



**AgEcon** SEARCH  
RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

*The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library*

**This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.**

**Help ensure our sustainability.**

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

[aesearch@umn.edu](mailto:aesearch@umn.edu)

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

# MODELLBASIERTE STANDORTOPTIMIERUNG VON KONVERSIONSANLAGEN FÜR LANDWIRTSCHAFTLICHE BIOMASSE IN BADEN-WÜRTTEMBERG AM BEISPIEL DER STROHVERBRENNUNG

Eckart Petig<sup>1)</sup>, Andreas Rudi<sup>2)</sup>, Elisabeth Angenendt<sup>1)</sup>, Frank  
Schultmann<sup>2)</sup>, Enno Bahrs<sup>1)</sup>

eckart.petig@uni-hohenheim.de

<sup>1)</sup> Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre (410b)  
Universität Hohenheim

<sup>2)</sup> Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



## 2017

***Vortrag anlässlich der 57. Jahrestagung der GEWISOLA***  
*(Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V.)*  
***und der 27. Jahrestagung der ÖGA***  
*(Österreichische Gesellschaft für Agrarökonomie)*  
***„Agrar- und Ernährungswirtschaft zwischen Ressourceneffizienz und***  
***gesellschaftlichen Erwartungen“***  
***Weihenstephan, 13. bis 15. September 2017***

Copyright 2017 by authors. All rights reserved. Readers may make verbatim copies of this document for non-commercial purposes by any means, provided that this copyright notice appears on all such copies.

# **MODELLBASIERTE STANDORTOPTIMIERUNG VON KONVERSIONSANLAGEN FÜR LANDWIRTSCHAFTLICHE BIOMASSE IN BADEN-WÜRTTEMBERG AM BEISPIEL DER STROHVERBRENNUNG**

## **Zusammenfassung**

Die Transformation einer erdölbasierten zu einer biobasierten Wirtschaft ist auf Rohstoffe aus der Landwirtschaft angewiesen. Dies kann die Konkurrenzsituation zwischen den verschiedenen Nutzungspfaden für landwirtschaftliche Biomassen (food, feed, fuel, fibre) verschärfen. Da viele Technologien und mögliche Absatzwege einer sich entwickelnden Bioökonomie derzeit noch nicht bekannt sind, können Simulationsmodelle Entwicklungspfade, Potenziale, Chancen und Risiken aufzeigen. Im vorliegenden Beitrag wird ein Modellverbund aus einem landwirtschaftlichen Angebotsmodell und einem techno-ökonomischen Standortoptimierungsmodell vorgestellt und die Vorgehensweise am Beispiel der optimalen räumlichen Verteilung von Strohverbrennungsanlagen in Baden-Württemberg aufgezeigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Strohverbrennung ca. 2,3 % des Bruttostromverbrauchs Baden-Württembergs decken könnte. Insgesamt führen die untersuchten Szenarien zu einer Erhöhung der landwirtschaftlichen Deckungsbeiträge. Darüber hinaus zeigt sich, dass der Ausbau der Strohverbrennung sowohl einen Rückgang der Biogassubstratproduktion zur Folge hätte, als auch die Futtermittelzukäufe der landwirtschaftlichen Betriebe in Baden-Württemberg erhöhen würde. Der hier vorgestellte Modellverbund kann für die Analyse weiterer land- und forstwirtschaftlicher Biomassearten für die energetische Verwertung und mögliche Technologien der stofflichen Nutzung, wie z.B. die Produktion von biobasierten Grundstoffen angewendet werden. Darüber hinaus lassen sich weitere Modelle, wie z.B. partielle und allgemeine Gleichgewichtsmodelle, aber auch Modelle zur Bewertung von ökologischen Wirkungen, wie Ökobilanzierungsmodelle, integrieren.

## **Keywords**

Modellierung, Bioenergie, Bioökonomie, Flächenkonkurrenz, techno-ökonomische Bewertung.

## **1 Einleitung**

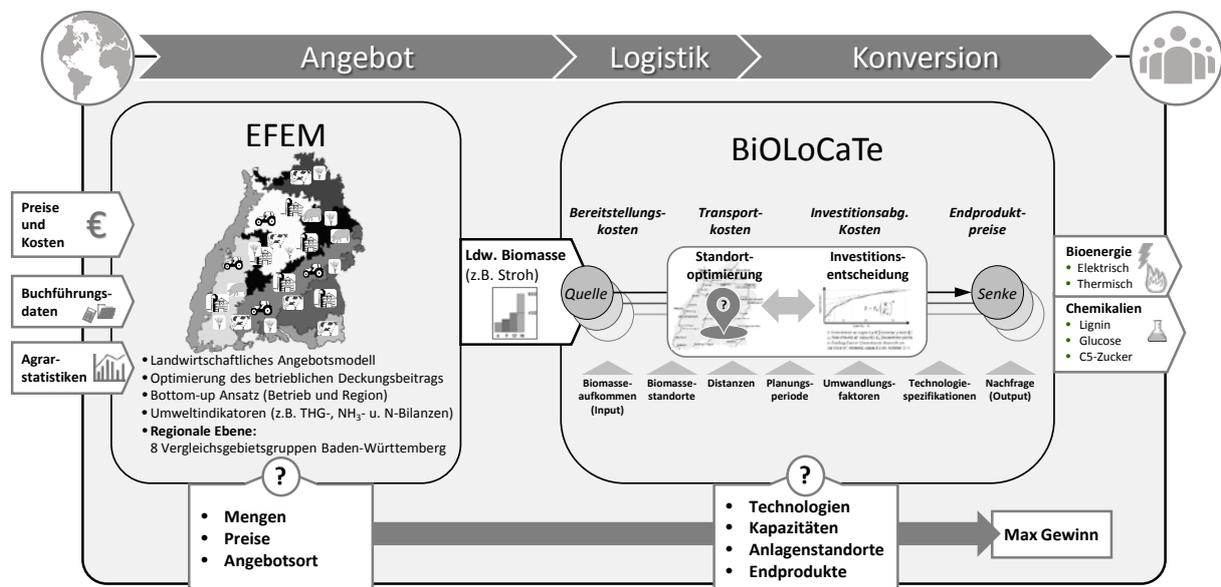
Die Transformation von einer erdölbasierten zu einer biobasierten Wirtschaft ist politisch gewollt und äußert sich weltweit in der Verabschiedung von zahlreichen nationalen Bioökonomiestrategien. So haben in letzten Jahren auch die EU Kommission und die Bundesregierung Deutschland politische Strategien für einen Strukturwandel hin zu einer biobasierten Wirtschaft verabschiedet (z.B. EK, 2012; BMEL, 2014).

Die Ausweitung einer biobasierten Wirtschaft wird als Lösungsmöglichkeit für zahlreiche globale Probleme, wie z.B. Klimawandel oder Endlichkeit der fossilen Rohstoffe gesehen. Gleichzeitig kann eine auf der Grundlage von biobasierten Rohstoffen aufbauende Wirtschaft die Konkurrenz um landwirtschaftliche Biomasse für Nahrungs- und Futtermittel verstärken und somit die Ernährungssituation einer wachsenden Weltbevölkerung zusätzlich verschärfen. Ebenso könnte eine hierdurch induzierte Produktionsintensivierung mit Zielkonflikten im Bereich des Umwelt- und Naturschutzes verbunden sein (BMEL, 2014: 20 ff.; BACKHAUS et al., 2015).

Um die Bioökonomie nachhaltig zu gestalten, wird dem Bereich Forschung und Entwicklung ein großer Stellenwert im Rahmen der verschiedenen Bioökonomiestrategien eingeräumt (SCHMIDT et al., 2012; BMBF, 2010). In Baden-Württemberg hat die Landesregierung das Forschungsprogramm Bioökonomie Baden-Württemberg initiiert, aus dem ein übergreifendes Kompetenznetz Modellierung hervorgegangen ist, das mögliche Entwicklungen der Bioökono-

mie 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 miteinander gekoppelt werden, die dann für spezifische Fragestellungen auf einer niedrigeren räumlichen Ebene genutzt werden können. Diese Vorgehensweise wurde für den vorliegenden Beitrag gewählt. Durch die iterative Kopplung des landwirtschaftlichen Angebotsmodell EFEM (**E**conomic **F**arm **E**mission **M**odel) mit dem techno-ökonomischen Standortoptimierungsmodell BiOLoCaTe (**B**iomass value chain integrated **O**ptimization for **L**ocation, **C**apacity and **T**echnology planning) können potenzielle Standorte von Konversionsanlagen für landwirtschaftliche Biomasse in Baden-Württemberg (BW) aufgezeigt werden (Abbildung 1). Die Anwendung der Modellkopplung soll nachfolgend für das Beispiel Standortoptimierung von Strohverbrennungsanlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung in Baden-Württemberg aufgezeigt werden; sie lässt sich aber ebenso auf andere land- und forstwirtschaftliche Biomassearten und auf Konversionsanlagen für die stoffliche Nutzung übertragen.

## 2 Beschreibung des verwendeten Modellverbundes



**Abbildung 1: Schema des verwendeten EFEM-BiOLoCaTE Modellverbundes**

Optimierte biomassebasierte Wertschöpfungsketten müssen auch die örtliche Verteilung des Biomasseangebots an den Biomassequellen berücksichtigen. Die Endpunkte solcher Ketten bilden Produktsenken, welche die Nachfrage für Endprodukte abbilden. Um diese Nachfrage zu befriedigen, sind Bereitstellungs-, Logistik- und Konversionsprozesse nötig. Die Bereitstellung umfasst hierbei Ernte- und Vorbehandlungsschritte, die Logistik Lager-, Transport- und Umschlagsvorgänge und die Konversion Prozesse der Stofftrennung und Stoffumwandlung. Die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Prozesse bilden Brennstoffmengen, Flächenbedarfe und Einzugsgebiete der Biomasse, die Dichte, der Energieinhalt und zusätzliche Inhaltsstoffe sowie der Wassergehalt und das Erntefenster (KALTSCHMITT und THRÄN, 2006). Diese Eigenschaften sind durch Anforderungen des gewählten Konversionsverfahrens und der skalierbaren Kapazitätsbereiche bedingt. Bei der Kapazitätsplanung verfahrenstechnischer Anlagen sind Größendegressionseffekte entscheidend. Dabei nimmt der Kapitalbedarf für Maschinen und Anlagen bei einer Vergrößerung der Kapazität unterproportional zu (REMMERS, 1995). Damit wird eine zentrale Struktur begünstigt, die im Gegensatz zu einer dezentralen Struktur steht, um Transportdistanzen und somit Transportkosten zu minimieren.

Eine Vielzahl der veröffentlichten Studien zur Standortmodellierung von Biomasse-Konversionsanlagen greift zur Bestimmung des landwirtschaftlichen Biomasseangebots auf Agrarstatistiken zurück (z.B., EKŞIOĞLU et al. (2009), MARVIN et al. (2013), RUDI et al. (2017)). Hierdurch lässt sich i.d.R. nur ein technisches Potenzial und nur bedingt die Konkurrenz um die landwirtschaftliche Biomasse berücksichtigen. Demgegenüber erlaubt die Kopplung von BiOLoCaTe mit EFEM unter Berücksichtigung aller wichtigen landwirtschaftlichen Produktionsverfahren im Bereich der pflanzlichen und tierischen Erzeugung die Abbildung des ökonomischen Biomassepotenzials und die Konkurrenzbeziehungen zwischen unterschiedlichen Nutzungsoptionen.

## 2.1 Modell zur Standortoptimierung von Biomasse-Konversionsanlagen

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 sind 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). Wesentlich hierbei ist die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Investitionen zur Errichtung von Biomassekraftwerken, welche die Bruttoinvestition, die Betriebskosten (bestehend aus Brennstoffkosten, Kosten für Wartung und Instandhaltung, Personalkosten, Kosten für Betriebsmittel sowie zur Reste- bzw. Ascheentsorgung, Kosten für Versicherung und Steuern) als auch die Einnahmen des laufenden Betriebes umfasst und die entstehenden Kosten 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 Biomassearten werden zu potenziellen Standorten  $i$  transportiert, um die Biomassen mit den Konversionstechnologien  $p$  zu den Endprodukten elektrische und thermische Energie zu verarbeiten (vgl. Tabelle 1). Eine Konversionstechnologie  $p$  vereint ein Konversionsverfahren  $t$  sowie die installierte elektrische Leistung 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 1: Indexmengen, Variablen sowie Parameter und Gleichungen von BiOLoCaTe**

Indexmengen		Entscheidungsvariablen	
$p \in \{1, \dots, P', P\}$	Konversionstechnologien	$m_{pbhi} \geq 0$	Kontinuierliche Variable: Massestrom Biomasse [ $t_{FM}/a$ ]
$b \in \{1, \dots, B\}$	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 [€a]
$K^x$	Kosten des Prozesses $x$ (Bereitstellung, Logistik) [€a]
$G^{\text{Konversion}}$	Gesamtgewinn [€a]
$p^{\text{el}}(V_p, X_p^{\text{el}})$	Verkaufspreis für elektrischen Energie in Abhängigkeit der Anlagenverfügbarkeit und der installierten elektrischen Leistung [Cent/kWh <sub>el</sub> ]
$w^{\text{th}}(X_p^{\text{th}})$	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 <sub>FM</sub> /a]
$c_b^{\text{Ber}}$	Kosten für die Bereitstellung der Biomasseart $b$ [€/t <sub>FM</sub> ]
$c_b^{\text{Log-fix}}$	Entfernungsunabhängige Logistikkosten der Biomasseart $b$ [€/t <sub>FM</sub> ]
$c_b^{\text{Log-var}}$	Entfernungsabhängige Logistikkosten der Biomasseart $b$ [€(t <sub>FM</sub> *km)]
$d_{hi}$	Entfernung von der Biomassequelle $h$ zum Standort $i$ [km]
$I_p$	Investition für die Konversionstechnologie $p$ [€]
$g_p$	Gewinn durch die Konversion mit der Konversionstechnologie $p$ [€a]
$p^{\text{th}}$	Verkaufspreis für thermische Energie [Cent/kWh <sub>th</sub> ]
$q^{\text{th}}$	Ausbaukosten für das Wärmenetz [Cent/kWh <sub>th</sub> ]
$lhv_b$	Heizwert der Biomasseart $b$ [MJ/t <sub>FM</sub> ]
$\beta_t^{\text{min}}$	Untergrenze für installierte elektr. Leistung eines Konversionsverfahrens $t$ [MW <sub>el</sub> ]
$\beta_t^{\text{max}}$	Obergrenze für elektr. Leistung eines Konversionsverfahrens $t$ [MW <sub>el</sub> ]
$f_{pb}$	Biomassemenge zur Konversion durch die Konversionstechnologie $p$ [t <sub>FM</sub> /a]
$\eta_p^{\text{el}}$	Elektrischer Wirkungsgrad der Konversionstechnologie $p$
$\eta_p^{\text{th}}$	Thermischer Wirkungsgrad der Konversionstechnologie $p$
$o^{\text{th}}$	Relativer Verlust der thermischen Energie im Wärmenetz
$V_p$	Anlagenverfügbarkeit der Konversionstechnologie $p$ [h/a]
$X_p^{\text{el}}$	Installierte elektrische Leistung der Konversionstechnologie $p$ [MW <sub>el</sub> ]
$X_p^{\text{th}}$	Installierte thermische Leistung der Konversionstechnologie $p$ [MW <sub>th</sub> ]

## Modellgleichungen

Zielfunktion	$z^{\text{ökonomisch}} = G^{\text{Konversion}} - K^{\text{Bereitstellung}} - K^{\text{Logistik}}$	(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	$X_p^{\text{th}} = \frac{X_p^{\text{el}}}{\eta_p^{\text{el}}} \cdot \eta_p^{\text{th}}$	$\forall p \in \{1, \dots, P\}$	(6)
Biomasseinput	$f_{pb} = \frac{X_p^{\text{el}} \cdot V_p \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{lhv_b \cdot \eta_p^{\text{el}}}$	$\forall p \in \{1, \dots, P\}$ $\forall b \in \{1, \dots, B\}$	(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	$g_p = (10 \cdot p^{\text{el}}(V_p, X_p^{\text{el}}) \cdot X_p^{\text{el}} + 10 \cdot (p^{\text{th}} - q^{\text{th}}) \cdot (1 - o^{\text{th}}) \cdot w^{\text{th}}(X_p^{\text{th}}) \cdot X_p^{\text{th}}) \cdot V_p - I_p$	$\forall p \in \{1, \dots, P\}$	(9)

---

Kapazitätsgrenzen	$\beta_t^{min} \leq x_p^{el} \leq \beta_t^{max}$	$\forall p \in \{1, \dots, P'\}$ $\forall t \in \{1, \dots, T\}$	(10)
-------------------	--	---	------

---

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 6 Cent pro kWh<sub>th</sub> partiell verkauft werden (9). Zur Berechnung des Gesamtgewinns werden neben den Einnahmen die getätigte 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 Anlagenkapazität definiert. In Anlehnung an KOCH (2009) und SCHATKA (2011) nutzt der vorliegende Modellierungsansatz einzelne diskrete Werte der degressiven Kostenkurve zur Investitionsabschätzung. Die Kapazitätsbereiche der Konversionstechnologien, die dasselbe Konversionsverfahren nutzen ( $P'$ ), werden dabei durch die minimale und maximale Leistung beschränkt (10) (YOU und WANG, 2011).

Das vorgestellte gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodell integriert strategische Planungsaufgaben der Standortplanung, Verfahrensauswahl und Kapazitätsplanung und wird im Folgenden auf die Fragestellung 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 Verbrennung von Reststroh zur Bioenergieherstellung in Baden-Württemberg untersucht. Die Standortoptimierung erfolgt bei der hier vorgestellten Analyse auf Landkreisebene.

## 2.2 Landwirtschaftliches Angebotsmodell

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), deren Einteilung Abbildung 3 zu entnehmen ist. Diese Untergliederung erfolgt nach 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 exogen vorgegeben. Ebenso die Kapazitätsgrenzen der im Modell abgebildeten Betriebe. Zur Bildung der für den Modellansatz benötigten Betriebsmodelle werden die Buchführungsdaten des Testbetriebsnetzes von Baden-Württemberg ausgewertet. 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, Intensitäten, Leistungen und Kosten regional unterscheiden. Neben den konventionellen Produktionsverfahren sind weitestgehend alle durch Agrarumweltmaßnahmen geförderten Produktionsvarianten integriert. Einige der in EFEM berücksichtigten Ackerbaukulturen können sowohl dem Nahrungsmittel-/ Futtermittelmarkt und zum Teil 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 unterschiedliche Schnitthäufigkeiten und Düngeintensitäten aufweisen. Der Grünlandaufwuchs kann ebenfalls zur Biogasgewinnung verwendet werden. Auch bei den Grünlandverfahren wurden die MEKA-Fördermaßnahmen in EFEM integriert.

Bei der Tierproduktion wird die Milchviehhaltung, inkl. Färsen zur Bestandsergänzung, weibliche und männliche Kälber, Bullenmast, Mutterkuhhaltung, die Veredlungsproduktion 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 gültigen Düngeverordnung integriert.

Die Projektion der einzelbetrieblichen Ergebnisse auf die regionale Ebene erfolgt mit Hochrechnungsfaktoren, die mit Hilfe eines linearen Optimierungsansatzes ermittelt werden (*Hochrechnungsmodule*). Bei dieser Vorgehensweise werden die regionalen Kapazitäten, die der landwirtschaftlichen Regionalstatistik entnommen werden, als Vektor dargestellt, der als Linearkombination der Vektoren der einzelbetrieblichen Kapazitäten den zuvor ausgewählten typischen Betrieben entspricht. Eine genaue Beschreibung dieser Vorgehensweise und von EFEM geben KAZENWADL (1999) und SCHÄFER (2006), eine aktuelle Anwendung von EFEM ist in KRIMLY et al. (2016) 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%.

### **2.3 Datenübergabe**

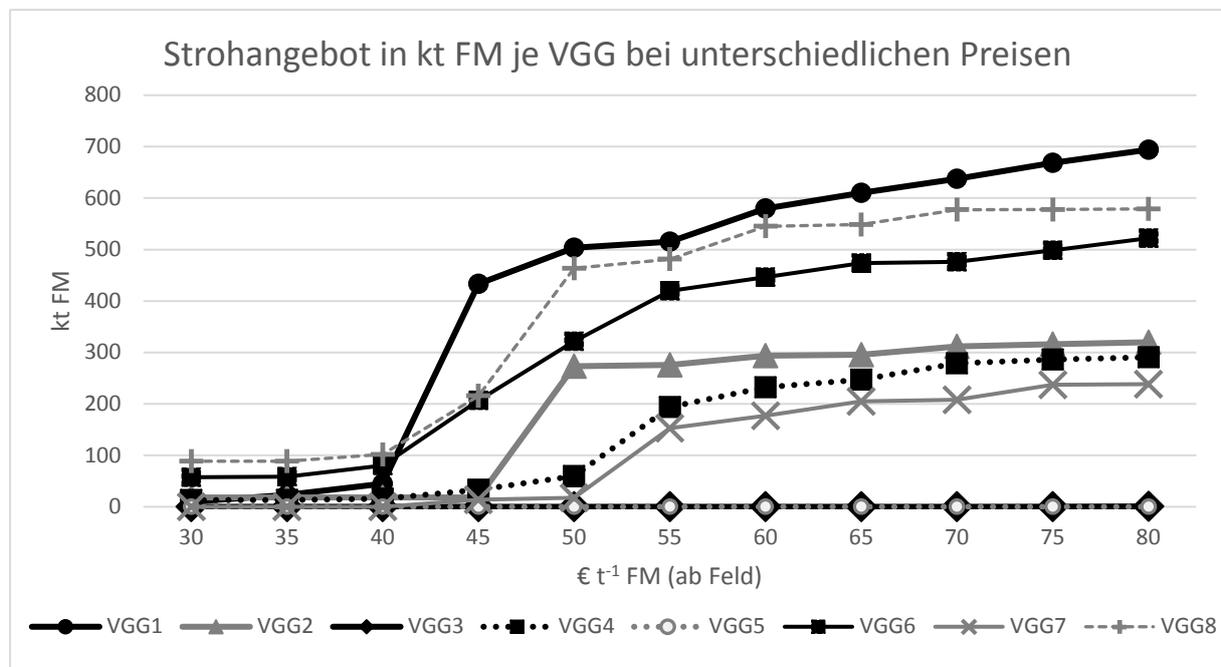
Während die Berücksichtigung der Substratnachfrage von BiOLOCaTe auf Landkreisebene erfolgt, rechnet EFEM auf der Ebene von VGG. Dementsprechend muss das modellierte Biomasseangebot von dieser größeren räumlichen Einheit auf die Kreisebene verteilt werden. Während die administrativen Grenzen der Landkreise nicht denen der VGG zugeordnet werden können, gibt es eine eindeutige Zuordnung der Gemeinden zu den VGG. Deswegen ist es notwendig, die Ergebnisse zuerst auf Gemeindeebene zu verteilen und anschließend auf Kreisebene zu aggregieren. Für das hier maßgebliche Beispiel des Strohangebots wird dabei zunächst der durchschnittliche Strohertrag für jede VGG berechnet, indem das gesamte modellierte Strohangebot der VGG auf die jeweilige Ackerfläche verteilt wird. Anschließend wird dieser durchschnittliche Ertrag den einzelnen Gemeinden innerhalb der jeder VGG zugewiesen. Der Strohertrag wird dann mit der jeweiligen Ackerfläche der einzelnen Gemeinden multipliziert und ergibt so das Strohangebot in Tonne Frischmasse pro Gemeinde. Diese Mengen werden abschließend auf Kreisebene aggregiert und 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 des jeweiligen Landkreises. Da in EFEM nicht die gesamte Stroh Nachfrage 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.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Landwirtschaftliches Biomasseangebot

Um das Strohangebot in Abhängigkeit vom Preis darzustellen, wurden mit EFEM neben dem Basisszenario mit einem Strohpreis von 0 € für diesen bioenergetischen Nutzungspfad elf Szenarien mit unterschiedlichen Strohpreisen berechnet. Das Strohangebot wurde dabei zwischen einem Strohpreis von 30 und 80 €/Tonne Frischmasse (FM) in 5 € Schritten berechnet. Die Preise beziehen sich immer auf eine Tonne Frischmasse und gelten ab Feld. Die Kalkulation der Logistikkosten erfolgt bei BiOLOCaTe. Das entsprechende Strohangebot in Abhängigkeit vom Preis nach VGG ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2: Modelliertes Strohangebot in BW in Abhängigkeit vom Strohpreis je VGG**

Das modellierte Strohangebot unterscheidet sich in Höhe und Anstieg bei Preiserhöhung zwischen den VGG teils sehr deutlich. So wird in VGG 5 (Allgäu) auch bei 80 €/je Tonne kein Stroh angeboten und im Schwarzwald (VGG 3) wird erst ab einem Strohpreis von 75 € eine vergleichsweise geringe Menge (0,1 kt) bereitgestellt. Demgegenüber werden in VGG 1 (Unterland/Gäue) bereits ab einem Preis von 45 € mehr als 400 Kilotonnen Stroh angeboten. Abgesehen von den beiden VGG 3 und 5 zeigen die anderen Regionen einen deutlichen Sprung in der angebotenen Strohmenge zwischen 40 und 55 € auf. Bei der weiteren Erhöhung des Strohpreises in diesen VGG weisen die Strohmenge eine lineare, bzw. leicht abflachende Steigung bis zu einem Strohpreis von 80 € auf. Für Baden-Württemberg insgesamt werden bei einem Preis von 40 €/je Tonne gut 200 Kilotonnen Stroh angeboten. Bei einem Preis von 50 € vergrößert sich das Angebot deutlich auf 1.505 Kilotonnen. Darüber hinaus gibt es bis 80 € einen degressiven Anstieg auf 2.629 Kilotonnen.

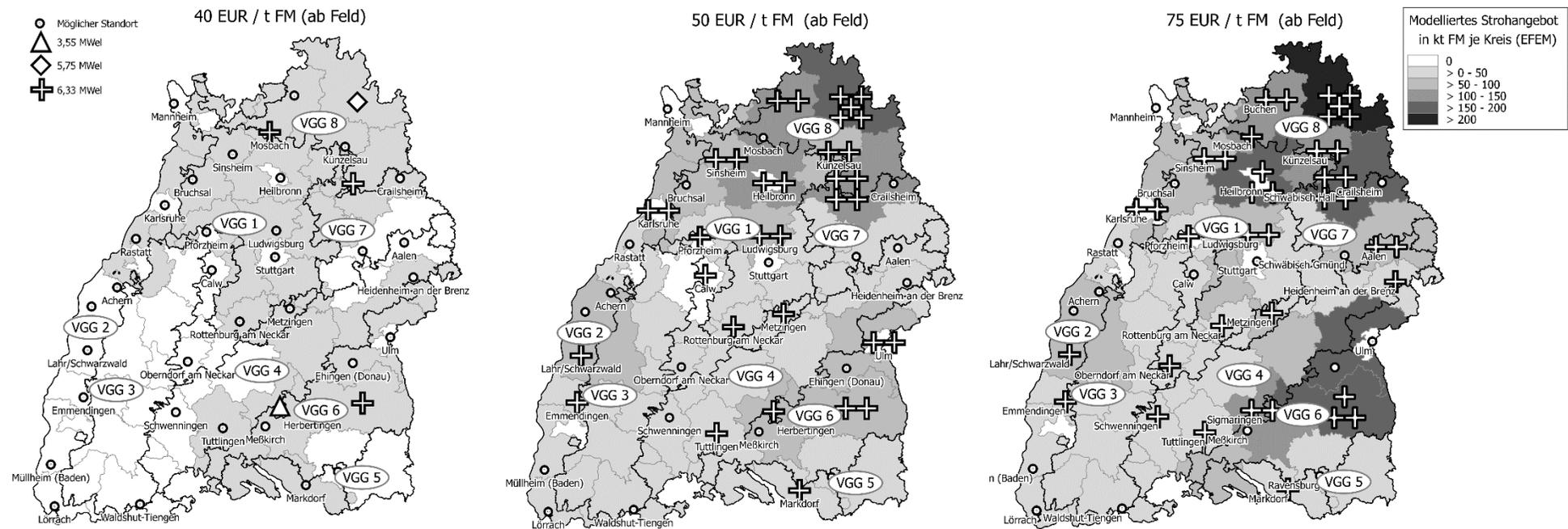
**Tabelle 2: Gesamtdeckungsbeitrag (Mio. €) und Anbauumfänge (ha) ausgewählter Kulturen bei unterschiedlichen Strohpreisen und Änderungen (%) im Vergleich zum Basisszenario in Baden-Württemberg**

	Strohpreis je t FM (ab Feld)			
	0 €	40 €	50 €	75 €
Wintergetreide	424.270 ha	427.183 ha 1%	432.512 ha 2%	464.243 ha 9%
Sommergetreide	98.812 ha	98.589 ha 0%	97.709 ha -1%	89.174 ha -10%
Mais	183.059 ha	181.635 ha -1%	175.850 ha -4%	161.964 ha -12%
Winterraps	75.047 ha	75.047 ha 0%	72.381 ha -4%	69.311 ha -8%
Gesamtdeckungsbeitrag (Mio. €)	1.656	1.662	1.671	1.721

Bei der Iteration von EFFM und BiOLOCaTe hat sich herausgestellt, dass bei einem Strohpreis von unter 40 € und über 75 € je Tonne keine Bioenergieanlagen gebaut werden, da entweder das Biomasseangebot zu gering ist oder die Substratkosten zu hoch sind, um die Anlagen wirtschaftlich betreiben zu können. Deswegen werden in diesem Kapitel aus Gründen der Übersichtlichkeit nach der Darstellung des Strohangebots nur die Ergebnisse der Preisszenarien 40 € 50 € und 75 € je Tonne beschrieben.

In Tabelle 2 sind die modellierten Anbauumfänge ausgewählter Kulturen für Baden-Württemberg dargestellt. Mit einer Erhöhung des Strohpreises steigt der Anbauumfang von Wintergetreide kontinuierlich an und führt bei 75 € zu einer Ausweitung von 9 % gegenüber dem Referenzszenario. Dies entspricht einer absoluten Ausweitung von ca. 40.000 ha. Demgegenüber weisen die anderen Kulturen jeweils einen relativen Rückgang der Anbauflächen auf einem ähnlichen Niveau auf. Der Silomaisanbau wird dabei mit 16.000 ha am stärksten reduziert, wovon mehr als die Hälfte (56 %) auf einen reduzierten Anbau als Biogassubstrat und der Rest auf einer geringeren Nutzung als Tierfutter zurückzuführen ist.

Im Basisszenario wird mit EFEM ein Gesamtdeckungsbeitrag (GDB) für Baden-Württemberg von 1.656 Mio. € berechnet. Bei der Erhöhung des Strohpreises auf 50 € je Tonne steigt dieser um 1 % und bei 75 € um knapp 4 % auf 1.721 Mio. € an. Die verschiedenen VGG weisen dabei große Unterschiede auf. So gibt es in der Futterbauregion VGG 5 keine Veränderung im GDB bei allen berücksichtigten Strohpreisszenarien, wohingegen in der Ackerbauregion VGG 1 bei einem Strohpreis von 75 € je Tonne der GDB der landwirtschaftlichen Betriebe um knapp 8 % steigen würde, sofern das mit EFEM simulierte Strohangebot auch vollständig nachgefragt würde. D.h., die Strohverbrennungsanlagen verwerten das angebotene Stroh vollständig oder es besteht noch eine weitere Nachfrage, z.B. durch Konversionsanlagen für stoffliche Nutzungen des Strohs.



**Abbildung 3: Standorte und Leistung der Bioenergieanlagen (BiOLoCaTe) und des Strohangebots auf Kreisebene (EFEM) bei unterschiedlichen Strohpreisen**

**Tabelle 3: Ergebnisse der Standortoptimierung für Baden-Württemberg insgesamt**

	Einheit	Strohpreis (ab Feld)		
		40€ <sup>-1</sup>	50€ <sup>-1</sup>	75€ <sup>-1</sup>
Biomasseangebot (EFEM)	[kt FM a <sup>-1</sup> ]	211	1.505	2.442
Biomassenachfrage (BiOLoCaTe)	[kt FM a <sup>-1</sup> ]	211	1.495	1.869
Anlagenanzahl	[n]	5	32	40
Elektrische Leistung	[MW <sub>el</sub> ]	28	202	252
Thermische Leistung	[MW <sub>th</sub> ]	77	547	684
Gesamtleistung	[MW]	105	749	936
Durchschnittliche Transportentfernung	[km]	26	17	9

### 3.2 Optimale Standorte für Verbrennungsanlagen von Biomasse

In Abbildung 3 sind die modellierten Standorte und Leistungen der Bioenergieanlagen von BiOLOCaTe und das Strohangebot auf Kreisebene für die unterschiedlichen Preisszenarien dargestellt. Bei einem Strohpreis von 40 €/je Tonne Stroh werden fünf Bioenergieanlagen mit unterschiedlichen Leistungen gebaut, die das komplette Strohangebot nutzen (Tabelle 3). Diese unterschiedlich dimensionierten Anlagen (zwischen 3,65 MW<sub>el</sub> und 6,33 MW<sub>el</sub>) weisen insgesamt eine elektrische Leistung von 28 MW auf, mit einer durchschnittlichen Transportentfernung von 26 km. Beim Preisszenario von 50 € wird mit 1.505 Kilotonnen Stroh eine deutlich größere Menge an Stroh angeboten, die fast komplett durch die platzierten Bioenergieanlagen genutzt wird. In diesem Szenario werden 32 Anlagen mit einer elektrischen Leistung von 202 MW gebaut. Die Anlagen haben dabei alle eine elektrische Leistung von 6,33 MW und das Stroh wird durchschnittlich 17 km transportiert. Bei einem Strohpreis von 75 € nutzen die gebauten Bioenergieanlagen mit 1.869 Kilotonnen ca. 75 % des bei diesen Preis angebotenen Strohs. Die 40 gebauten Anlagen mit jeweils einer elektrischen Leistung von 6,33 MW<sub>el</sub> haben in diesem Szenario insgesamt eine elektrische Leistung von 252 MW, mit einer durchschnittlichen Transportentfernung von 9 km. Die Standorte befinden sich dabei vermehrt im Norden des Bundeslandes in den Regionen der VGG 1 und 8, sowie im Osten in der VGG 6, die sich jeweils durch ein hohes Strohangebot auszeichnen. Die Anlagen würden in dem Szenario mit der größten installierten Leistung (75 €/je Tonne Stroh) mit 1,76 TWh ca. 2,3 % des Bruttostromverbrauchs in Baden-Württemberg decken (MWK, 2016).

## 4 Diskussion und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt am Beispiel von modellierten Strohverbrennungsanlagen eine Methode zur Standortoptimierung von Biomassekonversionsanlagen auf. Dabei erfolgt die Modellierung auf Basis aggregierter Biomasse-Regionalerträge. Durch die Verfügbarkeit räumlich exakterer Ertragsdaten könnte das Modell eine noch bessere Abbildungsgüte entwickeln. Grundsätzlich wird jedoch deutlich, dass die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen im Spannungsfeld zwischen Größendegressionseffekten beim Kapitalbedarf für den Anlagenbau (zentrale Struktur) und der Minimierung der Beschaffungskosten für die landwirtschaftliche Biomasse (dezentrale Struktur) steht. Allein aus diesem Grund ist eine regionale Betrachtung bei der Bewertung von Biomassekonversionsanlagen von großer Bedeutung. Dieser Zusammenhang spiegelt sich auch in den Ergebnissen dieses Modellverbundes wider. So würde bspw. das größte Strohangebot in VGG 1 und 8, einer Ackerbauregion und einer Region mit einem großen Anteil an Ackerbau-, Veredlungs- und Schweine haltenden Verbundbetrieben anfallen. Demgegenüber fallen erwartungsgemäß das Strohangebot und somit auch die Anzahl von potenziellen Verbrennungsanlagen in stark ausgeprägten Futterbauregionen wie dem Schwarzwald (VGG 3) und dem Allgäu (VGG 5) relativ gering aus. Die Ergebnisse zeigen darüber hinaus, dass auch bei Strohverbrennungsanlagen, die lediglich landwirtschaftliche Reststoffe verwerten, Verdrängungseffekte auftreten würden. So würde unter den getroffenen Preisannahmen, der Anbau von Silomais als Substrat für Biogasanlagen zurückgehen und sich auf die Futterzusammensetzung der Tierhaltungsbetriebe auswirken. Die produzierte Gesamtenergiemenge der Verbrennungsanlagen beim Szenario mit einem hohen Strohpreis (75 Euro je Tonne) liegt mit ca. 6,5 TWh je Jahr in der Größenordnung, die BRELLOCHS et al. (2013) in ihrer Studie für Stroh in Baden-Württemberg abgeschätzt haben. In zukünftigen Modellszenarien wird das landwirtschaftliche Biomasseangebot in EFEM um mehrjährige Pflanzen wie KUP und Miscanthus erweitert und um Biomassekonversionsanlagen zur stofflichen Nutzung in BiOLOCaTe ergänzt. Hierdurch soll der Blickwinkel bei der Bewertung einer möglichen Entwicklung der Bioökonomie in Baden-Württemberg erweitert werden.

Eine Ausweitung der Nutzung von landwirtschaftliche Biomasse für die Bioökonomie hätte Veränderungen des Preises für landwirtschaftliche Produkte zur Folge, die in einem landwirtschaftlichen Angebotsmodell nicht berücksichtigt werden können. Hierzu müsste das Modell mit einem Agrarsektormodell gekoppelt werden. Deshalb wird EFEM im Rahmen des Kompetenznetzes Modellierung des Forschungsprogramms Bioökonomie Baden-Württemberg zur Bewertung weiterer möglicher bioökonomischer Entwicklungsszenarien mit dem partiellen Gleichgewichtsmodell ESIM gekoppelt.

## **Danksagung**

Diese Forschungsarbeit wurde durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg Az 33-7533-10-5/96, 33-7533-10-5/114 und 33-7533-10-5/116 unterstützt.

## **Literatur**

- BACKHAUS, G. F., L. BROERS, I. KÖGEL-KNABNER, M. SCHWERIN und D. THRÄN (2015): Nachhaltige Bereitstellung von biobasierten agrarischen Rohstoffen. Aktualisierte Version, April 2015. Bioökonomierat.
- BMBF - BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (2010): Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030. Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft. Berlin.
- BRELLOCHS, J., M. SPECHT, H. OECHSNER, R. SCHÜLE, L. ELTROP, M. HÄRDTLEIN und M. HENBLER (2013): Konzeption für die: (Neu-)Ausrichtung der energetischen Verwertung von Biomasse und der Bioenergie-Forschung in Baden-Württemberg. Im Auftrag des Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, Stuttgart. Url: [http://bioenergieforschungsplattform-bw.de/pb/site/pbs-bw/get/params\\_Datattachment/1681766/Strategien%20f%C3%BCr%20zuk%C3%BCnftige%20%20Forschung\\_Endbericht.pdf](http://bioenergieforschungsplattform-bw.de/pb/site/pbs-bw/get/params_Datattachment/1681766/Strategien%20f%C3%BCr%20zuk%C3%BCnftige%20%20Forschung_Endbericht.pdf). Abruf: 10.02.2017.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2014): Nationale Politikstrategie Bioökonomie. Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft (220).
- EK - EUROPÄISCHE KOMMISSION (2012): Innovation für nachhaltiges Wachstum: eine Bioökonomie für Europa. COM (2012) 60 final. Url: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52012DC0060>. Abruf: 06.02.2017.
- EKŞİOĞLU, S. D., A. ACHARYA, L. E. LEIGHTLEY und S. ARORA (2009): Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. In: Computers & Industrial Engineering 57 (4): 1342–1352.
- FNR - FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (2014): Leitfaden feste Biobrennstoffe. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich. Gülzow-Prüzen.
- KALTSCHMITT, M. und D. THRÄN (2006): Logistik für die Versorgung von Anlagen zur energetischen Nutzung biogener Festbrennstoffe. Anforderungen und Randbedingungen. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft : ZfE 30 (4): 247–256.
- KAZENWADL, G. (1999): Ökonomische/ökologische Beurteilung von regionalen Agrar- und Umweltprogrammen in der Europäischen Union. Agrarwirtschaft, Sonderheft 162. Verlag Alfred Strothe, Frankfurt.
- KOCH, M. (2009): Ökologische und ökonomische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen und deren Standortwahl. Univ.-Verl. Karlsruhe, Karlsruhe.

- KRIMLY, T., E. ANGENENDT, E. BAHRs und S. DABBERT (2016): Global warming potential and abatement costs of different peatland management options. A case study for the Pre-alpine Hill and Moorland in Germany. In: *Agricultural Systems* 145: 1–12.
- KTBL - KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (2017): KTBL Wirtschaftsdüngerrechner. Url: <http://daten.ktbl.de/wdrechner/prodverfahren/>. Abruf: 10.01.2017.
- LEL - LANDESANSTALT FÜR ENTWICKLUNG DER LANDWIRTSCHAFT UND DER LÄNDLICHEN RÄUME (2015): Landwirtschaftliche Betriebsverhältnisse und Buchführungsergebnisse - Wirtschaftsjahr 2013/12. Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume.
- MARVIN, W. A., L. D. SCHMIDT und P. DAOUTIDIS (2013): Biorefinery Location and Technology Selection Through Supply Chain Optimization. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 52 (9): 3192–3208.
- MWK - MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG (2016): Monitoring der Energiewende in Baden-Württemberg. Schwerpunkte Versorgungssicherheit und Effizienztrends Statusbericht 2016. Url: [um.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikation/did/monitoring-der-energiewende-in-baden-wuerttemberg-statusbericht-2016/](http://um.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikation/did/monitoring-der-energiewende-in-baden-wuerttemberg-statusbericht-2016/). Abruf: 10.02.2017.
- REMMERS, J. (1995): Zur Ex-ante-Bestimmung von Investitionen bzw. Kosten für Emissionsminderungstechniken und den Auswirkungen der Datenqualität in meso-skaligen Energie-Umwelt-Modellen. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1991. *Berichte aus der Betriebswirtschaft*. Shaker, Aachen.
- RÖSEMANN, C., H.-D. HAENEL, U. DÄMMGEN, A. FREIBAUER, S. WULF, B. EURICH-MENDEN, H. DÖHLER, C. SCHREINER, B. BAUER und B. OSTERBURG (2015): Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 - 2013 ; Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2015. Thünen Report, Heft 27. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- RUDI, A., A.-K. MÜLLER, M. FRÖHLING und F. SCHULTMANN (2017): Biomass Value Chain Design: A Case Study of the Upper Rhine Region. In: *Waste and Biomass Valorization*: 1–17.
- SCHÄFER, M. (2006): Abschätzung der Emissionen klimarelevanter Gase aus der Landwirtschaft Baden-Württembergs und Bewertung von Minderungsstrategien unter Nutzung eines ökonomisch-ökologischen Regionalmodells. Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss, 2006. *Berichte aus der Agrarwissenschaft*. Shaker, Aachen.
- SCHATKA, A. (2011): Strategische Netzwerkgestaltung in der Prozessindustrie. Eine Untersuchung am Beispiel der Produktion von synthetischen Biokraftstoffen. *Produktion und Logistik*. Gabler, Wiesbaden.
- SCHMIDT, O., S. PADEL und L. LEVIDOW (2012): The Bio-Economy Concept and Knowledge Base in a Public Goods and Farmer Perspective. In: *Bio-based and Applied Economics* 1 (1): 47–63.
- SCHWADERER, F. (2012): Integrierte Standort-, Kapazitäts- und Technologieplanung von Wertschöpfungsnetzwerken zur stofflichen und energetischen Biomassenutzung. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.
- YOU, F. und B. WANG (2011): Life Cycle Optimization of Biomass-to-Liquid Supply Chains with Distributed–Centralized Processing Networks. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 50 (17): 10102–10127.