Labor bis Pilotmaßstab (30-19.000 l) angegeben. Wobei sich der Energieeintrag (in kWh l Volumen) mit steigenden Reaktorvolumen stark verringert. Ob sich dies auch bei Reaktoren über 19.000 l Volumen so verhält, müsste in weiteren Untersuchungen ermittelt werden. Die Kosten können jedoch auch durch den Einsatz von Maschinen mit erhöhter Kapazität für die Aufbereitung geernteter Biomasse (Aufschluss, Aufkonzentrierung, Trocknung) noch verringert werden. Zur präziseren Ermittlung der Chemikalienpreise zur Herstellung der Nährmedien müssen in weiteren Projekten Angebote im Chemikaliengroßhandel eingeholt werden. Des Weiteren besteht im industriellen Produktionsmaßstab die Möglichkeit auf Mineraldünger zurück zu greifen, um die Produktionskosten zu reduzieren (Acién et al., 2012). Der wichtigste Nährstoff, die Kohlenstoff- und Energiequelle Glukose geht in dieser Arbeit mit Kosten von 0,00 € kg⁻¹ in die Berechnung ein, da er direkt aus dem Orgnosolv-Prozess bezogen werden soll. Der Preis der C-Quelle kann 60-70 % der Gesamtkosten zur Kultivierung heterotropher Mikroalgenbiomasse ausmachen (Yan et al., 2011). Umso wichtiger ist es Nährstoffkreisläufe im Sinne eines Bioraffineriekonzeptes zu nutzen, um die Produktionskosten zu senken und die Wirtschaftlichkeit von Herstellungsprozessen zu steigern. Dazu bedarf es weitere Recherchearbeit zur genaueren Detaillierung des Kultivierungsprozesses (u.a. anhand von Studien zur Charakterisierung der Hefezellfermentation zur Erzeugung von Bioethanol).

Die Ergebnisse der Standortoptimierung haben aufgezeigt, dass die Wirtschaftlichkeit von Bioraffineriekonzepten durch die Anbindung von heterotrophen Mikroalgenreaktoren enorm gesteigert werden kann. Die Glukose ist ein Bestandteil lignocellulosehaltiger Biomasse und kann durch die Mikroalgen zu hochwertigen Produkten aufgewertet werden, um als Eiweißsubstitut am Markt platziert zu werden. Um jedoch die entsprechenden Qualitätsstandards zu gewährleisten, sollte die Qualität der Substrate und folglich der Rohstoffe ausreichend sein. Insofern muss die Biomasse als Rohstoff möglichst homogene Eigenschaften aufweisen, um eine konsistente Qualität des Lignins und der Glukose zu ermöglichen. Die Eigenschaften der zu verwendenden Biomassen sollten daher mit Maßnahmen beim Anbau gezielt beeinflusst werden. Inwiefern diese Maßnahmen bei Reststoffen wie Stroh sinnvoll sind, bleibt zu untersuchen. Demgegenüber kann Miscanthus durch Maßnahmen zielgerichtet mit homogenen Eigenschaften angebaut werden. Jedoch geht der Anbau von Miscanthus mit diversen Konflikten einher, wie zu Beginn des Berichts beschrieben. Der Vorteil der Verwertung von Miscanthus liegt unter anderem auch bei der erhöhten Menge an Bestandteilen wie Lignin und Glukose im Vergleich zum Reststroh. Eine denkbare Erweiterung der Anwendung könnte Waldrestholz sein. Waldrestholz ist ein Reststoff mit einem hohen Anteil an Lignin und Glukose und

steht in keiner Konkurrenz zur landwirtschaftlichen Flächennutzung im Gegensatz zum Miscanthus.

Der vorgestellte Ansatz der Modellkopplung bildet die Grundlage für zukünftige Untersuchungen. Neben den integrierten Konversionsverfahren wie der Verbrennung, dem Bio-raffineriekonzept und der Mikroalgenkultivierung können weitere Verfahrenstechnologien wie die Vergasung berücksichtigt werden. Weiterhin ist auch die Verwertung von Waldrestholz und KUPs erwünscht, um ein möglichst breites Spektrum der Biomasseverwertung abzudecken und untersuchen zu können. Einen entscheidenden Aspekt bei den Untersuchungen ist die Definition der beiden präsentierten Szenarien. Die Szenarien unterscheiden sich in der Art der verwendeten Biomasse und der Anlagengröße, welche wiederum die genutzte Biomassemenge festlegt. Die daraus abgeleiteten Szenarien repräsentieren daher die Verwertung einer geringen und einer hohen verfügbaren Biomassemenge. In der Zukunft sollte jedoch zusätzlich der Produktmarkt berücksichtigt werden, um einerseits valide Produktpreise abzubilden und andererseits eine realistische Produktnachfrage vorzugeben. Denn ohne eine Begrenzung, wie bisher auf der Angebotsseite oder wie angedacht auf der Nachfrageseite, führen technologische Skaleneffekte zur Umsetzung einer möglichst großen Anlage mit einer jährlichen Kapazität von über 2 Mio. t Biomasseinput. Eine Investition in derart große Anlagenkonzepte ist jedoch mit hohen Risiken verbunden und zudem sind die Konzepte technologisch (noch) nicht ausgereift. Die zugrundeliegenden Annahmen dieser Untersuchung sind für eine Machbarkeitsstudie und Konzeptbewertung ausreichend. Jedoch sollte gewiss sein, dass eine Unsicherheit in den verwendeten Daten vorliegt, eine Unschärfe in der verfahrenstechnischen Modellierung existiert und methodische Grenzen vorhanden sind. Dennoch können Aussagen über die Eignung der betrachteten Prozesskette getroffen werden, um weitere detailliertere Untersuchungen durchzuführen. Diese Untersuchungen können bspw. Effekte der Prozesskette auf weitere Sektoren (z.B. Arbeitsmarkt) systemweit analysieren, neben der wirtschaftlichen Bewertung auch ökologische Aspekte berücksichtigen und politische Entscheidungsfragen umfassen.

Die Ergebnisse des landwirtschaftlichen Biomassenangebots deuten die vielfältigen Anpassungsmaßnahmen der landwirtschaftlichen Produktion auf die unterschiedlichen Rahmenbedingungen an. Je nach genutzter Biomasse fallen die Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion unterschiedlich aus. Die Ergebnisse zeigen, dass nicht selten traditionelle bioökonomische Nutzungspfade (bspw. Biogassubstratproduktion) durch innovative ersetzt werden. Dies liegt daran, dass in Baden-Württemberg keine zusätzlichen Brach- oder Marginalflächen in die landwirtschaftliche Kultivierung genommen werden können und somit die landwirtschaftliche Fläche den begrenzenden Faktor darstellt. Dies macht die Wichtigkeit von ökonomischer ex-ante Modellierungen derartiger innovativer Wertschöpfungsketten deutlich, um mögliche Fehlentwicklungen frühzeitig identifizieren zu können. Für die notwendige holistische Analyse derartiger Wertschöpfungsketten sollte der Modellansatz zusätzlich um eine

ökologische Untersuchung erweitert werden oder diese in einem nachgelagerten Schritt durchgeführt werden.

6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit konnten die Kontakte zum Kompetenznetz der Modellierung des Forschungsprogramms Bioökonomie genutzt werden, um z.B. die Szenarienannahmen mit den beteiligten Wissenschaftlern zu diskutieren. Außerdem konnte auf die im Rahmen des Kompetenznetzes modellierten integrierten Szenarien für potenzielle Entwicklungspfade der Bioökonomie zurückgegriffen werden.

Für Ableitung der Produktionsbedingung von *Miscanthus* in Baden-Württemberg wurde mit den Mitarbeitern des Forschungsprojekts „*Miscanthus*-Genotypen für lignozellulosebasierte Wertschöpfungsketten“ des Forschungsprogramms Bioökonomie zusammengearbeitet.

Zur Beurteilung des Kultivierungsprozesses und der Verarbeitung heterotropher Biomasse wurden unter anderem mit Jörg Ullmann, Geschäftsführer der *Roquette Klötze GmbH & Co. KG* und Kirstin Knufman, geschäftsführende Inhaberin von *pureraw* Kontakt aufgenommen und diskutiert. Des Weiteren wurde zur Charakterisierung des Aufschlusses mit diversen Herstellern Kontakt aufgenommen, um Preise, Energieverbräuche und Leistungen von Rührwerkskugelmühlen in Erfahrung zu bringen.

Durch die Absprache mit dem Projekt BWBÖ 17011 des Fraunhofer IGB konnten keine überschneidenden Themen gefunden werden.

7 Beitrag der Ergebnisse zu Zielen des Förderprogramms

Das Projekt trägt zum Forschungsinhalt der Ausschreibung „Nachhaltige Bioökonomie“ in folgenden Punkten bei:

- Der Modellverbund zwischen EFEM und BiOLoCaTe erlaubt eine Bewertung der nachhaltigen Biomasseproduktion für die Bioökonomie in Baden-Württemberg. Da EFEM neben dem Biomasse Input für die Bioökonomie auch die Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten für die Nahrungsmittel- und Futterproduktion berücksichtigt, kann die Konkurrenzsituation um landwirtschaftliche Fläche mit untersucht werden.
- BiOLoCaTe optimiert anhand des potenziellen Biomasseangebots und unter Berücksichtigung anderer wichtiger Standortfaktoren in Baden-Württemberg, optimale Standorte möglicher Bioraffinerien. Durch den Einbezug der Algenproduktion an bekannte energetische und stoffliche bioökonomische Prozessketten werden potenzielle innovative Prozesserweiterungen aufgezeigt. Hierdurch können Abfallprodukte eines Prozesses als Inputfaktoren eines anderen Prozesses, in unserm Beispiel die Mikroal-

genproduktion, weiter veredelt werden. Hierdurch kann im Sinne der Kreislaufwirtschaft sowohl die ökonomische als auch die ökologische Nachhaltigkeit von Prozessketten gesteigert werden.

8 Verwertung und Forschungstransfer

Frau Dr. Angenendt nimmt im Rahmen der Landesstrategie Baden-Württemberg „Nachhaltige Bioökonomie“ beim Beteiligungsprozess unter der Federführung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg „Plan B“ am Arbeitskreis 3 „Indikatoren und Kriterien zur Bewertung der Bioökonomie“ teil. Beim Beteiligungsprozess unter der Federführung des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz „BioWerZ“ nehmen Herr Prof. Bahrs und Frau Dr. Angenendt am Arbeitskreis 1 „(Nachhaltige) Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse“ teil. Hierdurch kann Expertise, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes, aber auch durch die Forschungsaktivitäten im Forschungsprogramm Bioökonomie Baden-Württemberg gewonnen wurden, in dem Beteiligungsprozess für die Landesstrategie eingebracht werden.

Die Ergebnisse des interdisziplinären Forschungsvorhabens sollen in ein bis zwei wissenschaftlichen Artikeln in referierten Zeitschriften veröffentlicht werden.

9 Literatur

- Ación, F G, Fernández, J M, Magán, J J, & Molina, E (2012). Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology advances*, 30(6), 1344–1353. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.02.005>
- Angenendt, E, Poganietz, W-R, Bos, U, Wagner, S, & Schippl, J (2018). Modelling and Tools Supporting the Transition to a Bioeconomy. In I. Lewandowski (Ed.), *Bioeconomy: Shaping the Transition to a Sustainable, Biobased Economy* (pp. 289–316). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68152-8_9
- El-Chichakli, Beate (2018). *Global Bioeconomy Summit in Berlin: Press Release, Berlin, 11/4/2018*.
- Borowitzka, M A (2013). High-value products from microalgae—their development and commercialisation. *Journal of Applied Phycology*, 25(3), 743–756. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-9983-9>
- Bruijninx, P, Weckhuysen, B, Gruter, G-J, & Engelen-Smeets, E (2016). *Lignin Valorisation: The Importance of a Full Value Chain Approach*: Utrecht University.
- Bumbak, F, Cook, S, Zachleder, V, Hauser, S, & Kovar, K (2011). Best practices in heterotrophic high-cell-density microalgal processes: achievements, potential and possible limitations. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 91(1), 31–46. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3311-6>
- Doucha, J, & Lívanský, K (2012). Production of high-density Chlorella culture grown in fermenters. *Journal of Applied Phycology*, 24(1), 35–43. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9643-2>
- Draaisma, R B, Wijffels, R H, Slegers, P M E, Brentner, L B, Roy, A, & Barbosa, M J (2013). Food commodities from microalgae. *Current opinion in biotechnology*, 24(2), 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2012.09.012>
- ECOFYS Germany GmbH, & Berlin (2017). *Energiepreisbericht für Baden-Württemberg 2016*.
- Efken, J, Dirksmeyer, W, Kreins, P, & Knecht, M (2016). Measuring the importance of the bioeconomy in Germany: Concept and illustration. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 77, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.03.008>
- Engel, P, Fliedner, E, Fröhling, M, Haase, M, Laure, S, & et al (2014). *Lignocellulose Biorefinery - Phase 2, report of work package 4, project duration 01.05.2010-31.03.2014*. Karlsruhe. Retrieved from <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22019509.pdf>
- Epp, M (2017). *CO₂-Sequestrierung aus Feuerungsanlagen über Produktion von Algenbiomasse in Photobioreaktoren* (Diplomarbeit). Fachhochschule Rosenheim, Rosenheim.
- Eriksen, N T (2016). Research Trends in the Dominating Microalgal Pigments, β -carotene, Astaxanthin, and Phycocyanin Used in Feed, in Foods, and in Health Applications. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 06(03). <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000507>
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (2014). *Leitfaden feste Biobrennstoffe. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich. Gülzow-Prüzen*.
- Gillich, C, Narjes, M, Krimly, T, & Lippert, C (in review). Choice Modeling of preference heterogeneity for a better assessment of the potential supply of biomass from permanent crops. *GCB Bioenergy*.
- Haase, M (2012). *Entwicklung eines Energie- und Stoffstrommodells zur ökonomischen und ökologischen Bewertung der Herstellung chemischer Grundstoffe aus Lignocellulose*: KIT Scientific Publishing.
- Harrison, R G, Todd, P, Rudge, S R, & Petrides, D P (2015). *Bioseparations science and engineering* (Second edition). Oxford: Oxford University Press.
- Ho, M T, Allinson, G W, & Wiley, D E (2008). Reducing the Cost of CO₂ Capture from Flue Gases Using Pressure Swing Adsorption. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(14), 4883–4890. <https://doi.org/10.1021/ie070831e>

- Junker, B H (2004). Scale-up methodologies for Escherichia coli and yeast fermentation processes. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 97(6), 347–364. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(04\)70218-2](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(04)70218-2)
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H., & Hofbauer, H. (Eds.) (2009). *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren* (2., neu bearb. und erw. Aufl., korrigierter Nachdr). Berlin: Springer.
- Kaule, G, Stahr, K, Zeddies, J, Angenendt, E, Bakara, H, Billen, N, . . . Schwarz-v. Raumer, H-G (2011). *Forschungsbericht BWPLUS: Nachwachsende Energieträger und Biodiversität: naturschutzbezogene und ökonomische Entwicklung und Bewertung von Anbauszenarien (NawEnNat) und Abschätzung der Produktionspotenziale für den Anbau von Energiepflanzen zur CO2-Bindung in Baden-Württemberg und deren ökologische und ökonomische Bewertung*. Retrieved from <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/100869/>
- Kazenwadel, G (1999). *Ökonomisch/ökologische Beurteilung von regionalen Agrar- und Umweltprogrammen in der Europäischen Union*. Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 1999. *Agrarwirtschaft Sonderheft: Vol. 162*. Bergen/Dumme: Agrimedia.
- Koch, M (2009). *Ökologische und ökonomische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen und deren Standortwahl*.
- Krimly, T, Angenendt, E, Bahrs, E, & Dabbert, S (2016). Global warming potential and abatement costs of different peatland management options: A case study for the Pre-alpine Hill and Moorland in Germany. *Agricultural Systems*, 145, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.009>
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (2017). *KTBL Wirtschaftsdüngerrechner*. Retrieved from <http://daten.ktbl.de/wdrechner/prodverfahren>
- Laure, S, Leschinsky, M, Fröhling, M, Schultmann, F, & Unkelbach, G (2014). Assessment of an organosolv lignocellulose biorefinery concept based on a material flow analysis of a pilot plant. *Cellul Chem Technol*, 48(9-10), 793–798.
- Leesing, R, Kookkhunthod, S, & Nontaso, N (2011). Microalgal lipid production by microalgae Chlorella sp. kku-s2. *Eng. Technol.*, 52, 499–502.
- Liang, Y, Sarkany, N, & Cui, Y (2009). Biomass and lipid productivities of Chlorella vulgaris under autotrophic, heterotrophic and mixotrophic growth conditions. *Biotechnology Letters*, 31(7), 1043–1049. <https://doi.org/10.1007/s10529-009-9975-7>
- Meyer, R (2017). Bioeconomy Strategies: Contexts, Visions, Guiding Implementation Principles and Resulting Debates. *Sustainability*, 9(6), 1031. <https://doi.org/10.3390/su9061031>
- Miazek, K, Remacle, C, Richel, A, & Goffin, D (2014). Effect of Lignocellulose Related Compounds on Microalgae Growth and Product Biosynthesis: A Review. *Energies*, 7(7), 4446–4481. <https://doi.org/10.3390/en7074446>
- Milledge, J J (2011). Commercial application of microalgae other than as biofuels: A brief review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 10(1), 31–41. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9214-7>
- Morales-Sánchez, D, Martínez-Rodríguez, O A, & Martínez, A (2017). Heterotrophic cultivation of microalgae: production of metabolites of commercial interest. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92(5), 925–936. <https://doi.org/10.1002/jctb.5115>
- Norsker, N-H, Barbosa, M J, Vermuë, M H, & Wijffels, R H (2011). Microalgal production--a close look at the economics. *Biotechnology advances*, 29(1), 24–27. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.08.005>
- O'Brien, M, Wechsler, D, Bringezu, S, & Schaldach, R (2017). Toward a systemic monitoring of the European bioeconomy: Gaps, needs and the integration of sustainability indicators and targets for global land use. *Land Use Policy*, 66, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.04.047>
- Petig, E, Rudi, A, Angenendt, E, Schultmann, F, & Bahrs, E (2018). Modellbasierte Standortoptimierung von Konversionsanlagen für landwirtschaftliche Biomasse in Baden-Württemberg am Beispiel der Strohverbrennung. *Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e. V.* (53).
- Philp, J (2018). The bioeconomy, the challenge of the century for policy makers. *New biotechnology*, 40(Pt A), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2017.04.004>

- Piechocki, J, Zdanis, D, Norris, L M, Rakitsky, W, & Klamczynska, B US 2011/0256282 A1. United States.
- Piotrowski, S, Carus, M, Sibilla, F, Beckmann, J, Kapur, S, Bhattacharjya, S, . . . Diaz-Chavez, R (2013). *Final assessment of the economic, social/legal/political sustainability of the BIOCORE bio-refining system*. Heidelberg. Retrieved from www.biocore-europe.org
- Pulz, O (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57(3), 287–293. <https://doi.org/10.1007/s002530100702>
- Rahaman, M S A, Cheng, L-H, Xu, X-H, Zhang, L, & Chen, H-L (2011). A review of carbon dioxide capture and utilization by membrane integrated microalgal cultivation processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4002–4012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.031>
- Rettenmaier, N, Harter, R, Himmler, H, Keller, H, Kretschmer, W, Müller-Lindenlauf, M, . . . Schröter, C (2014). *Integrated sustainability assessment of the BIOCORE biorefinery concept, Report prepared for the BIOCORE project*. Heidelberg. Retrieved from www.biocore-europe.org
- Richard Riester et al. (2017). Agrarmärkte 2017.
- Rösemann, C, Haenel, H-D, Dämmgen, U et al. (2015). *Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 - 2013 ; Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2015. Thünen Report: Vol. 27*. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut. Retrieved from <http://d-nb.info/1070282898/>
- Safi, C, Cabas Rodriguez, L, Mulder, W J et al. (2017). Energy consumption and water-soluble protein release by cell wall disruption of *Nannochloropsis gaditana*. *Bioresource technology*, 239, 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.012>
- Schäfer, M (2006). Abschätzung der Emissionen klimarelevanter Gase aus der Landwirtschaft Baden-Württembergs und Bewertung von Minderungsstrategien unter Nutzung eines ökonomisch-ökologischen Regionalmodells. *Berichte aus der Agrarwissenschaft, Shaker Verlag*.
- Schatka, A (2011). Strategische Netzwerkgestaltung in der Prozessindustrie. Eine Untersuchung am Beispiel der Produktion von synthetischen Biokraftstoffen. Produktion und Logistik. *Gabler, Wiesbaden*.
- Schütte, G (2018). What kind of innovation policy does the bioeconomy need? *New biotechnology*, 40(Pt A), 82–86. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2017.04.003>
- Schwaderer, F (2012). *Integrierte Standort-, Kapazitäts- und Technologieplanung von Wertschöpfungsnetzwerken zur stofflichen und energetischen Biomassenutzung*. Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Inst. für Technologie (KIT), Diss., 2012. Karlsruhe, Hannover: KIT Scientific-Publ; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. Retrieved from <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fn13/735275459.pdf>
- Smirnova, I, & Zetzl, C (2016). *BioEnergie2021-BIORAFFINERIE2021: Neue Wege zur integrierten Bioraffinerie (Nachfolgeprojekt): Veröffentlichung der Ergebnisse von Forschungsvorhaben im BMBF-Programm: Projektlaufzeit: 01.06. 2013-31.12. 2015*: Technische Universität Hamburg, Institut für Thermische Verfahrenstechnik.
- Tabernerero, A, Martín del Valle, E M, & Galán, M A (2012). Evaluating the industrial potential of bio-diesel from a microalgae heterotrophic culture: Scale-up and economics. *Biochemical Engineering Journal*, 63, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.11.006>
- Takabe, Y, Himeno, S, Okayasu, Y et al. (2017). Feasibility of microalgae cultivation system using membrane-separated CO₂ derived from biogas in wastewater treatment plants. *Biomass and Bioenergy*, 106, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.09.004>
- Tredici, M R, Rodolfi, L, Biondi, N, Bassi, N, & Sampietro, G (2016). Techno-economic analysis of microalgal biomass production in a 1-ha Green Wall Panel (GWP®) plant. *Algal Research*, 19, 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.09.005>
- Vernès, L, Granvillain, P, Chemat, F, & Vian, M (2016). Phycocyanin from *Arthrospira platensis*. Production, Extraction and Analysis. *Current Biotechnology*, 4(4), 481–491. <https://doi.org/10.2174/2211550104666151006002418>

- Vigani, M, Parisi, C, Rodríguez-Cerezo, E, Barbosa, M J, Sijtsma, L, Ploeg, M, & Enzing, C (2015). Food and feed products from micro-algae: Market opportunities and challenges for the EU. *Trends in Food Science & Technology*, 42(1), 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.12.004>
- Wagner, S, Angenendt, E, Beletskaya, O, & Zeddies, J (2017). Assessing ammonia emission abatement measures in agriculture: Farmers' costs and society's benefits – A case study for Lower Saxony, Germany. *Agricultural Systems*, 157, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.06.008>
- Wild, P J de, Huijgen, W J J, & Gosselink, R JA (2014). Lignin pyrolysis for profitable lignocellulosic biorefineries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(5), 645–657. <https://doi.org/10.1002/bbb.1474>
- Yan, D, Lu, Y, Chen, Y-F, & Wu, Q (2011). Waste molasses alone displaces glucose-based medium for microalgal fermentation towards cost-saving biodiesel production. *Bioresource technology*, 102(11), 6487–6493. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.036>
- You, F, & Wang, B (2011). Life Cycle Optimization of Biomass-to-Liquid Supply Chains with Distributed–Centralized Processing Networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(17), 10102–10127. <https://doi.org/10.1021/ie200850t>

Anhang

Forschungsfrage: Welche Gemeinden in Baden-Württemberg sind für den Bau von Biomassekonversionsanlagen geeignet?

Folgende Kriterien werden zur Analyse potentieller Standorte für Biomassekonversionsanlagen auf regionaler Ebene betrachtet:

Verfügbarkeit von Biomasse	Anbindung der Anlage	Vorhandensein von Abnehmern	Beeinträchtigung der Bevölkerung	Bauliche Rahmenbedingungen	Umweltschutz
----------------------------	----------------------	-----------------------------	----------------------------------	----------------------------	--------------

Mithilfe **paarweiser Vergleiche** soll nun eine Gewichtung dieser Faktoren hinsichtlich ihrer Relevanz erfolgen.
 Durch Benutzung des Schiebereglers kann jeweils eingestellt werden, welches der beiden Kriterien als wichtiger eingestuft wird.
 Der Gewichtungsfaktor verdeutlicht, wie viel wichtiger bzw. dominanter ein Faktor gegenüber dem anderen bewertet wird.
 Die Skala reicht von 1 (= beide Faktoren werden gleich gewichtet) bis 9 (= der Faktor ist im Vergleich sehr viel wichtiger einzuschätzen).
 (Eine ausführliche Darstellung der Gewichtungsskala entnehmen Sie bitte dem Tabellenblatt "Gewichtungsskala")

Kommentarfeld

Gewichtungsfaktor	Biomasseverfügbarkeit	Was ist wichtiger?	Anbindung der Anlage	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Anbindung der Anlage ist gleich wichtig als Faktor Biomasseverfügbarkeit				
Gewichtungsfaktor	Biomasseverfügbarkeit	Was ist wichtiger?	Vorhandensein v. Abnehmern	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Vorhandensein v. Abnehmern ist gleich wichtig als Faktor Biomasseverfügbarkeit				
Gewichtungsfaktor	Biomasseverfügbarkeit	Was ist wichtiger?	Beeinträchtigung d. Bevölkerung	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Beeinträchtigung d. Bevölkerung ist gleich wichtig als Faktor Biomasseverfügbarkeit				
Gewichtungsfaktor	Biomasseverfügbarkeit	Was ist wichtiger?	Bauliche Rahmenbedingungen	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Bauliche Rahmenbedingungen ist gleich wichtig als Faktor Biomasseverfügbarkeit				
Gewichtungsfaktor	Biomasseverfügbarkeit	Was ist wichtiger?	Umweltschutz	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Umweltschutz ist gleich wichtig als Faktor Biomasseverfügbarkeit				
Gewichtungsfaktor	Anbindung der Anlage	Was ist wichtiger?	Vorhandensein v. Abnehmern	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Vorhandensein v. Abnehmern ist gleich wichtig als Faktor Anbindung der Anlage				
Gewichtungsfaktor	Anbindung der Anlage	Was ist wichtiger?	Beeinträchtigung d. Bevölkerung	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Beeinträchtigung d. Bevölkerung ist gleich wichtig als Faktor Anbindung der Anlage				
Gewichtungsfaktor	Anbindung der Anlage	Was ist wichtiger?	Bauliche Rahmenbedingungen	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Bauliche Rahmenbedingungen ist gleich wichtig als Faktor Anbindung der Anlage				
Gewichtungsfaktor	Anbindung der Anlage	Was ist wichtiger?	Umweltschutz	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Umweltschutz ist gleich wichtig als Faktor Anbindung der Anlage				
Gewichtungsfaktor	Vorhandensein v. Abnehmern	Was ist wichtiger?	Beeinträchtigung d. Bevölkerung	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Beeinträchtigung d. Bevölkerung ist gleich wichtig als Faktor Vorhandensein v. Abnehmern				
Gewichtungsfaktor	Vorhandensein v. Abnehmern	Was ist wichtiger?	Bauliche Rahmenbedingungen	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Bauliche Rahmenbedingungen ist gleich wichtig als Faktor Vorhandensein v. Abnehmern				
Gewichtungsfaktor	Vorhandensein v. Abnehmern	Was ist wichtiger?	Umweltschutz	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Umweltschutz ist gleich wichtig als Faktor Vorhandensein v. Abnehmern				
Gewichtungsfaktor	Beeinträchtigung d. Bevölkerung	Was ist wichtiger?	Bauliche Rahmenbedingungen	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Bauliche Rahmenbedingungen ist gleich wichtig als Faktor Beeinträchtigung d. Bevölkerung				
Gewichtungsfaktor	Beeinträchtigung d. Bevölkerung	Was ist wichtiger?	Umweltschutz	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Umweltschutz ist gleich wichtig als Faktor Beeinträchtigung d. Bevölkerung				
Gewichtungsfaktor	Bauliche Rahmenbedingungen	Was ist wichtiger?	Umweltschutz	Gewichtungsfaktor
-				-
Faktor Umweltschutz ist gleich wichtig als Faktor Bauliche Rahmenbedingungen				

Abbildung A1: Fragebogen zur Gewichtung der Standortkriterien