



# Meilensteine 2030

Elemente und Meilensteine für die  
Entwicklung einer tragfähigen und  
nachhaltigen Bioenergiestrategie



**Energetische  
Biomassenutzung**



## Energetische Biomassenutzung

Schriftenreihe des Förderprogramms  
„Energetische Biomassenutzung“

**BAND 18**

### Meilensteine 2030

Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie

Endbericht zu FKZ 03KB065, FKZ 03MAP230

Herausgegeben von Daniela Thrän, Diana Pfeiffer

**Autoren:**

Thrän, Daniela (DBFZ / UFZ)

Arendt, Oliver; Ponitka, Jens; Braun, Julian (DBFZ)

Millinger, Markus (UFZ)

Wolf, Verena; Banse, Martin (TI)

Schaldach, Rüdiger; Schüngel, Jan (CESR)

Gärtner, Sven; Rettenmaier, Nils (IFEU)

Hünecke, Katja; Hennenberg, Klaus (Öko-Institut)

Wern, Bernhard; Baur, Frank (IZES)

Fritsche, Uwe; Gress, Hans-Werner (IINAS)

Gefördert durch



Projekträger



Programmbegleitung



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Impressum

### Herausgeber

Daniela Thrän, Diana Pfeiffer

### Kontakt

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH  
Torgauer Straße 116  
D-04347 Leipzig  
Telefon: +49 (0)341 2434-554  
Telefax: +49 (0)341 2434-133  
E-Mail: diana.pfeiffer@dbfz.de  
www.energetische-biomassenutzung.de

### Geschäftsführung

Wissenschaftlicher Geschäftsführer:  
Prof. Dr. mont. Michael Nelles  
Administrativer Geschäftsführer:  
Dipl.-Kfm. (FH) LL.M. Daniel Mayer

### Redaktion

Programmbegleitung des Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

### Bildnachweis

Umschlag vorn: A. Gröber, DBFZ; P. Trainer, DBFZ; DBFZ; Rolf van Mehlis, pixelio.de  
Umschlag hinten: DBFZ; Südzucker Zeit; DBFZ; DBFZ  
Alle anderen Urheber sind am Bild verzeichnet.

### Layout & Herstellung

Steffen Kronberg  
Angela Gröber  
Bianca Stur

### Druck

FISCHER druck&medien, Leipzig

### Förderung

Im Jahr 2008 vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, ehemals BMU) initiiert, wird das Förderprogramm seit 2014 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) weitergeführt.

ISSN 2199-2762

© Copyright: Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Druckerzeugnisses darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf anderen digitalen Datenträgern.

Alle Rechte vorbehalten.

© DBFZ 2015 (Aktualisierung: 09.07.2015)

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	8
<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>10</b>
1.1 Hintergrund, Zielstellung und Rahmen	10
1.2 Ergebnisse	14
1.2.1 Technologieentwicklung	14
1.2.2 Rohstoffbasis	15
1.2.3 Flächenbedarf	16
1.2.4 Kumulierte Umweltauswirkungen	17
1.2.5 Auswirkungen auf Biodiversität und Bodenqualität	19
1.2.6 Ernährungssicherheit	20
1.2.7 Regionale Infrastruktur	21
1.2.8 Internationale Energiemärkte und Rückkopplungen	22
1.2.9 Die Effekte im Zeitverlauf	23
1.3 Schlussfolgerungen	25
1.4 Handlungsempfehlungen – Meilensteine 2030	32
<b>2 Einleitung</b>	<b>35</b>
2.1 Hintergrund	35
2.2 Zielstellung und Herangehensweise	39
<b>3 Modellidee + Modellverbund</b>	<b>38</b>
3.1 BENSIM	38
3.2 MAGNET	40
3.3 LandSHIFT	41
3.4 Übersichtsökobilanzen	41
3.5 Ernährungssicherheit	42
3.6 Bewertung flächenbezogener Risiken	42
3.7 Regionale Effekte	42
3.8 Internationale Auswirkungen und Rückkopplungen	42
<b>4 Szenarienrahmen</b>	<b>43</b>
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>46</b>
5.1 Bioenergiebereitstellung / Anlagenpark in Deutschland	46
5.1.1 Ergebnisse der Szenarien	46
5.1.2 Sensitivitäten	50
5.1.3 Schlussfolgerungen und Empfehlungen	56

5.2 Ressourcen und Märkte 2050	57
5.2.1 Wichtige Treiber in MAGNET	57
5.2.2 Ausgestaltung der Szenarien in MAGNET	58
5.2.3 MAGNET-Ergebnisse	59
5.2.4 Sensitivitätsanalyse	66
5.2.5 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	68
5.3 Ressourcen und Landnutzung	68
5.3.1 Überblick über die Ergebnisse	69
5.3.2 BAU-Szenarien Global	69
5.3.3 Nachhaltigkeitsszenarien Global	71
5.3.4 Deutschland	73
5.3.5 Diskussion der Modellergebnisse	75
5.3.6 Modellsensitivität und -unsicherheiten	75
5.3.7 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	77
5.4 Ökobilanzielle Bewertung der Bioenergieszenarien	77
5.4.1 Ziel, Vorgehensweise und Festlegungen	77
5.4.2 Ergebnisse	79
5.4.3 Schlussfolgerungen	96
5.5 Ökologische Bewertung der Landnutzung	99
5.5.1 Bewertungsansatz	99
5.5.2 Risiken für die Biologische Vielfalt	101
5.5.3 Risiken für die Böden	107
5.5.4 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	108
5.6 Bewertung von Ernährungsrisiken	110
5.6.1 Hintergrund	110
5.6.2 Ziel und Vorgehensweise	111
5.6.3 Ergebnisse	112
5.6.4 Schlussfolgerung	120
5.7 Regionale Effekte	121
5.7.1 Kommunal adaptierte Technologien	122
5.7.2 Regionale Auswirkungen auf den Strom- und Wärmemarkt	125
5.7.3 Regionale Anpassungsbedarfe	131
5.7.4 Überblick über die Anpassungsbedarfe	134
5.8 Internationale Auswirkungen und Rückkopplungen	134
5.8.1 Globale nachhaltige Bioenergiepotenziale	134
5.8.2 Mögliche nachhaltige Importpotenziale für Bioenergie	135
5.8.3 Politische Rahmenbedingungen und internationale Ziele sowie Nachhaltigkeitskriterien für Bioenergie	137
5.8.4 Verwendung internationaler Energiedaten	137
5.8.5 Bilanzierung Versorgungssicherheit	137
5.8.6 Rückwirkungen der Szenarien auf das deutsche Energiesystem	139

6 Schlussfolgerungen	141
7 Meilensteine 2030 – Handlungsempfehlungen	148
Abbildungsverzeichnis	152
Tabellenverzeichnis	155
Literatur- und Referenzverzeichnis	156
Anhang	162
A.1 Exkurse	164
A.2 Weiterführende Ergebnisse	168
A.3 Methodischer Anhang	181
A.4 Hintergrunddaten- und Annahmen	217

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Erklärung</b>
<b>BAU</b>	Business as Usual
<b>BENSIM</b>	BioENERgieSimulationsModell
<b>BGA</b>	Biogasanlage
<b>(B)HKW</b>	(Block)Heizkraftwerk
<b>BIP</b>	BruttoInlandsProdukt
<b>BLE</b>	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
<b>BTL</b>	Biomass to liquid
<b>CESR</b>	Center for Environmental Systems Research, Universität Kassel
<b>DBFZ</b>	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
<b>EEA</b>	European Environment Agency
<b>EEG</b>	Erneuerbare Energien Gesetz
<b>ETS</b>	Europäisches Emissionshandelssystem
<b>FAO</b>	United Nations Food and Agricultural Organization
<b>FT</b>	Fischer-Tropsch-Synthese
<b>GAP</b>	Gemeinsame Agrarpolitik
<b>GBEP</b>	Global Bioenergy Partnership
<b>GEA</b>	Global Energy Assessment
<b>GEMIS</b>	Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
<b>GHI</b>	Globaler Hunger Index
<b>GIS</b>	Geoinformationssystem
<b>GTAP</b>	Global Trade Analysis Project
<b>IEA</b>	International Energy Agency
<b>HLPE</b>	High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition
<b>HVO</b>	Hydrogenated Vegetable Oil
<b>IFEU</b>	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
<b>IFPRI</b>	International Food Policy Research Institute
<b>IIASA</b>	Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse
<b>IINAS</b>	Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien

<b>IMF</b>	International Monetary Fund
<b>IZES</b>	Institut für Zukunftssysteme gGmbH
<b>KUP</b>	Kurzumtriebsanlage(n)
<b>KWK</b>	Kraft-Wärme-Kopplung
<b>ORC</b>	Organic rankine cycle
<b>RED</b>	Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2009/28/EG
<b>PE</b>	Primärenergie
<b>PJ</b>	Petajoule (1 PJ= 3,6 TWh; 1 TWh = 1 Mrd. kWh)
<b>SNG</b>	Synthetic natural gas

# 1 Zusammenfassung

## 1.1 Hintergrund, Zielstellung und Rahmen

In einer weitgehend auf erneuerbaren Energien fußenden Energieversorgung in Deutschland muss Bioenergie künftig die Lücken füllen, die nicht aus anderen Quellen gespeist werden können – diese These hat die Diskussion um Bioenergie im beginnenden 21. Jahrhundert stark bestimmt (BARZANTNY et al., 2009; KIRCHNER & MATTHES, 2009; SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN, 2011; SCHLESINGER et al., 2010, 2011).

Dabei gibt es sowohl starke Argumente für den flexiblen Einsatz im Strombereich als auch für ausgewählte Kraftstoffpfade (z. B. Schwerlastverkehr, Schifffahrt, Flugverkehr), während im Wärmebereich Bioenergie als gut durch alternative erneuerbare Versorgungskonzepte ersetzbar gilt. Jedoch hat sich auch gezeigt, dass Biomasse zwar regenerativ, jedoch für den konkreten Zeitraum und unter Nachhaltigkeitsaspekten nur begrenzt verfügbar ist. Künftig wird erwartet, dass der Bedarf an Nahrungs- und Futtermitteln wie auch für die stoffliche Nutzung steigt. Damit wird eine Priorisierung der Einsatzbereiche für den weiteren Ausbau zunehmend notwendig (BMVBS, 2010; THRÄN et al., 2011; KOALITIONSVERTRAG, 2013; MAJER et al., 2013). Es herrscht Einigkeit, dass Bioenergienutzung im Einklang mit den Zielen der nachhaltigen Entwicklung stehen muss und insbesondere gegenüber der Ernährungssicherung nachrangig ist, dass die Nutzung zunehmend an den Erfordernissen des Energiesystems ausgerichtet sein müssen und dass nur bei stetiger Weiterentwicklung der Technologien ein angemessener Beitrag der Bioenergie erreicht werden kann. Auch scheint es sinnvoll, dass man – vor dem Hintergrund der vielfältigen aktuellen Entwicklungen im Bereich der regenerativen, nicht-biogenen Energietechnologien und Energieträger – Bioenergiestrategien favorisiert, die geringe Pfadabhängigkeiten aufweisen und z. B. Technologiekonzepte berücksichtigen, die sowohl im Strom- / Wärme-Bereich als auch im Kraftstoffsektor genutzt werden können.

**Forschungsfragen.** Vor diesem Hintergrund ist eine bessere Kenntnis des Bioenergie-Technologiepotenzials und der möglichen Auswirkungen der Implementierung dieses Potenzials ein wichtiger Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Bioenergiestrategie. Um dieses zu erhalten, wurden im Vorhaben „Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen nachhaltigen Bioenergiestrategie - Meilensteine 2030“<sup>1</sup> ausgewählte Bioenergie-Entwicklungsszenarien für Deutschland bis zum Jahr 2050 simuliert, um daraus Schlussfolgerungen zu ziehen,

- (i) welche Technologieoptionen künftig an Relevanz gewinnen,
- (ii) welche Auswirkungen eine modifizierte Bioenergienutzung in Deutschland für die globalen Märkte mit sich bringt,
- (iii) welche ökologischen, infrastrukturellen und teilweise auch sozialen Gesamteffekte mit unterschiedlichen Strategien verbunden sind und welche Maßnahmen bis 2030 ggf. getroffen werden müssen, um die anvisierten Versorgungsoptionen aus Bioenergie bis 2050 zu realisieren.

<sup>1</sup> Homepage des Projektes siehe: <https://www.energetische-biomassenutzung.de/de/meilensteine-2030.html>

**Rahmenannahmen.** Die wesentlichen Grundannahmen der künftigen Szenarienwelten umfassen z. B.

- (i) die Weiterentwicklung in Deutschland hin zu einer stark effizienz-verbesserten und regenerativ-basierten Energieversorgung im Jahr 2050 (NITSCH, 2008; BMU (Hrsg.), 2009; SCHLESINGER et al., 2010; NITSCH et al., 2010, 2012),
- (ii) die globale Entwicklung hin zu einer stärker regenerativ basierten Energieversorgung mit zunehmenden Teilen an lignozellulosebasierten Biokraftstoffen bis 2050 ([ILNAS, 2014] auf Basis [IEA, 2014b]),
- (iii) Annahmen zur Wirtschaftsentwicklung (USDA ERS, 2013), zum Bevölkerungswachstum (UNITED NATIONS, 2013), zum technischen Fortschritt und zur Preisentwicklung von fossilen Kraftstoffen (EUROPEAN COMMISSION, 2013) als Treiber der gesamten Ökonomie über die Zeit sowie
- (iv) den Fortbestand bzw. die Weiterentwicklung von Umweltstandards in Deutschland und der EU (z. B. Emissionsgrenzwerte, Nachhaltigkeitsstandards für Kraftstoffe, sowie Biodiversitätskonvention) und die Beibehaltung des CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandels mit steigenden Zertifikatpreisen (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

Rahmenannahmen wurden zudem für die künftig global verfügbaren Biomassepotenziale getroffen. Diese sind mit verschiedenen Unsicherheiten behaftet und werden in verschiedenen Studien daher sehr unterschiedlich abgeschätzt (vgl. u. a. THRÄN et al., 2013). Aktuelle Schätzungen des IPCC gehen – unter Einbeziehung der Flächenkonkurrenzen, Wasserverfügbarkeit und künftig zu erwartendem Klimawandel mit entsprechend negativen Effekten für landwirtschaftliche Erträge – weltweit bis 2050 zum Beispiel von einem Potenzialbereich von rund 100 bis 300 EJ an biogener Primärenergie aus (CHUM et al., 2011), wovon heute bereits etwa 50 EJ/a genutzt werden.

**Szenariengestaltung.** Für die künftige Bioenergiebereitstellung wurde der von (NITSCH et al., 2012) ermittelte Gesamteinsatz an Biomasse zur Energieversorgung von 1.550 PJ im Jahr 2050 zu Grunde gelegt. Dieser Wert liegt in der Größenordnung des aus internationalen Verfügbarkeiten anteilig ableitbaren Bioenergiepotenzials für Deutschland. Basierend auf dieser Mengenannahme wurde der Verwendungszweck (Strom / Wärme bzw. Kraftstoff) in den verschiedenen Szenarien variiert und keine sektorale Rohstoffbasisaufteilung angenommen. Neben abgeschätzten Beiträgen der reinen Wärmebereitstellung und Konzepten zur Reststoff- / Abfallverwertung wurden die Konversionspfade näher betrachtet, in denen prinzipiell ein nennenswerter Umwandlungsbeitrag in Deutschland erfolgen kann und die dauerhaft relevant sind und Innovationspotenziale besitzen, womit z. B. die Mitverbrennung von Biomasse in Kohlekraftwerken als wenig zukunftssichere Option ausscheidet (Tabelle 1-1).

Es wurde angenommen, dass die vorrangige Verwendung von Rest- und Abfallstoffen zur Stromerzeugung politisch verankert wird. Ebenfalls wurde angenommen, dass die reine Wärmebereitstellung stark rückläufig ist und diese Brennstoffe statt dessen in den jeweils priorisierten Anwendungsfeldern (Kraftstoff bzw. Strom / Wärme) eingesetzt werden. Die Entwicklung von Anlagen zur Bioabfallvergärung, Güllekleinanlagen und reinen Wärmebereitstellung wurde daher nicht modelliert, sondern basierend auf Expertenwissen abgeschätzt.

Bei den übrigen betrachteten Technologien wurde eine potenziell globale Rohstoffversorgung immer dann näher untersucht, wenn die Rohstoffe oder Zwischenprodukte eine transportwürdige Energiedichte aufweisen (Pflanzenöle, Getreide, Holz). Für die Strombereitstellung werden 5.000 Jahresvolllaststunden pro Technologie angenommen, da unterstellt wird, dass der Strom nicht rund um die Uhr eingespeist wird, sondern verstärkt in Zeiten, wenn andere Erneuerbare Energien nicht zur Verfügung stehen.

Die Möglichkeiten von alternativen, nicht-biogenen flexiblen Strombereitstellungsoptionen (Power-to-Gas, Speicher) werden im Exkurs analysiert (siehe Anhang<sup>2</sup> A 1.1). Für die betrachteten flüssigen und gasförmigen Biokraftstoffe wurden zusätzliche Infrastrukturkosten, insbesondere für gasförmige Kraftstoffe, berücksichtigt. Weiterhin werden Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt, so dass es Entwicklungen hin zu einer global zunehmend vorsorgenden Flächenpolitik gibt, bei denen eine Ausweitung von Ackerland in sensible Gebiete wie Primärwälder oder Feuchtgebiete nicht mehr stattfindet.

Tabelle 1-1: 20 Konversionspfade im Vorhaben „Meilensteine 2030“

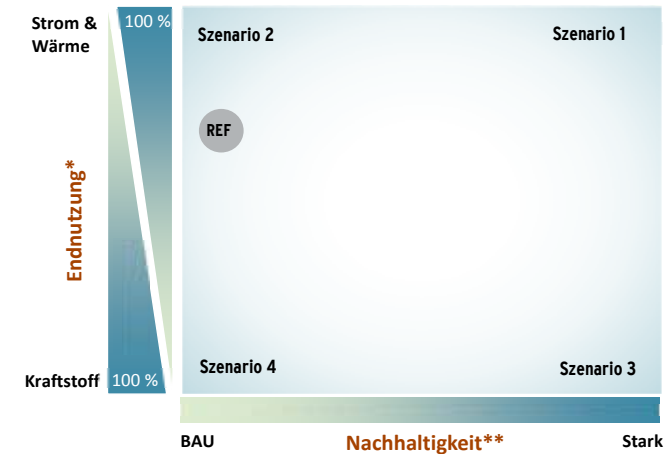
	Verbrennung	Anaerobe Vergärung	Fermentation	Umesterung	Hydro-processing	Vergasung	
Strom / Wärme (KWK)	Heizkraftwerk (ORC)	Biogasanlage		-		Kleinvergasung (KWK)	
	Heizkraftwerk (DT)	Biomethananlage					
	Pflanzenöl-BHKW	Güllekleinanlage*				Vergaser (ORC)	
Bioabfallanlage*							
Biokraftstoff		Biomethan	Ethanol (Zucker)		HVO (Raps)	Bio-SNG	
			Ethanol (Getreide)	Biodiesel (Raps)			BTL/Fischer-Tropsch-Kraftstoffe
			Ethanol (Stroh)				
Wärme	Einzelraumfeuerung (Scheitholz)*			-			
	Holzpelletkessel*						
	Heizwerk (HHS)*						

Abkürzungen: ORC: Organic Rankine Cycle; DT: Dampfturbine; HHS: Holzhackschnitzel; KWK: Kraft-Wärme-Kopplung; Bio-SNG: Bio synthetic natural gas (Methan aus biogenen Festbrennstoffen); BTL: Biomass to liquid; HVO: Hydrogenated Vegetable Oil

\*künftiger Beitrag im Energiesystem basierend auf Expertenschätzungen im Projektverbund festgelegt

In Summe werden vier Szenarien (KS-BAU, KS-N, SW-BAU, SW-N) betrachtet, die Extremwelten darstellen (Abb. 1-1). Betrachtet werden neben unterschiedlichen Annahmen zu Nachhaltigkeitsanforderungen auch unterschiedliche Versorgungsprioritäten der Bioenergie. So wird Biomasse einmal prioritär zur Kraftstoffbereitstellung und einmal zur Strom-Wärme-Bereitstellung genutzt.

<sup>2</sup> Ergänzende Ergebnisübersichten und Informationen zu Methodik und Annahmen stehen zum Download zur Verfügung unter: <https://www.energetische-biomassennutzung.de/de/meilensteine-2030/ergebnisse.html>



\*Die im Modellverbund berücksichtigte Biomasse wird in Deutschland entweder nahezu vollständig zur Produktion von Strom / Wärme oder Kraftstoffen eingesetzt. (REF stellt den Ausgangspunkt für die Szenarienbetrachtungen dar); \*\* Intensität von Umweltauflagen und vorsorgende Flächenpolitik sowohl in Deutschland wie auch international (Vorketten und Importe); Abkürzungen: SW: (gekoppelte) Strom- und Wärmebereitstellung; KS: Kraftstoff; BAU: Business as usual; N: hohe Nachhaltigkeitsanforderungen

Abbildung 1-1: Die vier Szenarien (KS-BAU, KS-N, SW-BAU, SW-N) im Projekt „Meilensteine 2030“

Die Szenarienberechnung erfolgt mit den Modellen MAGNET, LandSHIFT, BENSIM und weiteren Modulen zur Folgenabschätzung, die zu diesem Zweck teilweise in neuartiger Weise gekoppelt wurden.

**Ergebnisqualität.** Für die Modellierungen wurden verschiedene Parameter auf Basis von bestehenden Studien und Expertenwissen festgelegt. Jeder dieser Parameter kann mit Unsicherheiten behaftet sein. Dies wird bei der Ergebnisinterpretation berücksichtigt. Weiterhin hat sich die Diskussion um die Energiewende allgemein und um Bioenergie im Speziellen in den letzten fünf Jahren sehr stark verändert. Die grundlegenden Erwartungen, die die Basis für dieses Forschungsvorhaben bildeten, sind daher teilweise nicht mehr diskussionsbestimmend. Dies unterstreicht jedoch besonders die Notwendigkeit robuster Entwicklungsoptionen.

Die Szenarienergebnisse zeigen potenzielle Entwicklungspfade auf, die sich unter den angenommenen Rahmenbedingungen als ökonomisch vorteilhaft erweisen. Die Szenarienannahmen sind Extremannahmen (z. B. vollständige Erschließung des verfügbaren Biomassepotenzials und Einsatz nur für Kraftstoffe oder nur für Strom / Wärme). Die Ergebnisse sind daher vor allem relativ, also im Vergleich zueinander, zu interpretieren. Sie sind ein notwendiges Werkzeug für die Ableitung von Schlussfolgerungen (Kap. 1.3) und Handlungsempfehlungen (Kap. 1.4), aber keine Handlungsempfehlung an sich.



## 1.2 Ergebnisse

### 1.2.1 Technologieentwicklung

**Technologiepotenzial.** Das Potenzial für eine Technologie, erfolgreich im Markt eingeführt zu werden, wird aus der Höhe der erwarteten Bereitstellungskosten unterschiedlicher Alternativen abgeleitet. Die Bereitstellungskosten für die unterschiedlichen Technologien werden in BENSIM modelliert und sind durch die Entwicklung der Rohstoffpreise und Nebenprodukterlöse sowie die Lernraten bestimmt. Die Entwicklung des Anlagenparks zu einer zielgerichteten Biomassenutzung ist im Modell durch jährlichen Anlagenzu- und -abbau abgebildet.

**Aussichtsreiche Technologiepfade.** Die Bereitstellung von Bioenergie aus Reststoffen ist ausbaufähig aber begrenzt. Für forst- und agrarbasierte Bioenergieträger ergeben sich in den BAU-Szenarien – unter Berücksichtigung der modellierten Agrarpreisentwicklungen (siehe Ergebnisse Rohstoffbasis) – Kostenvorteile für pflanzenölbasierte Bioenergieformen, gefolgt von Biogas / Biomethan. Verstärkte Nachhaltigkeitsanforderungen kehren diese Vorteilhaftigkeit um. Bioenergieformen, die auf Basis von Biomassevergasung (Holz) oder aus Rest- und Abfallstoffen bereitgestellt werden, setzen sich erst mittel- bis langfristig und unter hohen Nachhaltigkeitsanforderungen durch. Diese Präferenzen können in der Praxis verschoben werden, wenn

- einzelne Energieträger durch die gegebenen oder künftigen Randbedingungen nicht mehr zulässig sind (z. B. Biodiesel auf Pflanzenölbasis) oder
- einzelne Energieträger zusätzliche Qualitäten aufweisen, die für bestimmte Anwendungsfelder zwingend notwendig sind, und daher entsprechend umfassend und dauerhaft forciert werden (z. B. Biokerosin als Flugkraftstoff). Die Reihung der Vorteilhaftigkeit, insbesondere der Rohstoffe, findet sich sowohl in den Strom- als auch in den Kraftstoffszenarien; die identifizierten Biobrennstoffoptionen sind damit sektorübergreifend relevant.

**Einflussfaktoren.** In den Sensitivitätsanalysen wurden zusätzlich folgende Einflussfaktoren ermittelt:

- Wenn die Preissteigerungen für Holzrohstoffe in den kommenden Jahrzehnten deutlich unter denen von Agrarrohstoffen bleiben, können vergasungsbasierte Bioenergieträger konkurrenzfähig werden, jedoch in erster Linie nicht synthetische Kraftstoffe (BtL, z. B. FT-Kerosin), sondern, eine entsprechende Nachfrage vorausgesetzt, Bio-SNG.
- Wenn die Konversionsanlagen zur Strombereitstellung künftig einer zunehmend flexiblen Fahrweise unterworfen sind, ergeben sich wegen vergleichsweise geringerer Investitionsaufwendungen Kostenvorteile für biogas- und pflanzenölbasierte Bioenergieträger.

- Wenn die Erlöse für Nebenprodukte künftig erhöht werden können, ergeben sich weitere Vorteile für pflanzenölbasierte Bioenergieträger und für KWK-Optionen mit hoher Wärmenutzung in den Stromszenarien.
- CO<sub>2</sub>-Preise haben nur einen geringen Effekt, weil sich die Treibhausgasemissionen der gewählten Modellfälle innerhalb der Konversions- und Nutzungspfade nur geringfügig unterscheiden.

**Weitere wichtige Faktoren für die Ableitung von Meilensteinen.** Der Wärmebereich wurde mit dem verwendeten Modellansatz nur am Rande betrachtet – hier dürften jedoch insbesondere holzbasierte Verbrennungstechnologien Kostenvorteile bieten. Nicht explizit im Technologiewettbewerb berücksichtigt wurde die Konversionsroute „Bioethanol aus Zuckerrohr“, die als Importoption große Kostenvorteile bringen kann, wenn die Zölle entsprechend gestaltet werden. Ebenso nicht betrachtet wurde die Mitverbrennung von Holzbrennstoffen in Kohlekraftwerken, für die bei CO<sub>2</sub>-Zertifikatpreisen ab etwa 30 Euro pro Tonne der Markteintritt erwartet wird (vgl. VOGEL et al., 2011). Alle drei Konversionsrouten können die Energiebereitstellung aus Biomasse bei gegebenen Randbedingungen deutlich dominieren und werden daher bei der Gesamtbewertung entsprechend diskutiert.

### 1.2.2 Rohstoffbasis

**Globale und nationale Agrarmärkte.** Das Modell MAGNET liefert weltweite Mengen- und Preisentwicklungen für landwirtschaftliche Produkte. Dabei wird der gesamtökonomische Kontext berücksichtigt. Der Agrarmarkt ist und bleibt vor allem dominiert von der zunehmenden globalen Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermitteln. Bioenergie spielt dabei für bestimmte Kulturen, insbesondere Ölsaaten, auch eine Rolle. Die Nachfrage nach Biodiesel in Deutschland induziert Pflanzenölimporte. Fällt diese Nachfrage, nehmen die Pflanzenölimporte nach Deutschland im Zeitverlauf eher ab als zu und die Produktion von Ölsaaten in Deutschland steigt im Zeitverlauf sehr viel geringer an als in einem Szenario mit hoher Biodieselnachfrage. Stark steigende Bodenpreise machen deutlich, dass Boden zunehmend zum begrenzenden Faktor der Agrarproduktion wird. Die Preise für Agrarprodukte steigen insbesondere in den Nachhaltigkeitsszenarien, in denen weniger Fläche für die Produktion zur Verfügung steht. Die Flächenbegrenzungen und die steigenden Agrarpreise stimulieren den technischen Fortschritt im Ackerbau und führen zu höheren Flächenerträgen sowie Intensivierung der Produktion auf den verbleibenden Flächen.

In Sensitivitätsuntersuchungen wurde gezeigt, dass eine Variation des künftigen Bruttoinlandsproduktes (BIP) um +10 % deutlich stärkere Auswirkungen als eine Variation der globalen Biokraftstoffnachfrage um +20 % hat. Ersteres beeinflusst die Preise stärker als die Produktion, dahingegen hat Letzteres fast ausschließlich Auswirkungen auf die Produktion.

**Holzrohstoffe.** Die Preisentwicklung für Holz wurde in MAGNET nicht dargestellt, sondern es wurden basierend auf Expertenschätzungen Preissteigerungsannahmen getroffen (diese liegen in der Größenordnung der Weizenpreisentwicklungen). Gleichzeitig wurde der erwartete Holzbedarf aus internationalen Kraftstoffszenarien in Form von zusätzlichen Anbauflächen für Kurzumtriebsholz berücksichtigt. Die fehlende Kopplung der Preise für



Agrar- und Forstrohstoffe stellt eine erhebliche Unsicherheit dar, die jedoch trotzdem die Erzeugung eines Gesamtbildes erlaubt. Der Effekt einer zunehmenden stofflichen Holznutzung wurde abgeschätzt und zeigt einen deutlichen nationalen Bezug und keine substantiellen Veränderungen in der Verfügbarkeit von Holz für die energetische Nutzung, da die Verbesserung der stofflichen Nutzung hier in erster Linie eine Verlängerung der Wertschöpfungskette mit erhöhtem Kaskadenfaktor darstellt.

**Weitere wichtige Faktoren für die Ableitung von Meilensteinen.** Wenn man berücksichtigt, dass unter den getroffenen Annahmen im Wettbewerb der Technologien in Deutschland Holz kaum zur gekoppelten Strom- / Wärme- bzw. zur Kraftstoffbereitstellung nachgefragt wird, ergibt sich auch im internationalen Kontext die Frage, wie die vielfach erwarteten holzbasierten Kraftstoffe den Markteintritt erreichen sollen.

### 1.2.3 Flächenbedarf

**Flächenbedarf global.** Die Modellergebnisse aus MAGNET werden mit dem Modell LandSHIFT in Flächenbelegungen übersetzt. Dabei wird der Flächenbedarf für die Produktion sämtlicher Agrarrohstoffe (Nahrungsmittel, Futtermittel, Nachwachsende Rohstoffe für die stoffliche sowie energetische Nutzung) berücksichtigt. Als Eingangsparameter für die Modellierungen wurden basierend auf externen Quellen (IINAS, 2014) die Anteile von 2.-Generation-Kraftstoffen aus Energiegräsern und Kurzumtriebsplantagen berücksichtigt und regional disaggregiert sowie die Daten für regionalisierte Erträge von Lignozellulose-Pflanzen für diese Kraftstoffe und die jeweilige Konversionseffizienz vorgegeben. In allen betrachteten Entwicklungen steigt der globale Flächenbedarf für die Produktion von Ackerfrüchten an, von 1,4 Mrd. ha in 2007 auf ~2,4 Mrd. ha in den Nachhaltigkeitsszenarien bzw. ~2,8 Mrd. ha in den BAU-Szenarien in 2050. Zunehmende globale Nahrungs- und Futtermittelproduktion stellen hierfür die Hauptursachen dar. Signifikante Unterschiede zwischen den Kraftstoff- und den Strom- / Wärme-Szenarien sind bei der weltweiten Entwicklung nicht festzustellen, da die Differenzierung nur für die Bioenergie in Deutschland greift. In den BAU-Szenarien ist die starke ackerbauliche Ausdehnung insbesondere in Brasilien, im Südwesten von Russland sowie in Südostasien zu erkennen. In den Nachhaltigkeitsszenarien führt ein geringerer Bedarf an Ackerland in Kombination mit wirkungsvollen Schutzmechanismen für natürliche Ökosysteme (u. a. Primärwälder und Naturschutzgebiete) zu einem geringeren Verlust an natürlicher Vegetation: Während in den BAU-Szenarien bis 2050 fast 300 Mio. ha der in 2007 existierenden 4,32 Mrd. ha Waldfläche abgeholzt werden, kann dieser Trend in den Nachhaltigkeitsszenarien weitestgehend gestoppt werden. Gleichzeitig lässt sich eine Verlagerung von Landnutzungsänderungen in andere, nicht explizit geschützte Ökosysteme verzeichnen, sodass die globale Fläche von Gras- und Buschlandökosystemen von 5,49 Mrd. km<sup>2</sup> in 2007 auf 4,65 Mrd. km<sup>2</sup> in den Nachhaltigkeitsszenarien bzw. 4,72 Mrd. km<sup>2</sup> in den BAU-Szenarien in 2050 abnimmt.

**Flächenbedarf national.** Die Flächen für die Agrarproduktion in Deutschland steigen von 9,35 Mio. ha in 2007 in den Kraftstoffszenarien auf 11,46 Mio. ha (BAU) bzw. 10,04 Mio. ha (Nachhaltig) und in den Strom- / Wärme-Szenarien auf 11,72 Mio. ha (BAU) bzw. 11,35 Mio. ha (Nachhaltig) in 2050 an. Die Nutzung von Grünland als Weidefläche entwickelt sich gegenläufig und sinkt von 6,96 Mio. ha in 2007 in den Kraftstoffszenarien bis

2050 auf 4,91 Mio. ha (BAU) bzw. 6,34 Mio. ha (Nachhaltig) und in den Strom- / Wärme-Szenarien bis 2050 auf 4,65 Mio. ha (BAU) bzw. 5,02 Mio. ha (Nachhaltig). Bedingt durch ein explizites Umbruchverbot nach 2020 wird in den Nachhaltigkeitsszenarien ab diesem Zeitpunkt kein zusätzliches Grünland mehr in Ackerfläche umgewandelt.

In den Strom- / Wärme-Szenarien findet bis 2030 eine stärkere Zunahme der Ackerfläche als in den Kraftstoff-Szenarien statt. Danach wird in den Strom- / Wärme-Szenarien für einen Rückgang des Bedarfs nach Anbauflächen für die Produktion von Energiepflanzen frei werdendes Ackerland für Weidewirtschaft nutzbar (da dann kein weiterer Zubau, sondern nur noch ein Umbau im Technologiepark unterstellt ist). In den Kraftstoffszenarien nimmt Ackerland (durch die höhere Priorisierung in LandSHIFT) auf Kosten von Grünland im BAU-Szenario bis 2050 weiter zu. Flächen mit naturnaher Vegetation (Grasland / Buschland) werden bis 2030 in geringem Umfang von 0,06 Mio. ha umgewandelt. Noch vorhandene Waldflächen stehen unter Schutz und werden nicht umgewandelt.

Bei allen Betrachtungen ist zu berücksichtigen, dass es sich um die Analyse von Extremszenarien handelt. Durch die starken Präferenzen für Bereitstellungsstrukturen aus landwirtschaftlichen Rohstoffen gehen die in den Extremszenarien ermittelten Flächenbedarfe über die Bedarfe hinaus, die in den als Ausgangsbasis verwendeten Energieszenarien angenommen werden. So entspricht die Gesamtsumme der für Biokraftstoffe in Deutschland und im Ausland direkt oder indirekt belegten Anbauflächen in den BAU-Szenarien in etwa der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche Deutschlands, d. h. zusammen mit den Anbauflächen für Nahrungs- und Futtermittel würde sich Deutschlands Flächenfußabdruck massiv vergrößern. In den nachhaltigen Szenarien ist der Flächenbedarf aufgrund der höheren Flächeneffizienz von Biogas / Biomethan mit ca. 4 Mio. ha deutlich geringer. Die auf diese Weise erzielten Ergebnisse werden hinsichtlich der Umweltwirkungen, Ernährungssicherheit und regionalen Einbindung bewertet. Auch dabei ergeben sich sehr deutliche Ergebnisse, die im Folgenden dargestellt werden.

### 1.2.4 Kumulierte Umweltauswirkungen

**Bewertungsansatz.** Die Grundlage der Bewertung der Umweltwirkungen für die vier Szenarien bildet die in BENSIM ermittelte Endenergiemenge aller Bioenergietechnologien. Diese wird zusammen mit den Umweltwirkungen der im jeweiligen Jahr noch verbleibenden fossilen Energien dargestellt. Es wurde angesetzt, dass Biomasse im Energiesystem ausschließlich fossile Energieträger ersetzt, nicht jedoch andere erneuerbare Energieträger. Letztere wurden gemäß (NITSCH et al., 2012) fortgeschrieben. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Ansätze, wie viel Gesamtenergie für die Auswertung zugrunde gelegt wird, und damit, wie groß die dargestellte Menge fossiler Energien ist. Zur Darstellung im Systemvergleich wird die Endenergie zugrunde gelegt, die in Deutschland gemäß (NITSCH et al., 2012) über fossile oder biogene Energieträger abgedeckt wird. Für den Technologievergleich und die Abschätzung der Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderungen wird dagegen eine einheitliche Endenergiemenge für alle Szenarien und Zeitpunkte festgelegt, nämlich die in jedem Sektor über alle Jahre maximal verfügbare Bioenergie. Die bilanzierte fossile Energiemenge ergibt sich dann als Differenz aus dieser maximalen Bioenergie und der Bioenergiemenge des jeweiligen Jahres und Szenarios. Diese Festlegung wird im Folgenden als Nutzenkorb bezeichnet. Dadurch werden die Ergebnisse zwischen den unterschiedlichen Szenarien und Zeitpunkten vergleichbar.

Neben der Endenergiemenge werden auch die BENSIM-Ergebnisse zu Anlagenpark, -anzahl und -kapazität sowie die jährliche Produktionsmenge herangezogen und mit so genannten Übersichtsökobilanzen kombiniert, welche in enger Anlehnung an die Ökobilanznormen ISO 14040/14044 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. 2006) für die einzelnen Technologien erstellt wurden. Daraus ergeben sich dann die kumulierten Umweltwirkungen (Energieaufwand, Treibhauseffekt, Versauerung, Nährstoffeintrag und Feinstaubbelastung) für die vier Szenarien. Beim Treibhauseffekt wird zusätzlich auch auf LandSHIFT-Ergebnisse zu Kohlenstoff-Bestandsänderungen infolge von Landnutzungsänderungen zurückgegriffen.

**Technologievergleich.** Die Analyse der Umweltwirkungen im Technologievergleich zeigt, dass der Energieaufwand bei normiertem Endenergiebedarf (Nutzenkorbansatz) in allen Szenarien über die Jahre sinkt. Wesentlich zu diesem Rückgang tragen die immer weniger eingesetzten fossilen Energieträger bei. Auch beim Treibhauseffekt gehen die Emissionen aus demselben Grund über die Jahre zurück, allerdings schlagen hier zusätzliche Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderungen deutlich zu Buche (siehe unten). Insbesondere bei Berücksichtigung indirekter Effekte in den Kraftstoffsznarien besteht das Risiko, dass die Gesamt-Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2025 bis 2040 geringfügig sinken und im Fall ungünstiger Randbedingungen trotz Bioenergieeinsatz sogar konstant bleiben. Der größte Rückgang ist beim Treibhauseffekt im Szenario Strom- / Wärme-Nachhaltig zu erkennen. Bei der Versauerung hingegen ist der Rückgang in den drei anderen Szenarien am größten, d. h. es liegt ein Zielkonflikt vor. Der Nährstoffeintrag zeigt keine Tendenz zu fallen, sondern steigt in einigen Szenarien sogar leicht an. Aufgrund dieser Konstellation kann man aus wissenschaftlich-objektiver Sicht keinem Szenario den Vorzug geben. Erst wenn subjektive Kriterien einfließen, lässt sich eine Bewertung vornehmen. Wenn beispielsweise der Verringerung der Treibhausgasemissionen der absolute Vorrang gegeben werden soll, so sind die Strom- / Wärme-Szenarien und davon insbesondere das Strom- / Wärme-Nachhaltig-Szenario vorzuziehen.

**Landnutzungseffekte.** Im Modell LandSHIFT werden alle Landnutzungsänderungen dargestellt, die sich durch die künftige Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermitteln, stofflicher Nutzung und Bioenergie ergeben. Sie haben Auswirkungen auf die kumulierten Treibhausgasemissionen, aber auch auf die Biologische Vielfalt und Bodenqualität (siehe Kap 1.2.5). Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderungen resultieren aus Kohlenstoffbestandsänderungen, sind – insbesondere infolge der indirekten Effekte – in der Ermittlung komplex und haben einen starken Einfluss auf die Treibhausgasbilanz der energetischen Biomassennutzung. Daher wurde der Effekt der mit Landnutzungsänderungen verbundenen Treibhausgasemissionen auf die Szenarien mit zwei Methoden abgeschätzt: zum einen wurden die zusätzlichen Treibhausgase auf Basis der LandSHIFT-Modellergebnisse zur globalen Landnutzung berechnet (LUC-Ansatz). Zum anderen wurden für die Kraftstoffsznarien zusätzlich die Effekte auf Basis der gegenwärtig auf europäischer Ebene diskutierten iLUC-Faktoren berücksichtigt, woraus deutlich höhere landnutzungsbedingte Emissionen resultieren. Die sich ergebene Ergebnisspanne unterstreicht den Forschungsbedarf im Bereich der Bewertung von Landnutzungsänderungen. Sie zeigt, dass Treibhausgasemissionen durch Landnutzungsänderungen teilweise noch einmal so hoch oder höher sein können als die Emissionen, die durch den Anbau, Bereitstellung und Nutzung der Bioenergeträger entstehen. Treibhausgasemissionen durch Landnutzungsänderungen werden

überwiegend im nichteuropäischen Ausland freigesetzt, in den BAU-Szenarien durch den direkten Import von Biomasse, in den Nachhaltigkeitsszenarien eher durch indirekte Effekte eines verstärkten Energiepflanzenanbaus in Deutschland (siehe Abschnitt 1.2.3).

**Weitere wichtige Faktoren für die Ableitung von Meilensteinen.** Da die pflanzenölbasierten Energieträger insbesondere im BAU-Szenario einen großen Stellenwert haben, ist ihre künftige Konformität mit den geforderten Treibhausgasminderungsbeiträgen in der Erneuerbaren-Energien-Direktive 2009/28/EG (RED) ein wichtiger, gegenwärtig nicht zweifelsfrei abschätzbarer Punkt. Daher wurde auch untersucht, wie sich die Umweltwirkungen verändern, wenn bei „business as usual“ im Kraftstoffsznario keine Ölsaaten und Weizen für die Kraftstoffproduktion in Deutschland mehr verwendet werden und im Strom- / Wärme-Szenario Pflanzenöl-BHKWs auch in Zukunft keinen Implementierungsimpuls erhalten. Die damit verbundenen Unterschiede sind relativ gering; durch den Wechsel von Biodiesel / Pflanzenöl zu Biogas / Biomethan kommt es bei nahezu konstantem Treibhauseffekt 2050 zu einer Erhöhung der Versauerung und einer Verminderung der Feinstaubbelastung.

### 1.2.5 Auswirkungen auf Biodiversität und Bodenqualität

**Indikatoren.** Zur Analyse der Risiken für die Biologische Vielfalt und Boden wurden die Anbaumuster in den Jahren 2030 und 2050 mit dem Anbaumuster im Jahr 2007 verglichen. Flächen, die bereits im Jahr 2007 Ackerland oder Brache waren, werden für die Nutzung als Flächen mit geringen Risiken für die Biologische Vielfalt eingestuft. Für zuvor ungenutztes Grünland, Wälder, Feuchtgebiete und Torfmoor wird das Risiko als mittel und für Schutzgebiete sowie Primärwälder als hoch eingeschätzt. Die Risiken bei einer Umwandlung von genutztem Grünland sind je Land zu diskutieren. Zur Bewertung der Auswirkung des Anbaus auf Böden wird die Bodeneignungskarte des Internationalen Instituts für Angewandte Systemanalyse (IIASA) verwendet. Die IIASA Kategorien 1 bis 4 werden als Böden mit guter Eignung für eine landwirtschaftliche Nutzung zusammengefasst. Den IIASA-Kategorien 5 und 6 kommt eine mittlere Eignung für die landwirtschaftliche Nutzung zu. Hingegen sind die IIASA-Kategorien 7 und 8 nur schlecht für eine landwirtschaftliche Nutzung geeignet. Für eine Bewertung der Flächen wird angenommen, dass eine schlechte Eignung für die landwirtschaftliche Nutzung in der Regel auch mit höheren Risiken für den Boden einhergeht.

**Globale Biodiversitätsrisiken.** Die globale Auswertung zeigt, dass in den BAU (business-as-usual)-Szenarien im Jahr 2030 die globale Anbaufläche von Rohstoffen, die als Bioenergiesubstrate geeignet sind, bei ca. 1.350 Mio. ha liegt. Dabei sind 80 % der Anbaufläche zu Flächen mit niedrigen Risiken für die Biologische Vielfalt einzustufen. Die im Jahr 2030 neu erschlossenen Anbauflächen liegen vor allem auf ehemaligen Grünlandflächen. Weitere Flächen mit mittlerem und hohem Risiko für die Biologische Vielfalt werden kaum neu erschlossen. Bis ins Jahr 2050 steigt in diesen Szenarien die globale Anbaufläche der genannten Rohstoffe auf gut 1.850 Mio. ha an. Dabei nehmen Flächen mit geringem Risiko für die Biologische Vielfalt ab, wohingegen Grünland – und zu einem kleineren Anteil auch Waldflächen (mittleres Risiko für die Biologische Vielfalt) – deutlich zunehmen. Flächen mit hohem Risiko für die Biologische Vielfalt werden auch im Jahr 2050 kaum in Nutzung genommen.

In den Nachhaltigkeitsszenarien reduziert sich die globale Anbaufläche von Rohstoffen,

die als Bioenergiesubstrate geeignet sind, auf gut 1.100 Mio. ha im Jahr 2030 und auf ca. 1.650 Mio. ha im Jahr 2050. Durch den strikten Ausschluss von sensiblen Flächen nach dem Jahr 2020 werden neue Anbauflächen vor allem auf Grünland erschlossen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass je Land ein Anteil von mindestens 17 % der Landesfläche und damit auch Grünland nach 2020 unter Schutz gestellt wird, so dass zumindest ein gewisser Anteil an Grünland mit großer biologischer Vielfalt nicht umgebrochen wird. Die Nachhaltigkeitsszenarien gehen einher mit einer stärkeren Intensivierung, die für die Biodiversität als weniger sensibel eingeschätzt wird als eine Umwandlung ungenutzter Flächen. In dem Szenario Kraftstoffe-BAU im Jahr 2030 und 2050 sowie im Szenario Kraftstoffe-Nachhaltig im Jahr 2030 wird ein kleiner Anteil an Rohstoffen in Deutschland mit einer Flächenbelegung von unter zwei Mio. ha produziert. Hinzu kommen Flächenbelegungen im Ausland von 10 bis 12 Mio. ha. Im Ausland ist mit deutlichen Flächenumwandlungen zu rechnen, die vor allem auf ungenutztes Grünland und in kleinerem Umfang auf genutztes Grünland entfallen.

**Nationale Biodiversitätsrisiken.** Der Anbau von Bioenergie in Deutschland findet zu einem großen Anteil auf Flächen statt, die mit einem geringen Risiko für die Biologische Vielfalt verbunden sind. Es tritt aber in Deutschland ein deutlicher Umbruch von Grünland mit entsprechenden Risiken für die Biologische Vielfalt auf. Im Jahr 2050 im Szenario Kraftstoffe-Nachhaltig wird neben geringen Mengen Stroh-Ethanol fast ausschließlich Anbaubiomasse aus Deutschland in Form von Methan als Kraftstoff eingesetzt. Hierzu werden knapp vier Mio. ha belegt. Für diese Flächen wird zu einem großen Teil ein geringes Risiko angenommen, eine Umwandlung von sensiblem Grünland kann aber nicht ausgeschlossen werden. Zudem ist festzuhalten, dass diese hohe Flächenbelegung mit Biogassubstraten dazu führt, dass andere Agrarprodukte in geringerem Umfang angebaut – also verdrängt – und teilweise substituiert werden. Wenn man mögliche resultierende indirekte Landnutzungsänderungen am Beispiel von Weizen abschätzt, dann ist in Summe eine Versorgung mit Biomethan weniger flächenintensiv als eine von Pflanzenöl dominierte Versorgung.

**Bodenqualität.** Bezogen auf die Bodenqualität findet die zusätzliche Flächeninanspruchnahme über alle Szenarien und Zeitscheiben hinweg etwa 56 % der Anbauflächen auf Böden mit einer guten landwirtschaftlichen Eignung. Etwa 27 % der Anbau findet auf Böden mit einer mittleren und ca. 17 % auf Böden mit einer schlechten landwirtschaftlichen Eignung statt. Dies bedeutet, dass mit einem generellen Anstieg der Risiken für Böden durch den generellen Anstieg der Flächennutzung zu rechnen ist. Für Biogas-Flächen in Deutschland ist keine Einstufung möglich.

### 1.2.6 Ernährungssicherheit

Mindestens 2.300 kcal pro Tag und Person sind notwendig, um eine gesunde Versorgung zu gewährleisten. Dabei wurde in dem Model zur Ernährungssicherheit ein Mindestanteil von 10 % tierischer Nahrung zu 90 % pflanzlicher Nahrung angesetzt. Unter der Maßgabe, dass Nahrungsmittelsicherheit stets Vorrang hat, ist die Inanspruchnahme von landwirtschaftlichen Flächen u. a. für energetische Zwecke davon abhängig, in welchem Umfang Biomasse bis zum Erreichen einer weltweiten sicheren und gesunden Ernährung benötigt wird. Die Modellierung der Nahrungssicherheit hat gezeigt, dass im Jahr 2010 die fehlenden Kalorienmengen zur Gewährleistung der Minimumanforderungen für eine gesunde Er-

nährung weniger als 40 % der Menge an Bioenergie entspricht, die von den 20 % reichsten Ländern nachgefragt werden. Durch die generell positive Entwicklung in armen Ländern hin zu höheren Pro-Kopf-Einkommen sinkt dieser Anteil bis im Jahr 2050 auf 7 %. Die Ergebnisse dieses theoretischen Ansatzes überraschen dahingehend, dass rein rechnerisch – ohne die Betrachtung von Zugang und Verteilung von Nahrung – langfristig gesehen reiche Länder ihre Nachfrage nach Bioenergie um nur ca. 7 % reduzieren müssten, um den Kalorienbedarf in Hungerländern theoretisch decken zu können. Allerdings muss bei der Bewertung der Ergebnisse auch bedacht werden, dass Flächenverfügbarkeit neben der Bioenergienachfrage weitere Betrachtungsebenen enthält, z. B. die Änderung der Konsumgewohnheiten im Hinblick auf den Verzehr von Fleisch- und Milchprodukten kann Flächen respektive Anbaubiomasse für andere Nutzungen bzw. Nachfragen verfügbar machen.

### 1.2.7 Regionale Infrastruktur

Aus regionaler Sicht ist die Einbindung der Szenarien in die regionalen Gegebenheiten darstellbar, weil v. a. kleinskalige Technologien Ergebnisse der Modellierung waren. Hinsichtlich der Energieabnahme ergeben sich aber deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien:

- In den Strom- / Wärme-Szenarien wird durch die hohe Anzahl kleiner Anlagen eine gute räumliche Aufteilung der KWK-Optionen ermöglicht. Energiebedarfsseitig wird das bestehende Strom- / Wärmesystem die berechneten Energiemengen aus regionaler Sicht aufnehmen können. Zwischen dem BAU- und dem Nachhaltig-Szenario ergeben sich für die Bereitstellung regionaler Wärme in Wärmeverbänden nur Auswirkungen bzgl. des Substratmixes und die Bereitstellungsketten der Biomasse. Existierende und zukünftige Nahwärmenetze dagegen können weiter mit ausreichend biogener Wärme rechnen.
- In den Kraftstoffszenarien dagegen fehlt die Option der KWK. Die regenerativen Wärmeziele der Bundesregierung müssten dann durch kalte Fernwärme (Solarthermie) oder fossile Energieträger erreicht werden. Ebenso ergeben sich auch bei Nah- und Fernwärmenetzen Herausforderungen, da diese heute v. a. auf Bioenergie setzen. Wärmenetze werden teilweise über 25 Jahre abgeschrieben. Durch das Auslaufen eines hohen Anteils der biogenen KWK bis ins Jahr 2030 wären heute gebaute Wärmenetze Lock-In Investitionen. Die fehlenden Strommengen im Kraftstoffszenario hätten zudem Auswirkungen auf die Möglichkeit, biogen erzeugten Strom als flexible Größe im Stromsystem zum Ausgleich der fluktuierenden Erneuerbaren Energien zu verwenden. Evtl. bedeutet dies, dass Mehrkosten für das Stromsystem entstehen. Auch müsste bei Eintreten der Kraftstoffszenarien die Auswirkungen des Rückbaus von biogenen KWK-Anlagen auf die Netzstabilität berücksichtigt werden. Aus Sicht der regionalen Einbettung ist damit die Erhaltung bestimmter Anteile von Bioenergie für die Strom- und Wärmebereitstellung als vorteilhaft zu bewerten.

Da Holzbrennstoffe in allen vier Szenarien nicht nennenswert nachgefragt werden, ergibt

sich die Frage, ob und in welchem Umfang es sinnvoll ist, hier bestehende Nutzungsstrukturen im Strom- und Wärmemarkt zu konterkarieren. Der Aufwand für die Etablierung neuer Holzvermarktungsmöglichkeiten wäre erheblich und können nur sehr langfristig erfolgreich realisiert werden (Aufbau neuer Märkte für Waldbesitzer, Diversifizierung der Holzwerkstoffindustrie etc.). Es müssen außerdem Lösungen zur alternativen Darstellung der Wärme- / Energieeinsparung forciert werden (z. B. Förderprogramme für Dämmung, Forcierung der Nutzung industrieller Abwärme).

### 1.2.8 Internationale Energiemärkte und Rückkopplungen

**Importpotenziale für Deutschland.** Da die Nachfrage nach Bioenergieträgern nicht nur für moderne Formen wie Kraftstoffe und Strom steigt, sondern auch die „traditionelle“ Nutzung von Biomasse für Kochen und Wärme vor allem in Entwicklungsländern, sind die für den internationalen Handel ggf. verfügbaren nachhaltigen Bioenergiepotenziale vor allem in Brasilien, Kanada, Russland und den USA zu finden, während Länder wie China und Südafrika zu Nettoimporteuren werden können (IINAS und CENBIO 2014).

Hinsichtlich der zu erwartenden Importpotenziale für Deutschland ist zu beachten, dass in einem globalen Klimaschutzszenario zur Erreichung des 2 °C-Ziels mit starker Nachhaltigkeit auch Länder wie Kanada, Russland und die USA die Bioenergie zur endogenen Substitution fossiler Energieträger einsetzen werden und damit künftig Exportpotenziale nur dann realisiert werden, wenn dies ökonomisch attraktiver als die nationale Nutzung ist. Parallel ist zu beachten, dass in Ländern wie Brasilien, Kanada, Russland und USA sowie in den ost- und westafrikanischen Ländern erhebliche Potenziale für andere Erneuerbare sowie zur Energieeffizienz bestehen, deren Nutzung je nach Szenario auch unter Einhaltung globaler Klimaziele zu Exportoptionen für Bioenergie führt.

Aus heutiger Sicht wird der globale Handel mit Bioenergie (fest insbesondere als Pellets, flüssig als Kraftstoffe) sich somit auf wenige Länder beschränken, deren Exportpotenzial bei steigenden Anstrengungen zum Klimaschutz sinken wird.

Der aus diesen Überlegungen zur generellen Biomasseverfügbarkeit ableitbare Importanteil für Deutschland liegt unter Berücksichtigung dieser und weiterer Restriktionen bis 2030 bei ca. 100 PJ an festen und 30 PJ an flüssigen Bioenergieträgern und steigt bis 2050 auf ca. 240 PJ an festen und 60 PJ an flüssigen Bioenergieträgern an. Hinzu kämen bis 2030 ca. 10 PJ und bis 2050 ca. 100 PJ an Biomethan aus Nicht-EU-Staaten in Mittel- und Osteuropa.

**Nachhaltigkeit.** Eine fundamentale Voraussetzung für die künftig global verfügbare Biomasse ist die Nachhaltigkeit ihrer Bereitstellung, die gegenwärtig auf unterschiedlichen Ebenen analysiert, operationalisiert und implementiert wird. Diese normative Setzung wird durch eine Vielzahl von Studien unterstützt (vgl. z. B. CORNELISSEN et al., 2012; DAUBER et al., 2012; GEA, 2012; IEA, 2012, 2012; IEA/OECD, 2012). Daher ist davon auszugehen, dass für den internationalen Handel mit Bioenergieträgern mittelfristig (bis 2030) verbindliche Nachhaltigkeitsanforderungen gestellt werden, die mindestens die Aspekte THG-Bilanz (Reduktion gegenüber Fossilen), Biodiversitätsschutz sowie soziale Fragen (Arbeitsschutz, Landrechte) betreffen. Entsprechende freiwillige Konzepte liegen mit den GBEP-Indikatoren (GLOBAL BIOENERGY PARTNERSHIP, GBEP, 2011) sowie den Voluntary Guidelines on the

sponsible Governance of Tenure of Land, Fisheries and Forests (COMMITTEE ON WORLD FOOD SECURITY, CFS 2012) bereits vor, und globale verbindliche Anforderungen wurden bereits für Biokraftstoffe entwickelt (FRANKE et al., 2013).

Aufgrund der steigenden Nutzung von Biomasse auch für die stoffliche Nutzung sowie in „gekoppelten“ Systemen wie Bioraffinerien werden zudem globalisierte Nachhaltigkeitsanforderungen für die rohstoffliche und energetische Biomassenutzung notwendig um negative Verdrängungseffekte zu vermeiden (Fritsche und Iriarte 2014).

**Versorgungssicherheit.** Zusätzlich stellt auch die Versorgungssicherheit von Energiesystemen eine wichtige Frage zur Bewertung dar. Für Bioenergie hat die GBEP eine Liste mit 24 Indikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit nationaler Bioenergiepolitiken vorgelegt. Darin ist der GBEP-Indikator 22 (Energy Diversity) eine vergleichsweise einfache Möglichkeit, den Aspekt „Versorgungssicherheit“ näherungsweise zu quantifizieren (GBEP 2011). Hierzu dient der sog. Herfindahl Index, der über die der Anteile von Energieträgern am Primärenergiebedarf bestimmt wird. Ausgehend von Daten aus BENSIM und Ergebnissen der Ökobilanzierung wurden die Daten zur biogenen Endenergiebereitstellung in die gesamte Primärenergiebilanz Deutschlands integriert und dann der Herfindahl Index berechnet. Die Meilensteine-Szenarien business-as-usual (BAU) und Nachhaltig (N), jeweils für Kraftstoffe (KS) und Strom / Wärme (SW), zeigen sehr unterschiedliche Effekte auf den fossilen Energieträgermix und damit auf die Versorgungssicherheit: Die KS-Szenarien erfordern deutlich weniger Erdöl (aber Biomasse-Importe), während in den SW-Szenarien weniger Kohle und Erdgas, dafür aber mehr Erdöl benötigt wird.

Die wesentlichen Unterschiede der Energie-Diversität bestehen zwischen den BAU- und N-Szenarien (jeweils ca. 3 %-Punkte), während die Unterschiede zwischen den N-Szenarien für KS und SW extrem gering sind. Gegenüber 2010 können die 2030-Szenarien die Energie Diversität um ca. 7 % (BAU) bzw. 10 % (N-Szenarien) verbessern. Damit stellt Bioenergie eine signifikante Möglichkeit dar, die Versorgungssicherheit in Deutschland zu erhöhen.

### 1.2.9 Die Effekte im Zeitverlauf

Durch die gewählten Modellansätze lassen sich in den verschiedenen Zeiträumen entlang der Bereitstellungskette unterschiedliche Trends feststellen (Tabelle 1-2).

So zeigt sich in den Szenarien, dass bis 2030 die gegenwärtig verbreiteten Technologien und Effekte einen hohen Stellenwert behalten, während sich nach 2030 die Szenarien stärker unterscheiden. Aus den unterschiedlichen Trends ergeben sich auch unterschiedliche Handlungsfelder in den verschiedenen Zeitbereichen. Hervorzuheben ist zudem die Tatsache, dass in den betrachteten Extremszenarien die Nutzung des Holzpotenzials mit innovativen Technologien nicht nennenswert zum Tragen kommt und stattdessen ein vergleichsweise hoher Bedarf an Ackerflächen modelliert wird. Dadurch wird zum einen eine sehr weitgehende Abschätzung der Risiken möglich, zum anderen jedoch auch deutlich, dass der gegenwärtige Einsatz von Holz im Wärmebereich eine sehr robuste Option darstellt und ein Umlenken auf eine stärkere energetische Holznutzung in den Strom- / Wärme- oder Kraftstoffbereich nur mit erheblichem Aufwand erreicht werden kann.



Tabelle 1-2: Übersicht über die Modellergebnisse im Zeitverlauf

	2010 - 2030	2030 - 2050
Nachfrage nach Biomasse weltweit	Kontinuierlich weiter steigende Nachfrage, vor allem zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion	
Flächen für die weltweite Biomasseproduktion	Zunehmende Biomasseproduktion auf bisher nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Umbruch von Grünland mit einem unterschiedlichem Risiko für die Biologische Vielfalt (für alle Verwendungen)	Flächeninanspruchnahme im BAU-Szenario stärker in sensiblen Gebieten (für Treibhausgasemissionen und Biodiversität, v. a. Wald und Grünland); im Nachhaltigkeits-szenario im geringeren Umfang (und nur Grünland) bei stärkerer Intensivierung der genutzten Flächen
Ackerflächennutzung in Deutschland	Konstanter Nutzungsumfang, allerdings bei unterschiedlichem internationalem Handelsausgleich. Anstieg des Grünlandumbruchs vor allem in den BAU-Szenarien	
Technologieentwicklung in Deutschland	Bioenergieanlagenbasieren auf Agrarrohstoffen (Pflanzenöl, Biogas) in allen Szenarien; für die Holznutzung ergibt sich bis 2030 keine neue Technologieperspektive	Die Bioenergieproduktion verändert sich langsam hin zu Biogas / Biomethan; holzbasierte Vergasungstechnologien können marktreif sein. Die Perspektive für holzbasierte Kraftstoffe bleibt begrenzt
Erwartete Holz-nachfrage zur energetischen Nutzung international (nicht modelliert)	Global wird eine große Nachfrage nach holzbasierten Festbrennstoffen z. B. zur Mitverbrennung in Kohlekraftwerken erwartet, wenn sich entsprechende CO <sub>2</sub> -Zertifikatpreise entwickeln	Global wird eine große Nachfrage nach holzbasierten, flüssigen Kraftstoffen erwartet, die sich jedoch aus den nationalen Technologiebetrachtungen nicht ergibt
Beitrag von Bioenergie im künftigen Energiesystem in Deutschland	Beitrag sowohl für Strom / Wärme als auch für Kraftstoff im Verkehrssektor erwartet	Beitrag zunehmend im Verkehrssektor, da für Strom / Wärme Alternativen bereitstehen
Treibhausgase der Bioenergiebereitstellung für die deutsche Energieversorgung	Sinken überwiegend; unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Szenarien aber nicht substanziell. Aufgrund von Landnutzungsänderungen besteht das Risiko, dass die Treibhausgasemissionen nur geringfügig sinken oder trotz Bioenergieeinsatz sogar konstant bleiben.	
Umwelteffekte der Bioenergiebereitstellung für die deutsche Energieversorgung	Hinsichtlich der Effekte auf Biologische Vielfalt und Boden wird die Bereitstellung von Bioenergeträgern aus der heimischen Landwirtschaft als besser handhabbar und risikoärmer als eine globale Rohstoff-bereitstellung eingestuft.	Da der Anlagenpark zunehmend auf Biogas / Biomethan werden die Rohstoffe vor allem aus der deutschen Landwirtschaft bereit gestellt und besser handhabbar und risikoärmer als eine globale Rohstoff-bereitstellung. Allerdings steigt in diesem Fall der Nährstoffeintrag und teilweise auch Versauerung und Feinstaubbelastung.
Ernährungssicherung	Mittlere Risiken für die Ernährungssicherung durch Bioenergie	Geringe Risiken für die Ernährungssicherung durch Bioenergie mehr feststellbar.

In Summe wird deutlich, dass mit einer moderaten und stärker an den heimischen Rohstoffen ausgerichteten Bioenergiepolitik – insbesondere vor der Notwendigkeit der Implementierung von internationalen Landnutzungspolitiken – bereits potenzielle Risiken deutlich reduziert werden können (bzw. konnten, Ausführungen zu den Veränderungen in der Bioenergiepolitik: siehe Kap. 1.1 und Kap. 2.1). Damit stehen im Zentrum einer künftigen Bioenergiestrategie vor allem Elemente der Qualitätsverbesserung und nicht so sehr die Frage nach der schnellen Erschließung des gemäß (NITSCH et al., 2012) verfügbaren, nachhaltigen Potenzials von 1.550 PJ Biomasse-Primärenergie in Deutschland.

### 1.3 Schlussfolgerungen

Bioenergeträger auf Basis von Agrarrohstoffen bleiben in allen Szenarien ökonomisch vorteilhaft.

Die Ergebnisse zeigen, dass die künftige Nutzung von Biomasse vor allem durch die Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermitteln geprägt ist. Eine nationale Bioenergiestrategie wird die internationalen Agrarrohstoffmärkte selbst bei hohen Importanteilen in den Mengen- und Preiseffekten nicht nennenswert beeinflussen. Dies gilt jedoch nur, solange andere Länder sich in ihren Bioenergiestrategien im Korridor der angenommenen internationalen Erwartungen entwickeln. Im Detail ergeben die Analysen mit dem Technologiemoell BEN-SIM, dass unter den erwarteten Preissteigerungen für Agrarprodukte<sup>3</sup> vor allem Pflanzenöl / Biodiesel gefolgt von Biogas / Biomethan die relativ vorteilhaften Energeträger für Konversionsanlagen<sup>4</sup> in Deutschland darstellen. Über die Modellergebnisse hinaus lassen sich die beiden technischen Systeme wie folgt charakterisieren:

Die Bereitstellung von **Pflanzenöl und Biodiesel** ist generell wie folgt gekennzeichnet:

- Der Rohstoff wird in hohem Maße importiert.
- Die Konversionstechnologie zur Herstellung und Nutzung des Pflanzenöls / Biodiesel ist Stand der Technik mit vergleichsweise wenig Innovationspotenzial.
- Die Konversionstechnologie zur Stromerzeugung ist bereits heute sehr gut für die flexible Strombereitstellung geeignet.
- Die Flächenerträge sind – abgesehen von Palmöl – relativ moderat, jedoch wird der Bioenergeträger in der Regel im Verbund mit Futtermittel (Presskuchen / Extraktionsschrot) und Glycerin (i. d. R. Pharmaglycerin) hergestellt, was preisstabilisierende Wirkung haben und z. B. vor dem Hintergrund Glycerin-basierter Nutzungspfade eine wichtige Übergangstechnologie darstellen kann. Die preisstabilisierende Wirkung kann Risiken von Rohstoffpreisschwankungen minimieren.

<sup>3</sup> Ergebnisse aus MAGNET für Weizen, Grobgetreide, Ölsaaten und Zuckerrohr / -rübe. Andere Rohstoffpreisentwicklungen wurden auf Basis von Expertenwissen abgeschätzt. Preisentwicklungen von Rest- und Abfallstoffen wurden im Modellverbund nicht näher untersucht.

<sup>4</sup> Im nationalen Kontext wurde eine Zunahme (etwa Verdreifachung) von Güllekleinanlagen und Bioabfallvergärungsanlagen mit einem steigenden Endenergiebeitrag, jedoch auf verhältnismäßig niedrigem Niveau, angenommen. Aufgrund vergleichsweise hoher Bereitstellungskosten ist hierfür eine stabile, politische Flankierung notwendig. Weitere Rest- und Abfallstoffe (insb. Gülle, aber auch Co-Substrate) sind teilweise in den modellierten Konzepten (z. B. Gülle bei Biogas- / Biomethananlagen) enthalten.

Bei **Biogas / Biomethan** hingegen stellt sich die Bereitstellung wie folgt dar:

- Der Rohstoff (Biogassubstrat) wird wegen der geringen Energiedichte in hohem Maße inländisch erzeugt, führt aber aufgrund der Transportunwürdigkeit des Substrats im Umkreis der Biogasanlagen zu einer langjährigen Flächenbindung. Internationaler Biogas- und Biomethanhandel z. B. über das Gasnetz könnte mittelfristig zusätzlich interessant werden (THRÄN et al., 2014).
- Die Konversionstechnologie verfügt kurzfristig über Innovationspotenzial in Richtung „Flexible Strombereitstellung“ sowie mittelfristig zur Gewinnung neuer Zwischenprodukte für die stofflich-energetische Nutzung, deren Erforschung teilweise noch in den Anfängen steckt.
- Die energetischen Flächenerträge sind deutlich höher, allerdings auf Kosten höherer Umweltwirkungen im Bereich Nährstoffeintrag und teilweise auch bei Versauerung und Feinstaubbelastung.
- Der Einsatz als Kraftstoff ist durch verschiedene Hemmnisse geprägt und wird voraussichtlich nur für ausgewählte Verkehrssektoren relevant.

**Abgestimmte internationale Landnutzungspolitik ist Voraussetzung für eine nachhaltige Bioenergiepolitik in Deutschland.**

Für die Bewertung der Rohstoffbasis ergeben sich insbesondere Unterschiede zwischen einer global verankerten nachhaltigen Landnutzungspolitik und dem Beibehalten der aktuellen Anforderungen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem ab dem Jahr 2020 angesetzten Ausschluss globaler Landnutzungsänderungen in Schutzgebieten und anderen sensiblen Gebieten die Effekte auf die Biologische Vielfalt und die Bodenqualität – insbesondere im globalen Kontext – deutlich geringer sind. Die Risiken für Biologische Vielfalt und Boden werden bei heimischer Biomasseproduktion im Vergleich zu Importen zwar als geringer eingeschätzt, jedoch konnten die indirekten Effekte, die aus der Verdrängung anderer Ackerkulturen durch Biogassubstrate resultieren, nur grob abgeschätzt werden (z. B. unter der vereinfachten Annahme, dass nur Weizen verdrängt wird) und könnten in der Realität anders ausfallen. Bei einem weiteren Ausbau der Bioenergie aus Energiepflanzen können Treibhausgasemissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen in der gleichen Größenordnung liegen wie die durch den Anbau, Bereitstellung und Nutzung von Bioenergieträgern bedingten Emissionen bzw. können diese übersteigen und beeinflussen das Gesamtergebnis signifikant. Zwar fallen auch hier bei einem ab 2020 global angesetzten Ausschluss von Landnutzungsänderungen in Wäldern, Torfmoorflächen und anderen sensiblen Gebieten die Treibhausgasemissionen nach 2020 geringer aus, allerdings ist der Effekt erst ab 2040 sichtbar, da die hohen Emissionen der Vorjahre (jeweils über 20 Jahre abgeschlossen) noch lange nachwirken.

Im Umkehrschluss heißt das: solange keine internationalen Standards zum Flächenschutz verfügbar sind, sollte die Inanspruchnahme neuer Flächen deutlich moderater ausgestaltet werden, als in den Extremszenarien modelliert. Weiterhin sind Technologien, die auf heimischen Rohstoffen basieren, aus „weichen“ Gründen (Risiken für Biologische Vielfalt und

Boden, Handhabbarkeit) zu bevorzugen. Beim Ausbau dieser Technologien ist insbesondere auf indirekte Effekte zu achten, die im Rahmen dieses Vorhabens nur grob abgeschätzt werden konnten. Parallel sollten Nachhaltigkeitsstandards für flüssige Bioenergieträger, die in den letzten Jahren etabliert wurden, im internationalen Kontext weiter erprobt und in geeigneter Weise auf andere Biomasse-sektoren ausgeweitet werden. Als erster Schritt sollten hier die Nachhaltigkeitsstandards auch verbindlich auf gasförmige und feste Bioenergieträger ausgeweitet und Definitionen einer guten fachlichen Praxis / Nachhaltigkeitsanforderungen in der Forstwirtschaft sowie für Wälder mit großer biologischer Vielfalt erarbeitet werden.

**Aus den Extremszenarien lassen sich Elemente für eine Bioenergiestrategie ableiten.**

Wärmeerzeugung aus Holz stellt derzeit in Deutschland, Europa und weltweit die wichtigste Bioenergiequelle dar. Ziel der vier Extremszenarien war die Pfadüberprüfung hin zu hochwertigeren Technologiepfaden. Die anhand der Preiserwartungen ermittelten Szenarien ergeben deutlich, dass ohne sektorale Vorgaben die betrachteten Technologiepfade zur Nutzung von heimischem oder importiertem Holz als Strom oder als Kraftstoff erst in der Mittelfristperspektive einen (eher kleineren) Stellenwert erreichen können; dann jedoch nicht als Einsatzstoff für Flüssigkraftstoffe, sondern im Bereich kleinerer oder mittlerer Vergasungstechnologien. Wärmebereitstellung aus holzbasierten Rohstoffen könnte damit deutlich länger einen relevanten Stellenwert erhalten. Die errechneten Szenarien sind damit mit der aktuellen und erwarteten Rohstoffverfügbarkeit (z. B. MAJER et al., 2013; MANTAU, 2012; THRÄN et al., 2011) nur eingeschränkt kompatibel.

Als wichtige **Elemente für eine Bioenergiestrategie** werden identifiziert:

- Für den weiteren Ausbau der Reststoffnutzung bestehen noch Potenziale im land- und forstwirtschaftlichen Bereich. Unter den bisher noch nicht marktfähigen Kraftstoffen könnte die Bereitstellung von Ethanol aus (heimischem) Stroh mittelfristig den Markteintritt erreichen. Allerdings schneidet diese Nutzung im Vergleich zu einer möglichen Strom- und Wärmegewinnung aus Stroh aus Umweltschutzsicht schlechter ab (KELLER et al., 2014).
- Zusätzliche Nachfrage nach Bioenergie aus Energiepflanzen führt zu direkten und indirekten Landnutzungsänderungen, welche wiederum Kohlenstoffbestandsänderungen zur Folge haben, aus denen Treibhausgasemissionen resultieren. Die Ermittlung dieser Effekte ist komplex und eine detaillierte Analyse derselben geht weit über den Rahmen dieser Untersuchung hinaus. Jedoch konnte auch hier gezeigt werden, dass – in Abhängigkeit der Methode – die Gesamt-Treibhausgasreduktion durch Bioenergieeinsatz (gegenüber dem Einsatz fossiler Energieträger) aufgrund von Landnutzungsänderungen teilweise nur gering bis nicht vorliegend sein kann. Eine künftige Bioenergiestrategie bedarf einer robusten Berechnung und Verfolgung dieser Effekte – nicht nur für Bioenergie, sondern auch für andere Biomasse-Nutzungsformen. Das Monitoring von Landnutzung, Landnutzungsänderungen und den damit verbundenen Kohlenstoffhaushalten und Treibhausgasereffekten ist eine wichtige Voraussetzung – nicht nur für die Bioenergiepolitik, sondern auch für die

Weiterentwicklung der Bioökonomie insgesamt. Solange diese nicht gegeben ist, sollte die Bioenergienutzung vor allem qualitativ verbessert und im Bereich der Energiepflanzen nur sehr moderat ausgebaut werden. Diese Schlussfolgerung ergibt sich auch aus den ermittelten anderen Umweltwirkungen wie Feinstaubbelastung, Versauerung und Nährstoffeintrag, welche durch Bioenergieeinsatz teilweise steigen. Durch geeignete Rahmenvorgaben – idealerweise für die Biomassennutzung als Ganzes<sup>5</sup> – sollte daher sichergestellt werden, dass der Umbau des Energiesystems nicht zu einer Erhöhung von Umweltlasten führt. Neben der Erreichung der Klimaschutzziele sollte insbesondere auch die Erreichung der gesteckten Zielvorgaben im Bereich Wasser-, Boden- und Luftreinhaltung (z. B. Wasserrahmenrichtlinie [WRRL, 2000/60/EG, 2000] oder Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe [NEC, 2001/81/EG, 2001]) sowie der nachhaltigen Ressourcennutzung (z. B. Kreislaufwirtschaft) sichergestellt werden.

- Deutschland sollte eine effiziente inländische Bioenergieproduktion – ob im Kraftstoffsektor mit Biomethan oder im Strom- und Wärmebereich mit Biogas – einer Importstrategie von teilweise weniger effizienten Biokraftstoffen vorziehen, da hierdurch weltweit mit geringeren Risiken für die Biologische Vielfalt und Boden zu rechnen ist. Die indirekten Effekte, die aus der Verdrängung anderer Ackerkulturen durch Biogassubstrate resultieren, konnten jedoch nur grob abgeschätzt werden (z. B. unter der Annahme, dass nur Weizen verdrängt wird) und könnten in der Realität evtl. deutlich höher ausfallen. Dies sollte bei einer Strategieentwicklung berücksichtigt werden.
- Die Wärmebereitstellung auf der Basis von Holz stellt auch mittel- bis langfristig eine robuste Bioenergieoption dar. Sie sollte unter Beachtung regionaler Bereitstellungsstrukturen, Emissionsanforderungen und Nutzerpräferenzen schrittweise weiterentwickelt werden. Durch die Markteinführung von Vergasungstechnologien sollte Deutschland die holzbasierte Wärmeversorgung hin zu einer kombinierten Strom- und Wärmeversorgung (kleinere und mittlere Einheiten) entwickeln.
- Temporär kann – bei hohen CO<sub>2</sub>-Preisen - eine marktgetriebene Nachfrage nach (vorwiegend Import-)Holz zur Mitverbrennung in Kohlekraftwerken entstehen (IEA-ETSAP und IRENA 2013; VOGEL et al., 2011). Vor dem Hintergrund der höheren Risiken bei importierten Rohstoffen, der zeitlichen Begrenztheit des Einsatzes (unter der Annahme, dass Kohlekraftwerke mittelfristig eine stark rückläufige Bedeutung bei der Strombereitstellung haben) und des andererseits im relevanten Zeitraum aber sehr großen Mengennachfragepotenzials ist die Mitverbrennung von Holz in Kohlekraftwerken ein Bereich, der frühzeitig einer klaren Strategie hinsichtlich angestrebter Mengen und Import-

<sup>5</sup> Der Energiepflanzenanbau unterscheidet sich nicht systemimmanent vom Anbau anderer landwirtschaftlicher Kulturen für Nahrungs- und Futtermittel.

anteile bedarf. Nachhaltigkeitsanforderungen an Festbrennstoffe können hier Leitplanken für den Einsatz bei hohen CO<sub>2</sub>-Preisen bilden.

- Deutschland sollte eine Post-EEG-Strategie für Biogas- und Biomethananlagen entwickeln. Notwendig ist hierzu eine detaillierte Analyse des Anlagenbestands bezüglich des Vorhandenseins sinnvoller Wärmesenken für den KWK-Betrieb bzw. der infrastrukturellen Möglichkeiten zur Umrüstung von Biogas- zu Biomethananlagen (z. B. Nähe zum bestehenden Erdgasnetz) sowie einer sektoralen Analyse, in welchen Mobilitätsbereichen Biomethan künftig genutzt werden soll.
- Eine Bioenergiestrategie muss eng mit der Landwirtschaft abgestimmt sein. Dies umfasst den künftigen Stellenwert der Produktion und des Einsatzes von Energiepflanzen, aber auch den sektoralen Einsatz von Pflanzenöl / Biodiesel / Biomethan als Kraftstoff.
- Biodiesel ist ein günstiger, flüssiger Bioenergeträger, der jedoch vergleichsweise wenig Innovationspotenzial aufweist. Hier sollten die vorhandenen Produktionskapazitäten nicht weiter erhöht werden – jedoch auch kurzfristig nicht reduziert, weil die Kraftstoffbereitstellung wichtige Nebenprodukte liefert (Futtermittel und Glycerin) und die Frage des Umfangs und der Notwendigkeit von flüssigen Bioenergeträgern für eine nachhaltige Energiewende noch nicht geklärt ist (siehe nächster Punkt).
- Ein offener Punkt bleibt: die gezielte Entwicklung hochwertiger, flüssiger Bioenergeträger für ausgewählte Anwendungsfelder (z. B. Flugkraftstoff). Dies ist vom Langfristziel her zu entwickeln. Für BTL-Kraftstoffe bedarf es daher einer konsequenten Unterstützung, sowohl durch F&E Maßnahmen als auch durch Markteinführungsinstrumente, weil solche Kraftstoffe in allen Szenarien deutlich teurer sind als die Alternativen. Für den Verkehrsbereich sind jedoch neben dem Biokraftstoffangebot weitere Aspekte bei der Umstellung hin zu erneuerbaren Energien zu beachten.

Neben den vorwiegend auf die nationale Bioenergiepolitik ausgerichteten Schlussfolgerungen ergeben sich zwei weitere Bereiche auf internationaler Ebene:

- Implementierung ambitionierter nachhaltiger Landnutzungspolitiken
- Überprüfung der internationalen Mengenerwartungen an FT-Kraftstoffen hinsichtlich der angenommenen Einflussgrößen (z. B. Investitionsaufwendungen, Rohstoffpreise, erreichbare Treibhausgasemissionen)

Basierend auf diesen Schlussfolgerungen können die vier Extremszenarien, die dazu dienen, eine gewisse Bandbreite an Entwicklungen und damit Interpretationsspielraum darzustellen, synoptisch interpretiert werden. Abbildung 1-2 fasst dieses für die Bioenergieentwicklung in indikativen Trends für Deutschland bis 2050 zusammen. Sie basiert sowohl auf den Modellierungsergebnissen (Extremszenarien) und ihrer umfangreichen Interpretation, als auch den qualitativ betrachteten Entwicklungen und weiteren aktuellen Studien.



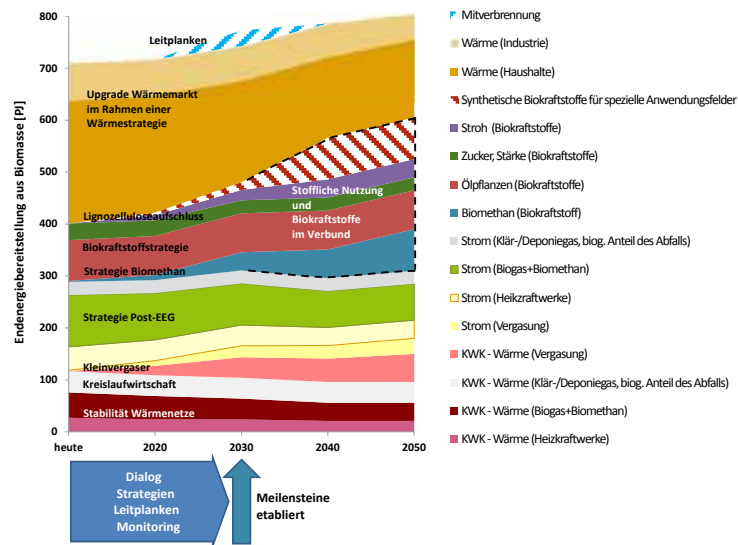


Abbildung 1-2: Indikative Trends der Bioenergie bis zum Jahr 2050 als Synthese des Vorhabens „Meilensteine 2030“

**Potenzialerschließung.** Bis 2030 sollte der Beitrag der Bioenergie an der Energieversorgung, zur Versorgungssicherheit und zur Erreichung der THG-Emissionsminderungsziele auf dem heutigen Niveau (ca. 700 PJ/a Endenergie) stabilisiert sein und danach in Abhängigkeit von Art und Umfang künftiger Landnutzungspolitiken gegebenenfalls moderat steigen. Die gezielte Erschließung von landwirtschaftlichen Reststoffen (z. B. Strohpotenziale für die Ethanolherstellung) und biogenen, kommunalen Abfällen ist insbesondere im regionalen Zusammenhang beziehungsweise der Kreislaufwirtschaft zu realisieren. Durch weitere Effizienzsteigerungen wird der Primärenergieeinsatz an Biomasse relativ zum Energieoutput gesenkt und die Einhaltung der als nachhaltig verfügbar geltenden Potenziale (Nitsch et al., 2012, sowie Potenzialabschätzung in diesem Bericht) auch bei moderater Steigerung der Endenergiebereitstellung aus Biomasse sichergestellt.

**Nutzungsoptionen.** Die Nutzung von Biomasse zur Energiebereitstellung verändert sich in den verschiedenen Sektoren in unterschiedlichem Maße. Die reine Wärmebereitstellung, insbesondere durch Einzelraumfeuerungen und Wärmenetze, aber auch seitens der

Industrie, wird einen relevanten Stellenwert beibehalten. Dies ergibt sich einerseits aus der sehr moderaten Nachfrage nach Holz für innovative Technologien, den gut etablierten regionalen und lokalen Rohstoffversorgungsstrukturen und andererseits aus den bereits getätigten Investitionen in Nahwärmesysteme. Gleichzeitig besteht auch in diesem Bereich die Notwendigkeit der Veränderung, hin zu Effizienzsteigerungen und Emissionsreduktionen. Vergasungstechnologien und ggf. weitere kleine Systeme für die gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung können die notwendigen Innovationen im System liefern. Neben dem Engagement der Entscheidungsträger auf kommunaler Ebene erfordert die biogene Wärmebereitstellung die Unterstützung innerhalb einer nationalen Wärmestrategie. Klare Signale sind für die Weiterentwicklung der Technologien und Konzepte zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung notwendig, die bisher über das EEG angereizt und realisiert wurden. Hier haben die Untersuchungen gezeigt, dass neben Altholz-basierten Heizkraftwerken insbesondere bedarfsgerecht betriebene Biogasanlagen einen Beitrag für die Stromversorgung leisten können. Für die Realisierung dieser Optionen bedarf es aber einer klaren „Post-EEG“-Strategie, ansonsten wird der bestehende Anlagenpark absehbar deutlich reduziert und die möglichen Systembeiträge bleiben ungenutzt. Parallel bietet ein teilweiser Umbau bestehender Biogas-Vor-Ort-Verstromungsanlagen hin zu Biomethanaufbereitungsanlagen die Möglichkeit einer sehr flexiblen Nutzung sowohl in der Strombereitstellung (mit verpflichtender Nutzung in KWK oder hocheffizienten GuD-Kraftwerken) als auch in der Nutzung als Kraftstoff. Vor diesem Hintergrund sollte Biomethan strategisch (weiter-)entwickelt werden.

Darüber hinaus besteht – u. a. auch wegen des möglichen Einsatzes von Biomethan im Verkehrssektor – die Notwendigkeit einer differenzierten Biokraftstoffstrategie. Diese sollte ebenso eine Stabilität in der Bereitstellung von Biokraftstoffen auf Basis landwirtschaftlicher Rohstoffe berücksichtigen, um angemessen den bestehenden regionalen bzw. dezentralen Strukturen und Synergien zur Futtermittelbereitstellung gerecht zu werden. In der Biokraftstoffstrategie nach 2030 sollten zum einen die dezidierte Nachfrage nach Biokraftstoffen in ausgewählten Anwendungsfeldern (z. B. Flugkraftstoffe, Landwirtschaft), zum anderen die Möglichkeit der Bereitstellung von Biokraftstoffen in gekoppelten Systemen mit der stofflichen Nutzung über die Vorteilhaftigkeit der Kraftstoffoptionen entscheiden. Eine solche Kraftstoffstrategie benötigt aber auf jeden Fall dauerhafte und verlässliche Rahmenbedingungen, um auf dem Markt implementierbar zu sein.

Zusätzlich dürfte es ab 2030 zwischen den Bereichen Strom, Wärme und Kraftstoff, aber auch im Zusammenspiel mit anderen Erneuerbaren Energien zu stärkeren Verschiebungen kommen, die jedoch die hier identifizierten Elemente in ihrer relativen Vorteilhaftigkeit nicht grundsätzlich verändern dürften. Die Option der Mitverbrennung von Holz in Kohlekraftwerken kann bei steigenden CO<sub>2</sub>-Zertifikatpreisen zu einem kurzzeitig ansteigenden Holzverbrauch führen, wenngleich aufgrund niedriger Zertifikatspreise das Risiko hierfür derzeit als gering eingeschätzt wird.

Aus dieser Synopse leiten sich die nachfolgend beschriebenen zehn Meilensteine ab.

## 1.4 Meilensteine 2030 - Handlungsempfehlungen

Die Bioenergiestrategie wird in den verschiedenen Feldern unterschiedlich schnell umgesetzt. Zehn wichtige Meilensteine, die bis zum Jahr 2030 erreicht sein müssen, sind nachfolgend genannt:

### **Meilenstein 1: Nachhaltige Landnutzung ist Voraussetzung.**

Voraussetzung für eine nachhaltige Biomassenutzung in 2030 ist die schnelle Definition und Implementierung ambitionierter internationaler Ziele für den Schutz von sensiblen Flächen wie Primärwälder, Torfmoor, Feuchtgebiete, Wälder und Grünland mit großer Biologischer Vielfalt, z. B. in einer globalen Schutzgebietskulisse in Anlehnung an die Beschlüsse der Convention on Biological Diversity (CBD). Auf nationaler Ebene erscheint ein wirksamer Schutz von Dauergrünland als sinnvoll. Diese Schutzbestrebungen verändern den Produktionsumfang für landwirtschaftliche Produkte, gehen mit einer Nutzungsintensivierung auf genutzten Flächen einher und weit über die Bioenergienutzung hinaus. Deutschland sollte daher zeitnah international Initiativen ergreifen bzw. bestehende deutlich stärken, die sowohl die nachhaltige Landnutzung als auch Aspekte der zu erwartenden Nutzungsintensivierung umfasst. Instrumente zum Schutz von sensiblen Flächen, die für Biokraftstoffe teilweise implementiert sind, sind auf ihre Übertragbarkeit zu überprüfen.

### **Meilenstein 2: Monitoring von Landnutzung, Kohlenstoffinventaren und Treibhausgasemissionen ist im Rahmen der Bioökonomie etabliert.**

Hierdurch können die Entwicklung der Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderungen und ihre Effekte auf die avisierten Ziele im Energiesystem regelmäßig überprüft und die Strategie angepasst werden.

### **Meilenstein 3: Entwicklungsstrategie für Biogas / Biomethan (Post-EEG-Strategie) ist implementiert.**

Für die bestehenden Biogas- und Biomethananlagen wurde anhand der Anlagencharakteristika eine dezidierte Nutzungsstrategie entwickelt. Diese muss eng mit der Landwirtschaft abgestimmt sein, die zunehmende Nutzung als Kraftstoff berücksichtigen und auf dem aktuellen Anlagenbestand aufbauen. Die nähere Spezifizierung von Biomethan als Kraftstoff ist dafür eine wichtige Voraussetzung (siehe Meilenstein 7). Nach heutigem Kenntnisstand ist bei einer Nutzung von Biomethan als Kraftstoff weniger der weitere Zubau von Biogasanlagen zu verfolgen als vielmehr der zielgerichtete Umbau. Dazu sind die Möglichkeiten der einzelnen Anlagen genauer zu betrachten und für den jeweiligen Einzelfall abzuschätzen, für welche Anlagen oder Anlagenverbände eine zusätzliche Aufbereitungsstufe sinnvoll darstellbar ist, wo Flexibilisierung einen längerfristigen Mehrwert liefern kann bzw. wo eine Umrüstung nicht sinnvoll erscheint. Für eine flexible Strombereitstellung auf Basis von Biogas-BHKW ist die Umrüstung bestehender Alt-Anlagen (Flexibilisierung) bis 2030 bereits weitgehend erfolgt.

### **Meilenstein 4: Wärmebereitstellung aus Biomasse beinhaltet zunehmend innovative Konzepte („Up-grade Wärmenutzung“) und ist im Rahmen einer Wärmestrategie berücksichtigt.**

Die Wärmebereitstellung aus Biomasse stellt eine robuste Nutzungsoption dar. Sie bedarf aber der stetigen Weiterentwicklung im Sinne der künftigen Bedarfsstrukturen (geringerer spezifischer Wärmebedarf, Kombination mit anderen Erneuerbaren, höherer Komfortanspruch), Emissionsanforderungen und einer Erweiterung hin zu Kraft-Wärme-Kälte-gekoppelten Systemen (siehe auch Meilenstein 5).

Deutschland braucht in diesem Zusammenhang eine Wärmestrategie, die Bioenergie in Form von Wärmenetzen und KWK-Anlagen mit der Abwärmenutzung aus der Industrie und der Anstrengung hinsichtlich der Energieeinsparung vereint. Mit Hilfe von Instrumenten zur Raumplanung und zur Stadtentwicklungsplanung (Bauleitplanung) ist in ganz Deutschland ein Wärmekataster unter Berücksichtigung demographischer Effekte zu erstellen. Darin sollten Schwerpunkte für den Bau von hinsichtlich der Energieträger flexiblen, regenerativen Wärmenetzen definiert werden.

### **Meilenstein 5: Vergasungstechnologien sind verfügbar.**

Durch Markteinführungsprogramme und gezielte Forschung ist der Übergang von der reinen Wärme- zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung (siehe Meilenstein 4) zu unterstützen. Diese Technologien können ein sehr hohes Exportpotenzial aufweisen. Dies gilt bei entsprechender Nachfrage grundsätzlich auch für Bio-SNG.

### **Meilenstein 6: Leitplanken für die Mitverbrennung von Holz sind gesetzt.**

Bei höheren CO<sub>2</sub>-Preisen würden größere Mengen Holz aus wirtschaftlichen Gründen in Kohlekraftwerken mitverbrannt werden. Um auf diese Nutzungsoption bezüglich deren Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit steuernd Einfluss nehmen zu können, sind hier entsprechend frühzeitig Rahmenbedingungen zu schaffen. Hierzu gehört die Einführung und Umsetzung adäquater Nachhaltigkeitsstandards für Festbrennstoffe auf nationaler Ebene. Langfristig sinkt die Bedeutung der Mitverbrennung bei sinkendem Kohlestromanteil.

### **Meilenstein 7: Differenzierte Biokraftstoffstrategie ist implementiert.**

Im Verkehrssektor wird es Teilbereiche geben, in denen die Biokraftstoffnutzung langfristig einen effizienten Beitrag zum Klimaschutz leistet. Diese zu identifizieren und mit robusten Langfriststrategien, auch mit Blick auf den systematischen Einsatz nachhaltiger Rohstoffe und insbesondere Reststoffe zu untersetzen ist notwendig, da sich die sogenannten neuen Technologien (z. B. auf Basis von Lignozellulose) absehbar nicht ohne langfristige und gezielte Unterstützung am Markt etablieren können. Eckpfeiler für eine Biokraftstoffstrategie sind (i) eine klare Zielhierarchie, was mit dem Einsatz von Biokraftstoffen erreicht werden soll, (ii) die darauf aufbauende Identifikation von prioritären Einsatzbereichen, (iii) die technisch-ökonomische-ökologische Analyse von Möglichkeiten der gekoppelten Produktion von Biokraftstoffen und anderen biobasierten Produkten, (iv) die Einbettung in eine übergeordnete Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie und die Etablierung eines entsprechenden regulatorischen Umfeldes.

### Meilenstein 8: Lignozelluloseaufschluss von Stroh ist im Markt etabliert und hinsichtlich der Nutzungsoptionen priorisiert.

Lignozelluloseaufschluss bietet vielfältige Nutzungsoptionen von Stroh und anderen Reststoffen. Hierzu ist die Flankierung entsprechender F&E-Aktivitäten notwendig. Der Einsatz von Stroh im Rahmen künftiger Kraftstoffstrategien ist anhand detaillierter Analysen bewertet. Die Bereitstellung sollte auf der deutschen und europäischen Rohstoffbasis basieren. Eine inländische Produktion sowie Importe von Ethanol aus Reststoffen bedürfen umfassender Leitplanken für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit.

### Meilenstein 9: Umgang mit Abfällen innerhalb der Kreislaufwirtschaft ist geklärt.

Die Erschließung und bestmögliche Nutzung bzw. Verwertung von kommunalen Abfällen (insb. Bioabfall, Altholz, Klärschlamm) bedarf im Sinne der Kreislaufwirtschaft der weiteren Unterstützung und gesetzgeberischer Lenkung. Mit Blick auf effiziente energetische Abfall-Verwertungssysteme unter besonderer Berücksichtigung der Bioökonomie und Kaskadenprozesse sind angepasste Infrastrukturen zur weitestgehend sortenreinen Erfassung und Nutzung entsprechender Biomasse-Sortimente einzurichten.

### Meilenstein 10: Bioenergie im Verbund etablieren.

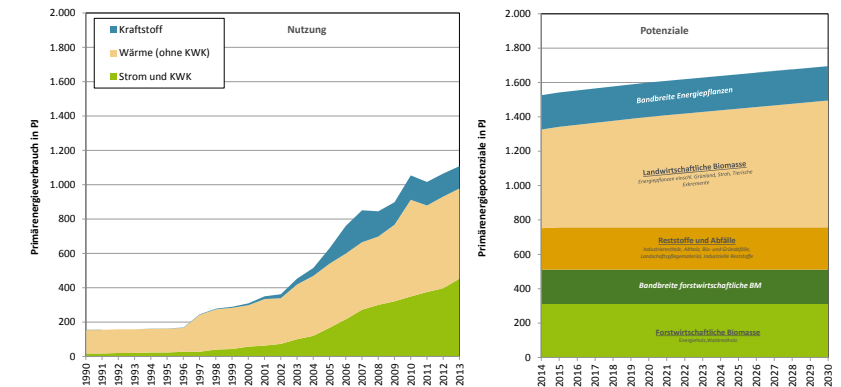
Die Nutzung von Bioenergie stellt einen Baustein für den Übergang in eine zunehmend auf erneuerbaren Ressourcen basierenden Wirtschaft dar. Um diese große Aufgabe erfolgreich zu realisieren, werden Verbundkonzepte immer wichtiger. Dazu zählt zum einen die enge Verzahnung mit der Landwirtschaft, zum anderen die Weiterentwicklung von gekoppelten stofflichen und energetischen Konzepten, sowohl im Bereich der Holznutzung als auch bei Agrarprodukten und deren Verarbeitung und Nutzung, aber auch die Notwendigkeit eines umfassend schonenden Umgangs mit den begrenzten Ressourcen. Es wird auch empfohlen, dass ein hohes Engagement von Seiten der Politik, u. a. in Deutschland, ergriffen werden sollte, um den globalen Hunger zu bekämpfen und hierzu auch positive Fallbeispiele für Bioenergie und Ernährungssicherung zu implementieren. Schließlich ist die zunehmende Verbindung von stofflicher und energetischer Nutzung ein wichtiges Element, insbesondere um zu einer effizienten Reststoffnutzung zu kommen. Dieser Prozess ist jedoch fortlaufend und kann bis 2030 nur einen Zwischenstand erreichen.

## 2 Einleitung

### 2.1 Hintergrund

Die Nutzung von Biomasse zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen hat sich in der Vergangenheit dynamisch entwickelt (Abb. 2-1). Für die Zukunft wird erwartet, dass in einer weitgehend auf erneuerbaren Energien beruhenden Energieversorgung in Deutschland die Bioenergie künftig die Lücken füllt, die nicht aus anderen Quellen gespeist werden können (BARZANTNY et al., 2009; KIRCHNER & MATTHES, 2009; SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN, 2011; SCHLESINGER et al., 2010, 2011). Dabei gibt es sowohl starke Argumente für den flexiblen Einsatz im Strombereich als auch für ausgewählte Kraftstoffpfade (z. B. Schwerlastverkehr, Schifffahrt, Flugverkehr), während im Wärmebereich die Bioenergie als gut durch alternative erneuerbare Versorgungskonzepte ersetzbar gilt.

Welche Menge an Biomasse für die energetische Nutzung letztendlich zur Verfügung steht, ist derzeit nicht abschließend geklärt. Im Vergleich von nationalen (BARZANTNY et al., 2009; KIRCHNER & MATTHES, 2009; NITSCH et al., 2010, 2012; SCHLESINGER et al., 2010) und auch internationalen Studien (IEA/OECD, 2012; OECD/IEA, 2010) gehen die Autoren von zukünftig stark unterschiedlichen Potenzialen für die energetische Biomassenutzung aus. Sicher ist jedoch, dass Biomasse zwar ein regenerativer Rohstoff und damit nicht endlich ist, jedoch für den konkreten Zeitraum nur begrenzt verfügbar ist. Damit wird eine Priorisierung der Einsatzbereiche für den weiteren Ausbau zunehmend notwendig (BMVBS 2010; THRÄN et al., 2011; KOALITIONSVERTRAG 2013; MAJER et al., 2013).



Quellen: Nutzung nach (AGEE-STAT, 2013) (PEV berechnet nach Wirkungsgradmethode), Potenziale nach (BMVBS, 2010) (Energiepflanzen, Exkrememente), (ZELLER et al., 2011) (Stroh), Destatis (AUSSENHANDELSSTATISTIK, 2011), DBFZ 2013 (Bio- und Grünabfälle, industrielle Reststoffe, unveröffentlicht) (Hinweis: Fehlende Jahre wurden durch Fortschreibung der Einzelergebnisse ermittelt).

Abbildung 2-1: Nutzung und kurzfristig erwartete Potenziale zur Bioenergiebereitstellung in Deutschland

Vor dem Hintergrund der vielfältigen, aktuellen Entwicklungen im Bereich der regenerativen, nicht-biogenen Energietechnologien und Energieträger erscheint es sinnvoll, Bioenergiestrategien zu favorisieren, die geringe Pfadabhängigkeiten aufweisen und z. B. Technologiekonzepte berücksichtigen, die sowohl im Strom- / Wärme-Bereich als auch im Kraftstoffsektor genutzt werden können. Hierbei sind mit Blick auf die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit diejenigen Optionen mit den absehbar niedrigsten Bereitstellungskosten zu bevorzugen. Es herrscht jedoch auch Einigkeit darüber, dass Bioenergienutzung ebenfalls mit den übrigen Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung (Ökologie und Soziales) in Einklang stehen muss und insbesondere gegenüber der Ernährungssicherung nachrangig ist.

## 2.2 Zielstellung und Herangehensweise

Die Anforderungen an eine zukünftige, nachhaltige energetische Biomassenutzung sind vielfältig. Eine ressourceneffiziente, klimaverträgliche, gesellschaftlich akzeptierte und langfristig tragfähige Bioenergiestrategie muss sicherstellen, dass:

- erwartete Engpässe und Lücken beim Übergang des weitgehend auf nicht-erneuerbaren Energieträgern basierten Energiesystems in eine klimaverträgliche, regenerative Energieversorgung zielgerichtet bedient werden (**Brückenfunktion**)
- die zunehmend volatilen Preise auf den Energie- und Rohstoffmärkten durch die Bioenergienutzung nicht destabilisiert werden (**Pufferfunktion**)
- Effizienzgewinne durch technische Weiterentwicklungen und Innovationen der Bioenergiebereitstellung erzielt werden (**Effizienzfunktion**)
- die grundlegenden Ziele der energetischen Nutzung von Biomasse und die damit verbundenen ökologischen Leitplanken nicht verletzt werden (**Richtungssicherheit**)
- auf Veränderungen in der Entwicklung der Rahmenbedingungen nachgesteuert werden kann (**Fehlerfreundlichkeit**).

**Ziel des Vorhabens** „Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen nachhaltigen Bioenergiestrategie“<sup>6</sup> (im Folgenden: Meilensteine 2030) ist es, die technischen und organisatorischen Meilensteine zu identifizieren, die bis zum Jahr 2030 geschaffen werden müssen, um eine abgestimmte und nachhaltig tragfähige Langfriststrategie für die zukünftige Nutzung der absehbar begrenzten heimischen Biomasseressourcen bis 2050 erfolgreich vorzubereiten.

6 Homepage des Projektes siehe: <https://www.energetische-biomassenutzung.de/de/meilensteine-2030.html>

Hierfür sind Antworten auf folgende Fragen notwendig:

- Zu welchen Preisen und zu welchen Bedingungen ist Biomasse künftig für die energetische Nutzung verfügbar?
- Wie wirken sich unterschiedliche Nachhaltigkeitsanforderungen für die Land- und Forstwirtschaft und die Ernährung auf die Verfügbarkeit aus?
- Wenn zukünftig unterschiedliche Arten von Bioenergie benötigt werden, welche Technologien kommen unter welchen Randbedingungen in welchem Umfang zum Einsatz?
- Welche Wirkungen auf Innovation, Umwelt und regionale Infrastrukturen gehen von den verschiedenen Bioenergieoptionen aus?
- Welche Auswirkungen auf die regionale Bereitstellung von Strom und Wärme sowie die KWK Ziele des Bundes sind zu erwarten?
- Welche Rolle spielt die deutsche Biomassenachfrage im Kontext internationaler Biomassenachfrage-Entwicklungen?
- Wie ist die künftige globale Bioenergienachfrage vor dem Hintergrund von Landnutzungsänderungen und Ernährungssicherheit zu bewerten?
- Welche Effekte haben Entwicklungen der stofflichen Nutzung auf die Verfügbarkeit von Biomasse für die energetische Nutzung und potenzielle Kaskadennutzungen?

Um Antworten auf die genannten Fragen zu finden, wurde untersucht, welche Technologieoptionen zur gekoppelten Strom- und Wärmeezeugung oder zur Bereitstellung von Biokraftstoffen sich unter verschiedenen Rahmenbedingungen als ökonomisch vorteilhaft darstellen und welche ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen mit dem sich aus der Bioenergieproduktion einhergehenden Biomassebedarf ergeben.

Hierfür wurde ein Modellverbund aus einem globalen Marktmodell (MAGNET), einem globalen Landnutzungsmodell (LandSHIFT) und einem eigens für dieses Vorhaben entwickelten BioENERgieSimulationsModell (=BENSIM) gebildet. Neben diesen Computermodellen werden im Projektverbund über sogenannte Module Eingangsparameter für die Modelle festgelegt sowie ex post Bewertungen der Modellberechnungen vorgenommen.

Weiterhin wurden Szenarien definiert, in denen (i) die Biomasseverfügbarkeit von unterschiedlich starken Nachhaltigkeitsanforderungen (globale Ebene) verknappt ist und (ii) Bioenergie verstärkt in einem Sektor (Strom / Wärme oder Kraftstoff) eingesetzt wird.

Nachfolgend wird zunächst der Modellverbund kurz beschrieben, gefolgt von den Szenariannahmen, unter denen die Berechnungen im Modellverbund durchgeführt wurden. Anschließend werden die Ergebnisse der einzelnen Modelle für die verschiedenen Szenarien dargestellt, um auf Basis der Erkenntnisse aus den Berechnungen schließlich Elemente und Meilensteine für eine tragfähige und nachhaltige Bioenergiestrategie zu identifizieren und Handlungsempfehlungen abzuleiten.

### 3 Modellidee + Modellverbund

Der für das Vorhaben gebildete Modellverbund ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Als Rahmen für die Modellierung werden die Bioenergienachfrage und die Nachhaltigkeitsanforderungen in verschiedenen Szenarien (vgl. Kapitel 4), sowie die relevanten Bioenergiotechnologien eingegrenzt (Tabelle 3-1) Im Folgenden werden die eingesetzten Modelle, der Modellverbund und dessen Arbeitsweise kurz skizziert. Eine detaillierte Beschreibung findet sich im Anhang A 3<sup>7</sup>.

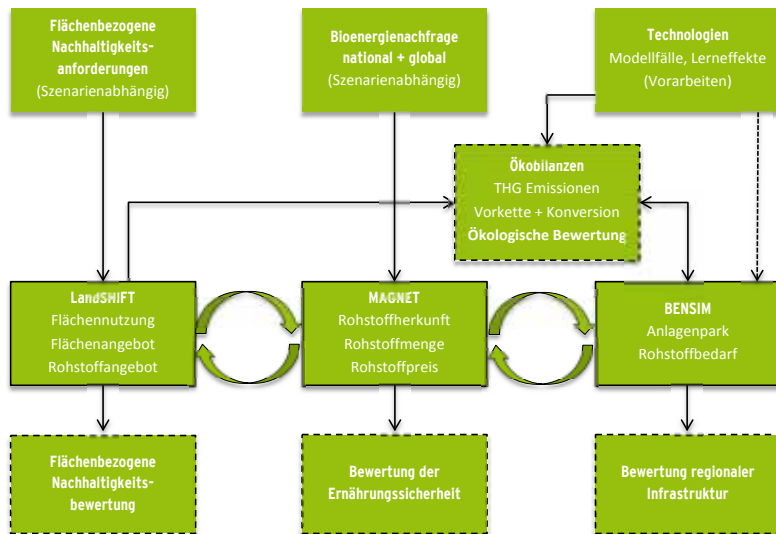


Abbildung 3-1: Übersicht über die Modelle (durchgezogene Rahmenlinien) und Module zur Folgenabschätzung (gestrichelte Rahmenlinien) sowie deren Schnittstellen im Projektverbund „Meilensteine 2030“

#### 3.1 BENSIM

Das Simulationsmodell BENSIM simuliert den Wettbewerb ausgewählter Bioenergiotechnologien zur energetischen Nutzung (Kraftstoff bzw. Strom / Wärme) eines gegebenen Primärenergieangebots von Biomasse in Deutschland bis 2050. Die Modellberechnungen in BENSIM liefern Aussagen darüber, welche der Bioenergiotechnologien sich wann und unter welchen Bedingungen gegen andere Bioenergiotechnologien durchsetzen. Eine Übersicht über die betrachteten Konversionstechnologien gibt Tabelle 3-1. Detailliertere Angaben zu den einzelnen Technologien finden sich im Anhang A 3.1.3.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Zum Download verfügbar unter: <https://www.energetische-biomassenutzung.de/de/meilensteine-2030/ergebnisse.html>

Tabelle 3-1: 20 Konversionspfade im Vorhaben „Meilensteine 2030“

	Verbrennung	Anaerobe Vergärung	Fermentation	Umesterung	Hydro-processing	Vergasung
Strom / Wärme (KWK)	Heizkraftwerk (ORC)	Biogasanlage				Kleinvergasler (KWK)
	Heizkraftwerk (DT)	Biomethananlage				
	Pflanzenöl-BHKW	Güllekleinanlage* Bioabfallanlage*				Vergaser (ORC)
Biotkraftstoff	-	Biomethan	Ethanol (Zucker)		Biodiesel (Raps) HVO (Raps)	Bio-SNG
			Ethanol (Getreide)			BTL/Fischer-Tropsch-Kraftstoffe
			Ethanol (Stroh)			
Wärme	Einzelraumfeuerung (Scheitholz)*					
	Holzpelletkessel*					
	Heizwerk (HHS)*					

Abkürzungen: ORC: organic rankine cycle; DT: Dampfturbine; HHS: Holzhackschnitzel; KWK: Kraft-Wärme-Kopplung; Bio-SNG: Bio synthetic natural gas (Methan aus biogenen Festbrennstoffen); BTL: Biomass to liquid; HVO: Hydrogenated Vegetable Oil  
\*künftiger Beitrag im Energiesystem basierend auf Expertenschätzungen im Projektverbund festgelegt

Wesentlich für die Durchsetzungsfähigkeit einer Technologie sind die Kosten, zu denen diese das nachgefragte Produkt herstellen kann. Diese Kosten sind unter anderem abhängig von technologischen Lerneffekten, die durch den Zubau von Anlagen (GRÜBLER, 1998; WRIGHT, 1936) und durch Forschung und Entwicklung (exogenes Lernen) entstehen<sup>8</sup>, von der Entwicklung der Rohstoffpreise für die Anlagensubstrate und einem möglichen Preis für Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen). All diese Einflussparameter werden in der BENSIM-Simulation berücksichtigt. Im Ergebnis liefert das Modell für jede betrachtete Technologie Daten zur zeitlichen Entwicklung der installierten Kapazität, der kumulierten installierten Kapazität, zu Lerneffekten sowie zu Bereitstellungskosten. Für die Simulation wird angenommen, dass eine Nachfrage nach den Produkten Strom und Kraftstoffen besteht.

<sup>8</sup> Das Modell berücksichtigt endogenes und exogenes Lernen. Endogenes Lernen bedeutet, dass durch den Zubau von Anlagen eine Technologie preiswerter wird aufgrund von Lerneffekten in der Produktion oder dem Betrieb von Anlagen. Es ist ein bekanntes Phänomen, dass neue Technologien bei Verdopplung ihrer kumulierten installierten Kapazität um einen technologiespezifischen Prozentsatz im Preis sinken (Lernkurve). Exogenes Lernen findet im Modell ebenfalls statt, auch wenn eine Technologie nicht ausgebaut wird. Hier wird unterstellt, dass Kostensenkungen auch durch Anstrengungen in (öffentlicher) Forschung und Entwicklung erreicht werden.



Begrenzt werden die Bereitstellung und der Anlagenzubau durch die Randbedingung, dass der notwendige Rohstoffeinsatz für die Produktion das gemäß (NIRSCH et al., 2012) national nachhaltig verfügbare Biomassepotenzial von 1.550 PJ Primärenergie nicht überschreiten sollte.

Für die Berechnungen benötigt das BENSIM-Modell Angaben zu den Kosten der Rohstoffe. Diese werden für handelbare Agrarrohstoffe durch die Schnittstelle zu MAGNET bereitgestellt. Die gesteigerte Nachfrage nach Anbaubiomasse durch die Bioenergienutzung, die einen Effekt auf die Rohstoffpreise haben kann, wird wiederum in MAGNET berücksichtigt. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Preise für THG-Emissionen auf die Entwicklung des Anlagenparks in BENSIM abschätzen zu können, werden durch IFEU-Übersichtsökobilanzen für jeden Konversionspfad bereitgestellt. So kann abgeschätzt werden, welche Treibhausgasemissionen mit der Entwicklung des Anlagenparks einhergehen und welche Emissionsminderungen im Vergleich zu einem fossilen Referenzsystem erreicht werden. Zur Abschätzung der Auswirkungen einer regionalen Integration der Anlagen auf die Wärme- und KWK Ziele der Bundesregierung werden die berechnete Zusammensetzung des Anlagenparks und die resultierende Produktion an die IZES gGmbH für eine entsprechende Analyse übermittelt.

Durch die Berücksichtigung der Lerneffekte und THG-Emissionen in der Modellierung werden darüber hinaus zwei wichtige Beispiele des Marktversagens in der Modellierung berücksichtigt. Dies sind zum einen die externen Kosten, die durch die Emission von Treibhausgasen verursacht werden und zum anderen der Umstand, dass Investitionen in neue Technologien über Lerneffekte zukünftige Investition günstiger machen, ein Effekt, der einzelnen Investoren selber nicht voll zugutekommt, aber volkswirtschaftlich von Vorteil ist.

## 3.2 MAGNET

MAGNET (Modular Applied GeNeral Equilibrium Tool) ist ein globales, dynamisch-rekursives allgemeines Gleichgewichtsmodell. Mit einem solchen Modell ist es möglich, die Entwicklung von Rohstoffpreisen und Rohstoffnachfragen im gesamtökonomischen Kontext zu simulieren. MAGNET berücksichtigt eine Vielzahl von Einflussfaktoren (bspw. politische Rahmenbedingungen, Bevölkerungsentwicklung und Wirtschaftswachstum). Für eine genauere Modellbeschreibung wird auf (WOLTJER et al., 2014) sowie den Anhang A 3.1.1 verwiesen.

Endogen ermittelt MAGNET als Ergebnis eines Simulationslaufs prozentuale Werteveränderungen aller Preise und Mengen für jeden Zeitabschnitt (Fünf-Jahresscheiben), jedes Land, jeden Faktor, jedes Produkt und jede Produktionsaktivität. Absolute Änderungen werden auf der Grundlage der Mengendaten des Basisjahres aus anderen Statistiken, z. B. FAO, IEA abgeleitet.

Im Zusammenspiel mit dem Modell LandSHIFT (vgl. 3.3) weist MAGNET die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche und Produktion pro Land und Produkt aus. Die landwirtschaftliche Produktion wird als Nahrungsmittel, Futtermittel oder Biomasse zur Energiegewinnung verwendet. MAGNET dient im Projekt zur Abschätzung der Preisentwicklung sowie der Entwicklung der Nachfrage der für die in BENSIM (vgl. 3.1) betrachteten Konversionsanlagen relevanten, handelbaren Rohstoffe (Weizen, Mais, Zucker, Ölsaaten, Zuckerrüben). Holz

und Abfall- bzw. Nebenprodukte (z. B. Stroh, Gülle) sind nicht explizit in MAGNET abgebildet. Für diese Güter werden Preisentwicklungen auf Basis von Expertenannahmen abgeleitet (vgl. auch Anhang A 4.6). Die Entwicklung der Rohstoffpreise ist relevant für die Berechnungen im Modell BENSIM. Die Entwicklung der Rohstoffnachfrage ist eine relevante Eingangsgröße für das Modell LandSHIFT. Beide Entwicklungen sind relevant für Einschätzungen zu regionalen Effekten und der Ernährungssicherheit.

## 3.3 LandSHIFT

Das globale Landnutzungsmodell LandSHIFT dient zur räumlichen und zeitlichen Simulation von Landnutzungsänderungen bedingt durch den Anbau von Nahrungs-, Futtermittel- und Energiepflanzen. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in (ALCAMO et al., 2011; SCHALDACH et al., 2011). Das Modell arbeitet auf einem Raster mit der räumlichen Auflösung von Fünf-Bogenminuten (entspricht ca. 9 x 9 km am Äquator). Jede Rasterzelle besitzt einen dominanten Landnutzungstyp sowie Informationen über ihre naturräumlichen Gegebenheiten (z. B. Topographie, Klima und Bodeneigenschaften) und die bebauten Flächen. Auf Basis dieser Daten errechnet das Modell die wahrscheinlichste Landnutzung für jede Rasterzelle. Modellergebnisse sind globale Rasterkarten, welche in Fünfjahresschritten bis zum Jahr 2050 die Entwicklung der Landnutzung darstellen.

Die im Modell MAGNET berechnete Entwicklung der Rohstoffnachfrage, sowie der exogen vorgegebene Flächenbedarf für Bioenergie (fixierte Bioenergieflächen), werden als Eingangsgröße in LandSHIFT berücksichtigt. Auf dieser Basis wird dann ermittelt, in welchen Regionen der Anbau der Feldfrüchte zur Deckung der Rohstoffnachfrage am wahrscheinlichsten ist, und ob durch diesen Anbau Landnutzungsänderungen induziert werden. Über LandSHIFT erfolgt ebenfalls die Berücksichtigung von flächenbezogenen Nachhaltigkeitsanforderungen im Modellverbund (vgl. Anhang A 4) insofern, als dass die Anwendung der Nachhaltigkeitsanforderungen zu einer Reduktion der für die Biomasseproduktion zur Verfügung stehenden Fläche führt.

## 3.4 Übersichtsökobilanzen

Für die im Projekt betrachteten Konversionspfade von Biomasse zu Strom, Wärme oder Kraftstoffen wurden in einem ersten Schritt so genannte Übersichtsökobilanzen erarbeitet, die sich eng an die internationalen Ökobilanznormen (DIN EN ISO 14040 und 14044, DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V., 2006) anlehnen. Die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzen, einem Teilaspekt der Ökobilanzen, wurden beim Technologiewettbewerb in BENSIM berücksichtigt. In einem zweiten Schritt wurden dann die BENSIM-Ergebnisse zu Anlagenpark, -anzahl und -kapazität sowie die jährliche Produktionsmenge mit den Übersichtsökobilanzen kombiniert und daraus die kumulierten Umweltauswirkungen (Energieaufwand, Treibhauseffekt, Versauerung, Nährstoffeintrag und Feinstaubbelastung) der vier Szenarien ermittelt. Beim Treibhauseffekt wird zusätzlich auch auf LandSHIFT-Ergebnisse zu Kohlenstoff-Bestandsänderungen infolge von Landnutzungsänderungen zurückgegriffen.

### 3.5 Ernährungssicherheit

Die Berücksichtigung von Anforderungen an die Ernährungssicherheit wird aufbauend auf den Ergebnissen der Modellierung in MAGNET durchgeführt (ex-post). Grundsätzlich wird angenommen, dass die globale Verteilung von Nahrungsmitteln funktioniert. Tatsächliche Verteilungsprobleme können im Rahmen der Modellierung nicht abgedeckt werden. Für den Fall, dass in einem Land / Ländergruppe keine ausreichende Ernährung sichergestellt werden kann (Hungergrenzwert unterschritten, vgl. Kapitel 5.6 sowie Anhang A 3.1.5) kommt es rein rechnerisch zu einem Biomassefluss aus reichen Ländern, der zu einer Reduktion der verfügbaren Biomasse zur energetischen Nutzung in diesen Ländern führt.

### 3.6 Bewertung flächenbezogener Risiken

Die Produktion von Biomasse kann zu negativen Auswirkungen auf die Umwelt führen. Beispielsweise kann Biomasse von Flächen stammen, die ein hohes Erosionsrisiko aufweisen, oder von Flächen die vor einer Ackerbaulichen Nutzung einen hohen Wert für die Biologische Vielfalt darstellten oder einen hohen Gehalt an Kohlenstoff aufwiesen. Das Ziel der Bewertung von flächenbezogenen Risiken im Vorhaben ist es einzuschätzen, mit welchen Risiken für die Umwelt die in Deutschland energetisch genutzte Biomasse behaftet ist. Dabei werden Risiken für eine Reduktion der Bodenfruchtbarkeit, Risiken für den Verlust der biologischen Vielfalt durch Flächenumwandlung sowie das Risiko von Flächenumwandlung berücksichtigt.

Als Ergebnisse der Interaktion von MAGNET und LandSHIFT stehen Zellinformationen zur Landnutzung (LandSHIFT) sowie Biomasseproduktion in Ländern und Importe nach Deutschland (MAGNET) zur Verfügung. Diese Information wird genutzt, um eine Risikobewertung für die Biomasse, die in einem Land produziert wird, durchzuführen.

### 3.7 Regionale Effekte

Der in BENSIM berechnete Anlagenpark, die mit diesem einhergehende Bereitstellung von Strom, Wärme oder Kraftstoffen sowie der hierfür nötige Rohstoffbedarf werden eingehend analysiert und auf die Frage hin überprüft, wie sich die Anlagen in bestehende, kommunale Infrastrukturen integrieren lassen und ob der Rohstoffbedarf aus Sicht der kommunalen Logistik bereitgestellt werden kann. Durch die Untersuchung der regionalen Effekte können die Wahrscheinlichkeit einzelner Szenarien sowie die Auswirkungen auf den Wärmemarkt aber auch auf die Rolle der Biomasse im Strommarkt (Ausgleich der fluktuierenden EE durch Biogas) rückgekoppelt werden. Dies wiederum erlaubt im Idealfall für ein bestimmtes Biomasseszenario regional untermauerte Rückschlüsse auf die derzeitigen Szenarien der Energiebereitstellung in Deutschland bzgl. Wärme und KWK.

### 3.8 Internationale Auswirkungen und Rückkopplungen

Die Ergebnisse der Anlagenparkentwicklung sowie ausgewählte Ergebnisse der Analyse von Auswirkungen werden in den internationalen Kontext eingebettet und qualitativ hinsichtlich Rückkopplungen diskutiert. Weiterhin wird die Energie-Diversität als Indikator der Versorgungssicherheit für die Szenarienergebnisse ermittelt.

## 4 Szenarienannahmen

Mit Hilfe des Modellverbundes soll untersucht werden, wie sich die Bioenergiebereitstellung unter verschiedenen Rahmenbedingungen entwickelt und welche Rohstoffbedarfe und Umweltwirkungen mit der Entwicklung jeweils einhergehen. Hierfür wurden Extrem-Szenarien erstellt, in denen (i) die Biomasseverfügbarkeit von unterschiedlich starken Nachhaltigkeitsanforderungen national sowie global verknappt ist und (ii) Bioenergie national verstärkt in einem Sektor (Strom / Wärme oder Kraftstoff) eingesetzt wird.

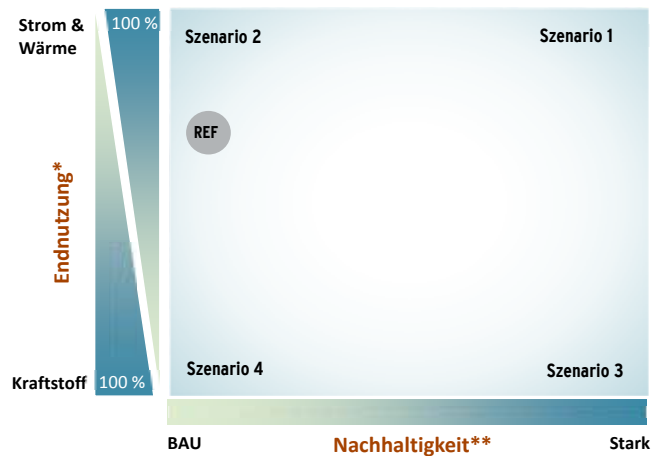
Dadurch ergeben sich neben einem Referenzszenario (Szenario 2011A nach [NITSCH et al., 2012]) als Ausgangspunkt folgende vier Extremszenarien:

- Szenario SW-N: vollständiger Einsatz der in Deutschland nachhaltig verfügbaren Biomasse zur Erzeugung von Strom und Wärme unter verstärkten Nachhaltigkeitsanforderungen.
- Szenario SW-BAU: wie Szenario SW-N. Nachhaltigkeitsanforderungen werden jedoch lediglich im Rahmen aktuell gültiger Normen berücksichtigt und aktuelle Trends werden fortgeschrieben (Business as usual, BAU).
- Szenario KS-N: vollständiger Einsatz der in Deutschland nachhaltig verfügbaren Biomasse zur Erzeugung von Kraftstoffen unter verstärkten Nachhaltigkeitsanforderungen.
- Szenario KS-BAU: wie Szenario KS-N. Nachhaltigkeitsanforderungen werden jedoch lediglich im Rahmen aktuell gültiger Normen berücksichtigt und aktuelle Trends werden fortschreiben.

In allen Szenarien wird als Ziel die Maximierung der Bioenergieproduktion (d. h. der Bio-Kraftstoffe in den KS Szenarien und der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung in den SW Szenarien) in Deutschland angenommen. Für die Anlagen zur der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung wird ein flexibler Betrieb unterstellt und es werden für diese Anlagen 5.000 Jahresvolllaststunden angesetzt. In allen Szenarien gilt die Randbedingung, dass der Primärenergiebedarf für die Bereitstellung von Strom / Wärme bzw. Kraftstoffen das inländisch nachhaltig verfügbare Potenzial von 1.550 PJ p.a. in Anlehnung an (NITSCH et al. 2012) nicht überschreiten sollte. Weiterhin wird angenommen, dass die derzeit nach dem Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) geförderten Anlagen ihre Produktion bis zum Auslaufen ihrer jeweiligen Förderdauer aufrecht erhalten, sodass auch in den KS Szenarien noch für eine gewisse Zeit Strom auf Basis von Biomasse produziert wird. Für alle Szenarien wird außerdem unterstellt, dass der Bedarf an reiner Wärme stark rückläufig ist bis auf 50 PJ/a in 2050°. Ebenfalls wird angenommen, dass eine Vergärung von Rest- und Abfallstoffen in Biogasanlagen sowie von Gülle in reinen Güllekleinanlagen politisch verankert ist. Der für die EEG Bestandsanlagen sowie für die Wärmebereitstellung und die Abfall- / Gülle-Nutzung notwendige Primärenergiebedarf wird vom nachhaltig verfügbaren Potenzial abgezogen. Das verbleibende Primärenergieangebot steht für die Modellierung der Bioenergieproduktion in BENSIM zur Verfügung (vgl. Abb. 4-2).

9 Die stark rückläufige Nachfrage nach reiner Wärme stellt ausdrücklich kein Szenarienergebnis dar. Vielmehr handelt es sich um eine Extremannahme für die Szenarienberechnung mit dem Ziel, möglichst viel des verfügbaren Biomassepotenzials für die Modellierung in BENSIM zur Verfügung zu stellen.





\* Die im Modellverbund berücksichtigte Biomasse wird in Deutschland entweder nahezu vollständig zur Produktion von Strom / Wärme oder Kraftstoffen eingesetzt. (REF stellt den Ausgangspunkt für die Szenarienbetrachtungen dar); \*\* Intensität von Umweltauflagen und vorsorgende Flächenpolitik sowohl in Deutschland wie auch international (Vorketten und Importe);  
Abkürzungen: SW: (gekoppelte) Strom- und Wärmebereitstellung; KS: Kraftstoff; BAU: Business as usual; N: hohe Nachhaltigkeitsanforderungen

Abbildung 4-1: Die vier Szenarien im Projekt „Meilensteine 2030“ (KS-BAU, KS-N, SW-BAU, SW-N)

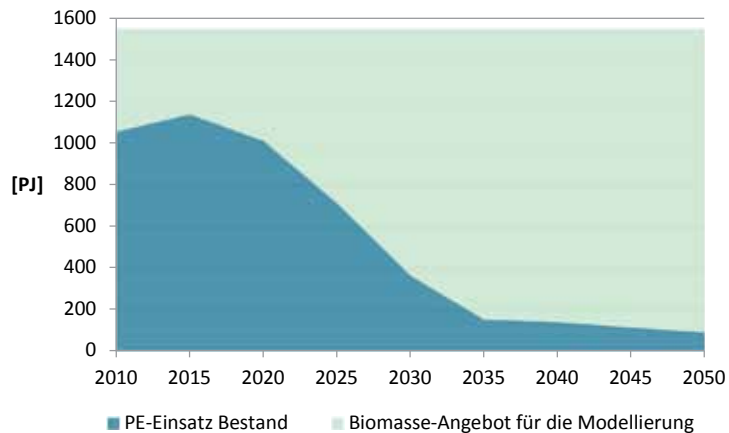


Abbildung 4-2: Unterstellte Entwicklung des Primärenergieeinsatzes an Biomasse der Bestandsanlagen (PE-Einsatz Bestand) und des für die Modellierung verbleibenden, maximalen Biomasseangebotes in Deutschland

Die Szenarien unterscheiden sich im Wesentlichen darin, dass in der Simulation der Entwicklung des Anlagenparks in BENSIM jeweils nur solche Technologien zugelassen werden, die entweder Strom in Kraft-Wärme-Kopplung (SW Szenarien) oder Kraftstoffe (KS Szenarien) produzieren. Der Kostenwettbewerb zwischen den Strom- / Wärme- und Kraftstofftechnologien bzw. reiner Wärmebereitstellung wird im Vorhaben nicht untersucht.

Für die SW-Szenarien wurde unterstellt, dass hinreichend Wärmesenken zur sinnvollen Verwendung der Abwärme existieren. Für die Berechnung der Kraftstoff-Szenarien wurde unterstellt, dass alle Kraftstoffe die THG-Minderungsziele der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RENEWABLE ENERGY DIRECTIVE, RED) erfüllen. Basierend auf (MAJER & OEHMICHEN, 2010) wird angenommen, dass auch Kraftstoffe der ersten Generation die RED-Ziele erfüllen, wenn bei deren Produktion Prozesswärme und Strom aus erneuerbaren Quellen eingesetzt wird. In der Modellierung wurden daher die Preise für Prozesswärme und Strom zur Produktion von Kraftstoffen der ersten Generation doppelt so hoch angenommen wie zur Produktion von Kraftstoffen der zweiten Generation. Es wird unterstellt, dass zu diesen Preisen erneuerbare Wärme und Strom bezogen werden kann.

#### Nachhaltigkeitsanforderungen

Hohe Nachhaltigkeitsanforderungen führen zu einer starken Verknappung der Flächen für die Produktion von Anbaubiomasse. Konkret gelten in den Nachhaltigkeitsszenarien folgende Annahmen zusätzlich zu BAU (vgl. hierzu auch Anhang A 4):

- Verstärker Schutz von Primärwäldern
- Bei Wald nur forstliche Nutzung erlaubt, keine Umwandlung zu Acker- oder Grünland
- Schutz von Flächen mit großer biologischer Vielfalt
- 17 % Anteil von Schutzgebieten an der terrestrischen Fläche
- Erhalt von kohlenstoffreichen Flächen. Keine Nutzung von Feuchtgebieten oder (Torf-)Moor
- Umbruchverbot von Grünland in der EU ab 2020

Außerdem wurden stärkere Anstrengungen in Forschung und Entwicklung unterstellt, so dass technologiespezifische Kostensenkungen durch exogenes Lernen (vgl. Fußnote 8) bereits nach drei Jahren erfolgen, während dies in den BAU-Szenarien erst nach zehn Jahren erfolgt.

Zudem unterscheiden sich die Szenarien in der globalen Biomassenachfrage für energetische Zwecke sowie in den Annahmen zur globalen Flächenbelegung durch Kurzumtriebsplantagen (KUP) oder schnellwachsende Gräser. Nachfrage und Flächenbelegung orientieren sich in den BAU- bzw. Nachhaltigkeitsszenarien am 6 °C bzw. am 2 °C-Szenario nach IEA-ETP ([IINAS, 2014] in Anlehnung an [IEA, 2014]).

In allen Szenarien steigt der Preis für CO<sub>2</sub>-Zertifikate auf 100 € pro Tonne in 2050, jedoch erfolgt der Anstieg in den Nachhaltigkeitsszenarien deutlich schneller (Preise und Preisentwicklung in Anlehnung an EUROPEAN COMMISSION, 2013).

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Bioenergiebereitstellung / Anlagenpark in Deutschland

#### 5.1.1 Ergebnisse der Szenarien

##### 5.1.1.1 Szenario KS-BAU

Bei den Kraftstoffen setzt sich im KS-BAU-Szenario (Abb. 5-1) Biodiesel aus Pflanzenölen deutlich als dominierende Technologieoption durch. Biomethan sowie Bioethanol aus Zucker oder Stärke kommen nur übergangsweise in geringem Umfang zum Einsatz. Eine Produktion von Kraftstoffen der zweiten Generation (aus Holz bzw. lignozellulosehaltigen Biomassen) findet quasi nicht statt. Der Flächenbedarf im Ausland für in Deutschland nachgefragte Kraftstoffe ist mit über 9 Mio. ha hoch. Dagegen nimmt der nationale Flächenbedarf über die Zeit ab und sinkt bis 2045 auf ca. 1,9 Mio. ha.

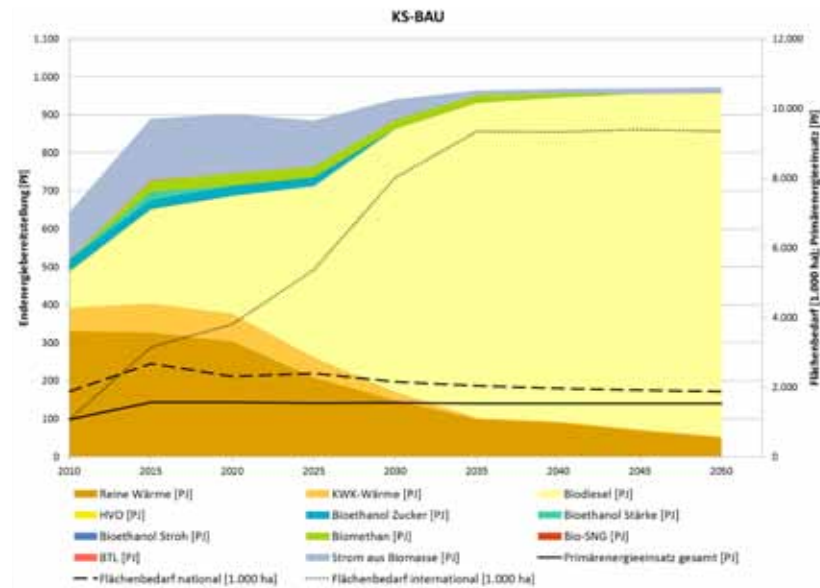


Abbildung 5-1: Entwicklung des Anlageparks im Szenario KS-BAU

##### 5.1.1.2 Szenario KS-N

Im KS-N-Szenario (Abb. 5-2) dominiert zunächst ebenfalls die Produktion von Biodiesel aus Pflanzenölen. Diese wird jedoch ab 2025 zunehmend durch Biomethan verdrängt. Die Produktion von Biomethan steigt auf über 900 PJ in 2050 an. Bioethanol aus Zucker oder Stärke kommen nur übergangsweise in ähnlich geringem Umfang wie im KS-BAU-Szenario zum Einsatz. Gegen Ende des Simulationszeitraums setzt ein Zubau an Anlagen zur Produktion von Bioethanol aus Stroh sowie Bio-SNG aus Holz ein.

Der internationale Flächenbedarf steigt bis 2035 aufgrund der steigenden Biodieselproduktion stark an. Aufgrund der Verdrängung von Biodiesel durch Biomethan sinkt der internationale Flächenbedarf ab 2035 deutlich, während der nationale Bedarf zunächst langsam, gegen Ende deutlicher bis auf fast 4 Mio. ha ansteigt. Insgesamt sinkt der internationale Flächenbedarf stärker, als der nationale Bedarf steigt. Zurückzuführen ist dieser Effekt auf den höheren Flächenertrag von Biomethan aus Mais gegenüber Biodiesel aus Pflanzenöl.

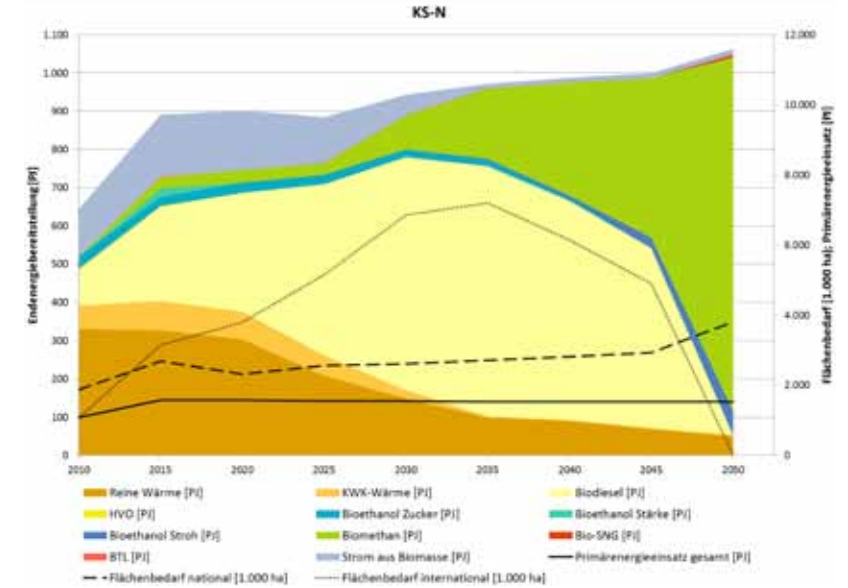


Abbildung 5-2: Entwicklung des Anlageparks im Szenario KS-N

### 5.1.1.3 Szenario SW-BAU

Im SW-BAU-Szenario (Abb. 5-3) läuft die Biokraftstoffproduktion bis 2025 aus. Die reine Wärmebereitstellung aus Heizwerken und Einzelraumfeuerungen ist wie in allen Szenarien annahmebedingt rückläufig. Dagegen findet ein starker Zuwachs bei der Wärmebereitstellung durch verstärkten KWK-Einsatz statt. Die Strombereitstellung aus großen Holz-HKW nimmt langsam ab und läuft bis 2045 vollständig aus. Strom aus Biogas wird über den gesamten betrachteten Zeitraum bereitgestellt. Nach einem anfänglichen Zuwachs von ca. 54 PJ in 2010 auf knapp 200 PJ in 2025 setzt ein Rückgang der Produktion auf ca. 90 PJ in 2050 ein. Während die Strombereitstellung aus Pflanzenöl-BHKW in 2010 praktisch keine Rolle spielt, steigt diese bis 2050 stark an und verdrängt zunehmend die Stromproduktion aus Biogas. Biomethan spielt als Brennstoff für die Strombereitstellung nur zwischenzeitlich eine untergeordnete Rolle. Eine Stromproduktion aus Holz-ORC-Anlagen oder Holz-Vergasungsanlagen findet praktisch nicht statt. Szenarien-bedingt erfolgt eine geringe Strom- und Wärmebereitstellung aus Rest- und Abfallstoffen über den gesamten Betrachtungszeitraum. Der nationale Flächenbedarf steigt bis 2020 leicht an und fällt bis 2050 in etwa auf das Niveau von 2010. Der internationale Bedarf steigt, bedingt durch den starken Ausbau von Pflanzenöl-BHKW, ab 2020 stark an bis auf ca. 8 Mio. ha in 2050.

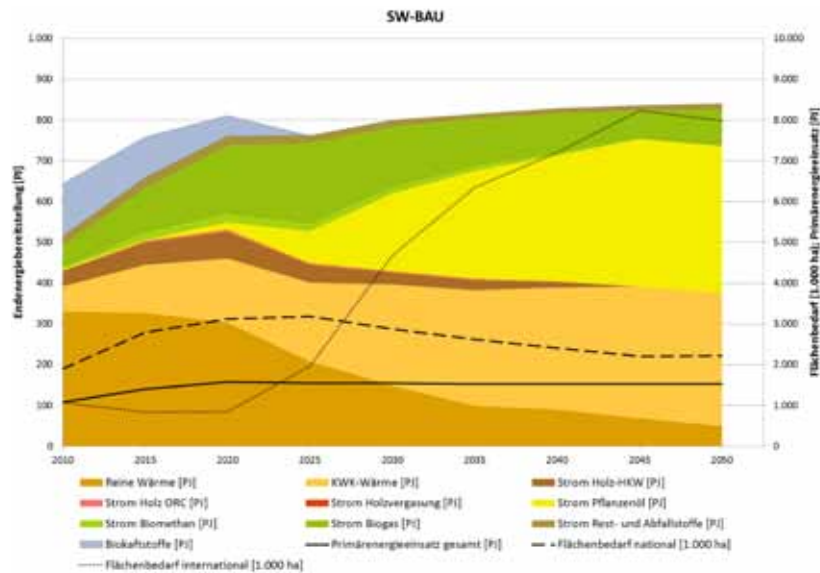


Abbildung 5-3: Entwicklung des Anlageparks im Szenario SW-BAU

### 5.1.1.4 Szenario SW-N

Im SW-N-Szenario (Abb. 5-4) wird die Stromproduktion deutlich von den Biogasanlagen dominiert. Hier erfolgt ein Ausbau von ca. 54 PJ in 2010 auf ca. 520 PJ in 2050. Die Strombereitstellung aus großen Holz-HKW nimmt ähnlich wie im SW-BAU-Szenario langsam ab und läuft bis 2045 vollständig aus. Strom aus Pflanzenöl-BHKW nimmt zwischenzeitlich einen signifikanten Anteil (bis zu 30 %) an der Gesamtstromproduktion ein, kann sich aber, im Gegensatz zum Szenario SW-BAU, nicht durchsetzen und die Produktion läuft ebenfalls bis 2045 aus. Eine Stromproduktion aus Holz-ORC-Anlagen findet praktisch nicht statt. Im Gegensatz zum SW-BAU-Szenario setzen sich aber ab 2035 zunehmend Holzvergasungstechnologien zur Strombereitstellung durch und erreichen mit einer Produktionsmenge von etwa 85 PJ einen Anteil von ca. 13 % an der gesamten Stromproduktion. Ebenfalls erfolgt szenarien-bedingt eine geringe Strom- und Wärmebereitstellung aus Rest- und Abfallstoffen über den gesamten Betrachtungszeitraum.

Mit dem Ausbau der Stromproduktion aus Biogas steigt auch der nationale Flächenbedarf stark an, mit einem Maximum von rund 4 Mio. ha in 2045. Der zwischenzeitliche Zubau von Pflanzenöl-BHKW geht mit einer Zunahme des internationalen Flächenbedarfs einher. Mit dem Auslaufen der Stromproduktion aus Pflanzenöl-BHKW sinkt auch der Flächenbedarf international auf null.

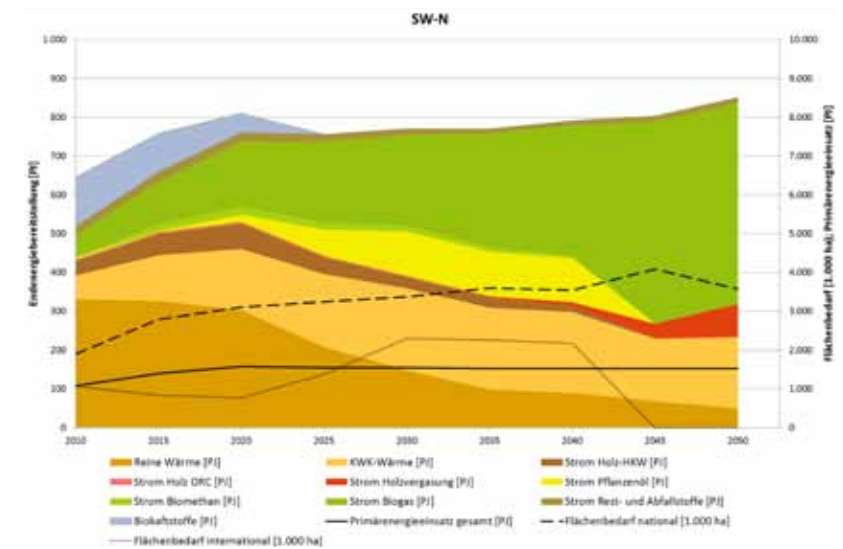


Abbildung 5-4: Entwicklung des Anlageparks im Szenario SW-N

### 5.1.2 Sensitivitäten

Die Ergebnisse aus der Simulation in BENSIM wurden durch umfassende Sensitivitätsanalysen ergänzend untersucht. Die relevantesten Sensitivitäten werden im folgenden Abschnitt dargestellt. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Abbildungen des gesamten Anlagenparks sind hier ausschließlich die in BENSIM modellierten Technologien dargestellt. Vor dem Hintergrund, dass Kraftstoffe auf der Basis von Weizen oder Pflanzenöl unter Umständen die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele der RED nicht erfüllen könnten, wurde für die Kraftstoffszenerarien in einem Sub-Szenario KS-BAU-B untersucht, welchen Einfluss ein Verbot dieser Kraftstoffe auf die Entwicklung des Anlagenparks hätte. Dies wurde durch eine starke Verteuerung von Weizen und Raps umgesetzt. Im Ergebnis zeigt sich für das KS-BAU-B-Szenario ein starker Zubau von Biomethan mit einem Anteil von 100 % Biomethan an der Biokraftstoffbereitstellung bereits ab etwa 2025 (Abb. 5-5).

Ebenfalls simuliert wurde ein Verbot von Pflanzenöl-BHKW im SW-BAU-Szenario (Sub-Szenario SW-BAU-B, vgl. Abbildung 5-6). Gegenüber dem Szenario SW-BAU vollzieht sich bei einem indirekten Verbot von Pflanzenöl-BHKW (ebenfalls umgesetzt über eine starke Verteuerung der Rohstoffe) ein deutlicher Zuwachs bei der Strombereitstellung aus Biogasanlagen.

Im Folgenden ist der Einfluss der Änderung ausgewählter Modellierungsparameter (Volllaststunden, Holzpreisentwicklung) auf alle vier Extremszenarien und die beiden Sub-Szenarien (Rohstoffbegrenzung, siehe Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6) dargestellt.

Als weiterer Parameter wurden die **Volllaststunden** in den Szenarien der Strom- und Wärmeerzeugung variiert (vgl. Abb. 5-7). Technologieoptionen mit niedrigeren Investitionskosten bekommen einen Vorteil bei niedrigen Volllaststunden (2.000 h/a), wengleich sich die Zusammensetzung des Anlagenparks gegenüber der Ausgangssituation mit 5.000 h/a nicht grundlegend ändert. Im BAU-Szenario dominiert Strom aus Pflanzenöl vor Strom aus Biogas, im Nachhaltig-Szenario findet eine Verschiebung statt und die Stromproduktion aus Pflanzenöl wird teilweise verdrängt durch die Stromproduktion aus Biogas. Vergasungstechnologien können sich bei niedrigen Volllaststunden nicht durchsetzen. Eine Erhöhung der Volllaststunden auf 8.000 h/a hat auf das SW-BAU-Szenario nur geringe Auswirkungen. In dem SW-BAU-B und dem SW-N-Szenario führt eine Erhöhung dagegen dazu, dass sich die Holzvergäsung in nennenswertem Maße durchsetzt.

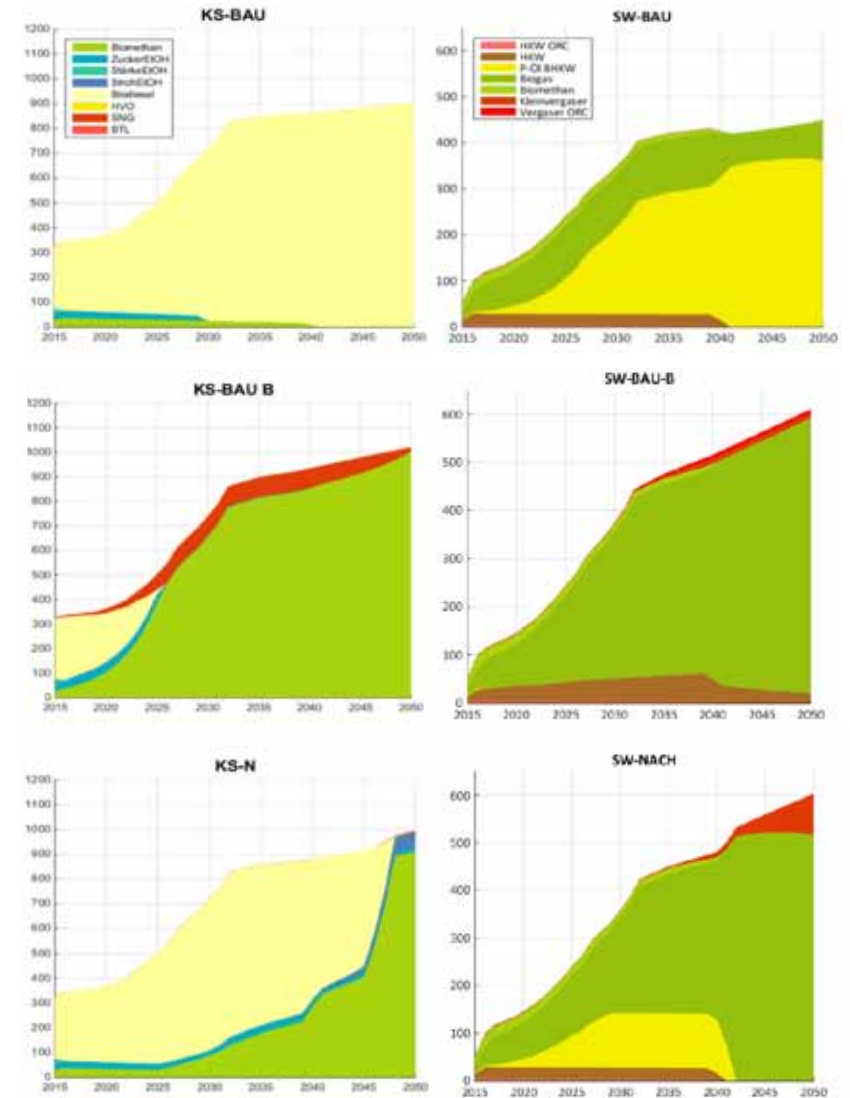


Abbildung 5-5: Darstellung der in BENSIM modellierten Basisszenarien und des KS-BAU-B-Szenarios für den Kraftstoffsektor. Werte in PJ (Endenergiebereitstellung).

Abbildung 5-6: Darstellung der in BENSIM modellierten Basisszenarien für den Strom- / Wärme-Sektor. Werte in PJ (Endenergiebereitstellung).



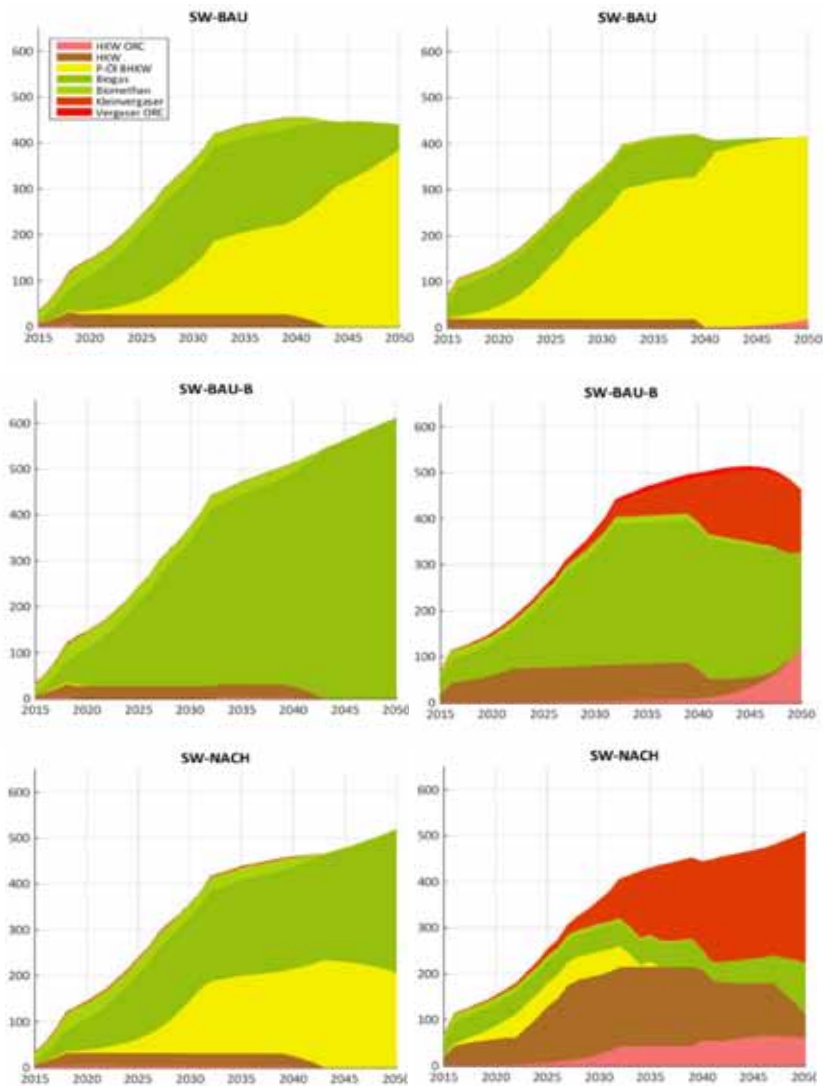


Abbildung 5-7: Einfluss der Volllaststunden (VLH) auf die Strom- / Wärme-Szenarien. Links: VLH 2.000 h/a, Rechts: 8.000 h/a. In den Basissszenarien wurde mit 5.000 h/a für alle Technologien gerechnet. Werte in PJ (Endenergiebereitstellung).

Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 zeigen den Einfluss unterschiedlicher **Holzpreisentwicklungen** auf die Modellierung. Wird der Holzpreis konstant auf dem Startwert von 2010 fixiert, führt dies in den KS-BAU-B- und KS-N-Szenarien zu einem moderaten Ausbau von SNG (Abb. 5-8).

Wird in den SW-Szenarien die Kopplung des Holzpreises an den Weizenpreis aufgehoben und nur das Vorhandensein einer Angebotskurve unterstellt (vgl. Anhang A 4.6), erhöht sich der Anteil holzbasierter Strombereitstellung im Nachhaltig-Szenario. Wird zusätzlich auch die Angebotskurve weggelassen (und somit der Holzpreis konstant auf dem Startwert von 2010 fixiert), ist dieser Effekt noch stärker (Abb. 5-9). Heizkraftwerke, ORC-Heizkraftwerke und Kleinvergaser setzen sich in diesem Fall stark in der Simulation durch. In den BAU-Szenarien setzen sich Vergasungstechnologien auch unter der Annahme konstant bleibender Holzpreise nicht durch.

Ergänzend wurde analysiert, unter welchen Rahmenbedingungen insbesondere holzbasierte Biokraftstoffe (BtL, Bio-SNG) in größerem Umfang bereitgestellt werden würden. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass dies erreicht wird, wenn beispielsweise die Produktion von Kraftstoffen der ersten Generation in Anlehnung an national verfügbare Rohstoffpotenziale begrenzt wird (unter der hypothetischen Annahme, dass sich Deutschland als „Insel“ aus rein nationalen Quellen versorgt), oder aber wenn nicht-lignozellulosehaltige Rohstoffe deutlich teurer werden, während gleichzeitig die Preise für lignozellulosehaltige Rohstoffe konstant bleiben oder sinken. Rohstoffbegrenzungen auf national ver-



Abbildung 5-8: Einfluss von konstanten Holzpreisen auf die Kraftstoffszenarien. Werte in PJ (Endenergiebereitstellung).

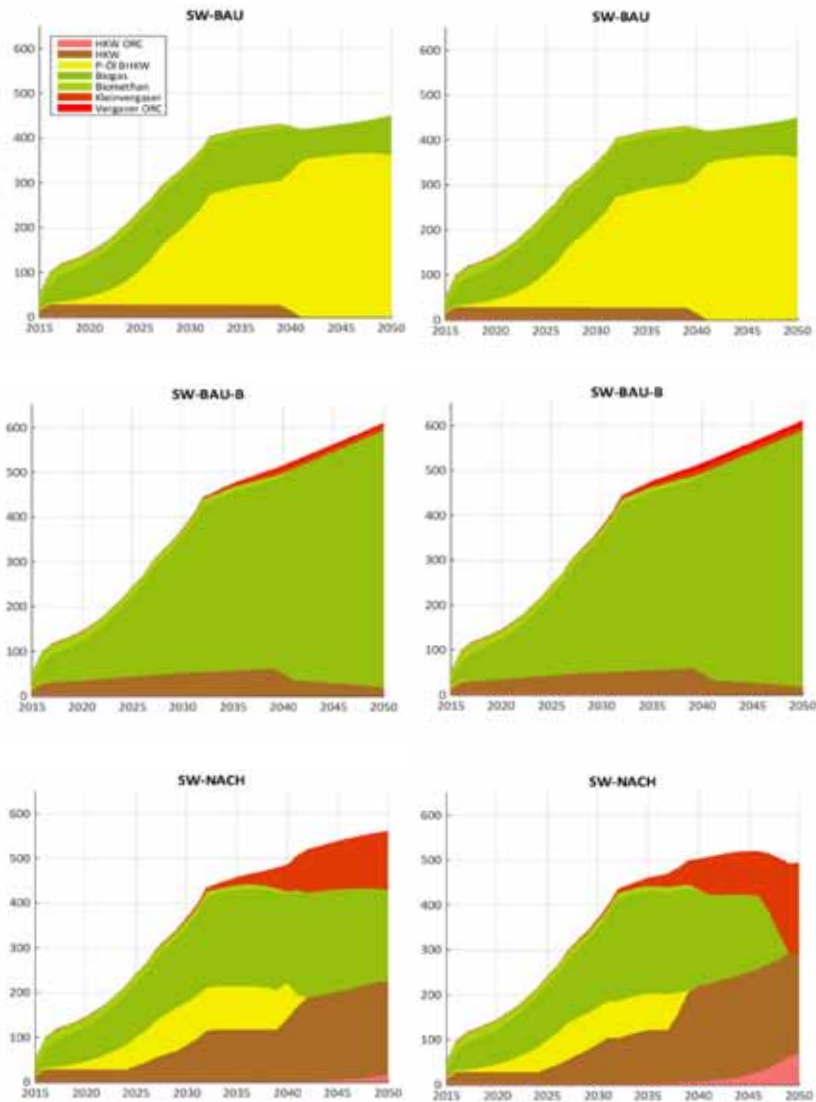


Abbildung 5-9: Einfluss von konstanten Holzpreisen auf die Strom / Wärme-Szenarien. Links: mit erhaltener Holzangebotskurve, Rechts: ohne Holzangebotskurve. Werte in PJ (Endenergiebereitstellung).

fügbare Potenziale führen im KS-BAU-B-Subszenario dazu, dass sich Bio-SNG neben Biomethan etablieren kann, während in den Szenarien KS-BAU und KS-N Biodiesel teilweise durch Biomethan substituiert wird. In den Strom- / Wärme-Szenarien werden insbesondere im BAU-Szenario Pflanzenöl-BHKW zugunsten von Biogas-BHKW und Holzheizkraftwerken verdrängt. Im BSW-BAU-B-Szenario führt eine Rohstoffbegrenzung zu einer stärkeren Stromproduktion aus Holz-HKW und Kleinvergasern, während sich Pflanzenöl-BHKW nicht behaupten können. Steigen Rohstoffpreise für nicht-lignozellulosehaltige Biomasse stark an während Preise für lignozellulosehaltige Rohstoffe konstant bleiben oder sinken, haben Strohethanol und Bio-SNG aus Holz den Vorrang. Für Strohethanol wird dabei jedoch vorausgesetzt, dass sich die relativ ambitionierten Annahmen zu den Wirkungsgraden für Strohethanol realisieren lassen und dass aufgrund mangelnder Nutzungskonkurrenz die Strohpreise konstant bleiben. Bio-SNG wird in der Modellierung vor BTL bevorzugt, obwohl für Bio-SNG im Vergleich zu BTL höhere Transport- und Infrastrukturkosten für die Bereitstellung in der Modellierung bereits berücksichtigt werden (in Anlehnung an IEA, 2013: 18f.) und die hier angenommenen Investitionskosten der BTL-Anlagen lediglich um ca. 11 % über den Investitionskosten für Bio-SNG liegen. Der deutlich bessere Wirkungsgrad von Bio-SNG (die Prozessschritte zur Bereitstellung von flüssigen Energieträgern aus Methan entfallen) und die niedrigeren Investitionskosten führen zur Vorteilhaftigkeit von SNG gegenüber BTL. Letzteres kann sich daher in der Modellierung nur durchsetzen, wenn die jährlichen Ausbaubegrenzungen für Bio-SNG erreicht sind.

**Aus den BENSIM-Modellläufen und insbesondere den Sensitivitätsanalysen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen.**

Die Szenarien reagieren generell sehr sensitiv auf Rohstoffpreisentwicklungen und ebenfalls sensitiv auf Rohstoffbegrenzungen. Bei der Biokraftstoffproduktion machen die Rohstoffkosten einen großen Anteil der gesamten Bereitstellungskosten aus, v. a. bei den Kraftstoffen der 1. Generation. Deswegen spielen auch Lerneffekte bei den Investitionskosten nur eine untergeordnete Rolle.

Bei der Strom- und Wärmeerzeugung sind die Rohstoffkosten weniger prägend. Da die unterschiedlichen Strombereitstellungsoptionen jedoch ähnliche Bereitstellungskosten aufweisen, hat die Entwicklung der Rohstoffpreise dennoch einen starken Einfluss auf die Entwicklung des Anlagenparks. Da die Technologien bereits relativ ausgereift sind, sind keine großen Kostensenkungen durch Lerneffekte zu erwarten.

Die THG-Emissionen bzw. die THG-Minderungen zwischen den Technologie-Optionen sind sehr ähnlich, weshalb unterschiedliche THG-Kosten nur einen geringen Einfluss auf die Entwicklung des Anlagenparks haben. Bei der Strom- / Wärmeerzeugung hat Wärmeproduktion in dieser Studie allerdings eine vergleichsweise hohe THG-Gutschrift, weswegen Anlagen mit einer hohen Wärmeauskopplung bei höheren THG-Kosten begünstigt sind.

Aufgrund insgesamt großer Schwankungsbreiten einzelner Anlagenparameter bzw. Auslegung von Anlagenkomponenten und szenarienbedingt festgelegten Rohstoffpreisentwicklungen mit jeweils großem Einfluss auf die Bereitstellungskosten sind die Ergebnisse als

Trends bzw. im Verhältnis untereinander zu sehen. Eine absolute Aussage über zum Beispiel die Höhe der Bereitstellungskosten einer Anlage oder Technologie im Jahr 2050 ist nicht gegeben. Auch sind die Einzeltechnologien der Strom- und Kraftstoffszenarien nicht miteinander vergleichbar sondern nur die jeweils in den Szenarien ermittelten Reihungen. Die ausgewählten Technologien sowie die dargelegten Zahlen und Trends sind im Kontext des Projektverbundes „Meilensteine 2030“ zu interpretieren.

### 5.1.3 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Bereitstellungskosten der betrachteten Technologien werden insbesondere durch die Entwicklung der Rohstoffpreise und Nebenprodukterlöse bestimmt. CO<sub>2</sub>-Preise haben nur einen geringen Effekt auf die Modellierungsergebnisse, weil sich die gewählten Modellfälle innerhalb der Nutzungspfade nur geringfügig unterscheiden. Lernraten spielen ebenfalls eine untergeordnete Rolle. Die Bereitstellung von Bioenergie aus Reststoffen ist ausbaufähig aber begrenzt. Pflanzenölbasierte Bioenergieformen sind aktuell und auf absehbare Zeit ökonomisch vorteilhaft, gefolgt von Biogas / Biomethan und – in der Mittelfristperspektive - Bioenergieformen, die auf Basis von Biomassevergasung bereit gestellt werden. Diese Präferenzen können in der Praxis verschoben werden, wenn

- einzelne Energieträger durch die gegebenen oder künftigen Randbedingungen nicht mehr zulässig sind (z. B. pflanzenölbasierter Biodiesel)
- einzelne Energieträger zusätzliche Qualitäten aufweisen, die für bestimmte Anwendungsfelder zwingend notwendig sind, und daher entsprechend umfassend und dauerhaft forciert werden (z. B. BtL-Kerosin als Flugkraftstoff).

Die Reihung der Vorteilhaftigkeit findet sich sowohl in den Strom- als auch in den Kraftstoffszenarien. Einige der Technologie- beziehungsweise Rohstoffoptionen sind damit sektorübergreifend relevant.

Der Wärmebereich wurde mit dem verwendeten Modellansatz nur am Rande betrachtet – hier dürften jedoch insbesondere holzbasierte Verbrennungstechnologien ökonomisch vorteilhaft bleiben.

Die Sensitivitätsberechnungen zeigen:

- Wenn die Preissteigerungen für Holzrohstoffe in den kommenden Jahrzehnten deutlich unter denen von Agrarrohstoffen bleiben, können vergasungsbasierte Bioenergieträger konkurrenzfähig werden, jedoch in erster Linie nicht Fischer-Tropsch (FT) Kraftstoffe (BtL), sondern, eine entsprechende Nachfrage vorausgesetzt, Bio-SNG.
- Wenn die Konversionsanlagen künftig einer zunehmend flexiblen Fahrweise unterworfen sind, ergeben sich wegen geringeren Investitionskosten Kostenvorteile für biogas- und pflanzenölbasierte Bioenergieträger.
- Wenn die Erlöse für Nebenprodukte künftig höher ausfallen, ergeben sich Vorteile für pflanzenölbasierte Bioenergieträger und für KWK-Optionen mit hoher Wärmenutzung in den Stromszenarien.

Die Auswirkungen, die die an einer nationalen Bioenergiestrategie orientierten Modellergebnisse auf die Rohstoffpreise und das Energiesystem samt Energiepreisen (und damit verbunden z. B. auch Anlagenflexibilisierung) haben, wurden innerhalb dieser Studie nicht quantifiziert, die möglichen Rückkopplungen und damit die Vorteilhaftigkeit von verschiedenen Technologien werden qualitativ in Kap. 5.8 diskutiert.

## 5.2 Ressourcen und Märkte 2050

Die nötigen Ressourcen für eine vorgegebene Biokraftstoffnachfrage werden mit Hilfe des allgemeinen Gleichgewichtsmodells MAGNET im Zusammenspiel mit den Modellen BEN-SIM und LandSHIFT ermittelt. Dabei wird die Biokraftstoffnachfrage in den gesamtwirtschaftlichen Kontext eingebettet.

Dieser Abschnitt legt zunächst die wichtigsten Treiber des allgemeinen Gleichgewichtsmodells MAGNET für dieses Vorhaben dar. Es folgt die Spezifikation der Szenarien-Ausgestaltung in MAGNET. Auf dieser Grundlage aufbauend, werden die Ergebnisse dargestellt, die Robustheit des Modells anhand von Sensitivitätsanalysen getestet und erste Schlussfolgerungen gezogen.

### 5.2.1 Wichtige Treiber in MAGNET

MAGNET basiert auf der GTAP-Datenbank Version 8 (NARAYANAN et al., 2012), die die gesamte Weltwirtschaft in 2007 monetär, d. h. in Werten ausdrückt. Sektoren und Regionen interagieren miteinander auf Basis von ökonomischen Theorien zu allgemeinen Gleichgewichtsmodellen. Die Projektionen basieren auf Annahmen über die zukünftige Entwicklung des Wirtschaftswachstums und der Bevölkerung. Wirtschaftswachstum drückt sich in Form von technischem Fortschritt aus, der die Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen Produktivität aller Sektoren beschreibt. Zusätzliche Annahmen werden für Preise fossiler Energieträger, die Produktivitätsentwicklung im Agrarbereich und die Konversion von Biomasse in Biokraftstoff getroffen.

Die Entwicklungen des Bruttoinlandproduktes (BIP), als Maß für das Wirtschaftswachstum, basieren auf (USDA ERS, 2013) und sind in Abbildung 5-10 dargestellt. Während in Europa und den USA von einem geringen Wachstum ausgegangen wird, wächst die Wirtschaft im Rest der Welt, insbesondere China und Indien, stark.

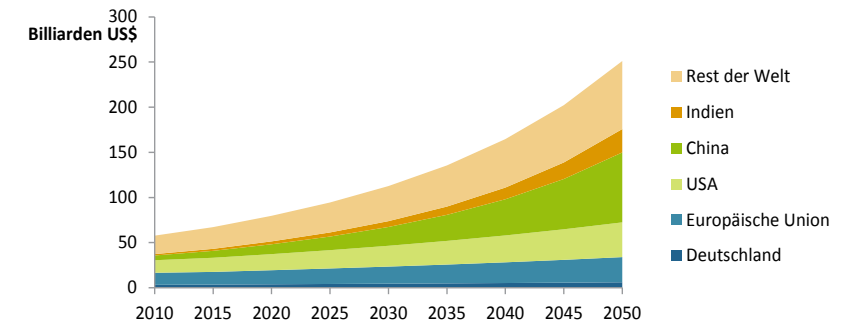


Abbildung 5-10: Entwicklung des weltweiten BIP bis 2050. Quelle: USDA ERS, 2013.



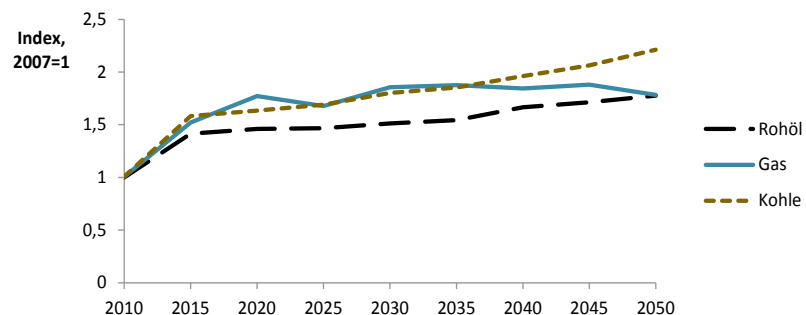


Abbildung 5-11: Entwicklung der Weltmarktpreise für Rohöl, Gas und Kohle. Quelle: EUROPEAN COMMISSION, 2013.

Die exogenen Ertragssteigerungen für landwirtschaftliche Produkte, die unter anderem Fortschritt durch Züchtung umfassen, sind an (GÄRTNER et al., 2014) angelehnt, werden aber durch das Modell selbst und die Modellkopplung mit LandSHIFT beeinflusst. Für die Konversion von Biomasse in Kraftstoff, wird auf DBFZ-Expertenschätzungen zurückgegriffen.

### 5.2.2 Ausgestaltung der Szenarien in MAGNET

Die einzelnen Szenarien unterscheiden sich im Wesentlichen durch die geänderte Nachfrage nach Biomasse zur Energiegewinnung in Form und Menge unter Annahme unterschiedlicher Nachhaltigkeitsaspekte. In MAGNET wird vorgegeben, wie viel Biokraftstoffe der ersten und zweiten Generation ein Land bzw. eine Region konsumiert (global von [IINAS,

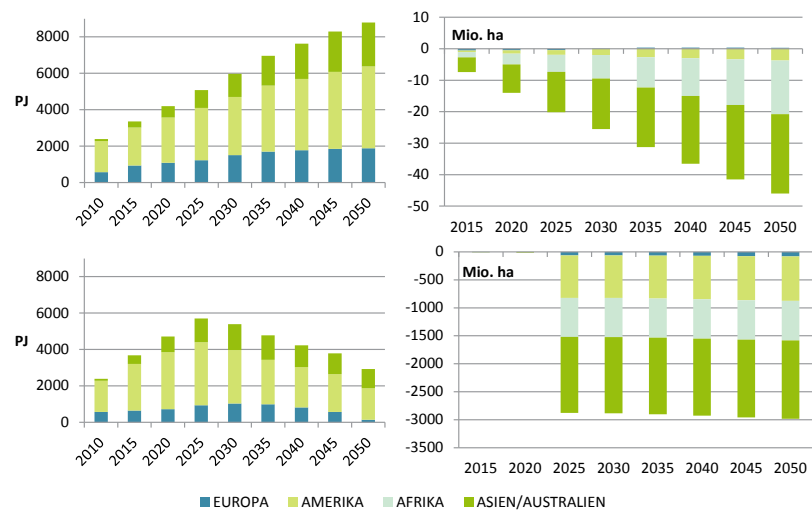


Abbildung 5-12: Globale Nachfragemenge an 1. Generation Biokraftstoff in PJ (links); Reduktion der maximal verfügbaren Agrarfläche im Vergleich zu 2010 in Mio. ha (rechts); für Szenario KS-BAU (oben); für Szenario KS-N (unten) (Hinweis: stark unterschiedliche Achsenskalierungen). Quelle: Projektinterne Festlegungen.

2014] auf Basis [IEA, 2014] und für Deutschland durch Simulationen mit BENSIM). Die Nachfrage nach Biokraftstoffen erster Generation wird in Form von Petajoule (PJ) an MAGNET gegeben. Als Rohstoffe dienen hierfür Ölsaaten, Weizen, Zuckerrohr und -rübe sowie Grobgetreide. Die Mengen an Biokraftstoffen der zweiten Generation und an Biomasse zur Strom / Wärmegewinnung werden in Form von benötigten Flächen an MAGNET exogen vorgegeben. Dabei gilt die Annahme, dass diese Biomasse vor Ort produziert und konsumiert wird und somit nicht handelbar ist. Zusätzlich werden in den Nachhaltigkeitsszenarien Flächen nach 2020 unter Schutz gestellt und können so landwirtschaftlich nicht mehr genutzt werden. In MAGNET selbst werden diese beiden Aspekte durch eine Reduktion der maximal verfügbaren Agrarfläche pro Land bzw. Region simuliert.

Tabelle 5-1: Maximale frei verfügbare Agrarfläche in Deutschland in Mio. ha für die 4 Szenarien (fixierte Flächen zur energetischen Nutzung abgezogen). Quelle: BENSIM- und LandSHIFT-Ergebnisse.

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
KS-BAU	15.5	15.0	15.1	15.3	15.9	16.2	16.3	16.3	16.3
KS-N	15.5	15.0	15.1	15.3	15.6	15.5	15.0	14.2	12.6
SW-BAU	15.5	13.4	13.1	13.3	13.5	13.8	14.3	15.1	15.6
SW-N	15.5	13.4	13.2	13.3	13.2	13.0	12.4	11.8	12.1

Tabelle 5-2: Deutsche Nachfrage nach erster Generation Biokraftstoffe in PJ. Quelle: BENSIM-Ergebnisse.

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
KS-BAU	125	291	326	436	651	822	852	881	901
KS-N	125	291	326	471	629	673	584	383	0
SW-BAU	125	167	83	-	-	-	-	-	-
SW-N	125	167	83	-	-	-	-	-	-

Global werden für das SW-BAU- bzw. das SW-N-Szenario die gleichen Annahmen wie für das KS-BAU- bzw. das KS-N-Szenario verwendet. Der Unterschied basiert ausschließlich auf den jeweiligen Annahmen für Deutschland; siehe hierzu Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2.

Die Flächen, die in 2010 durch Biogasmais belegt waren, wurden zusätzlich von der in Deutschland maximal verfügbaren landwirtschaftlichen Fläche abgezogen, sodass im KS-BAU-Szenario eine Erhöhung der Flächen in Deutschland über die Perioden stattfindet, getrieben durch das Auslaufen der Biogasanlagen. Im Gegensatz zu den KS-Szenarien wird in den SW-Szenarien die gesamte Bioenergienachfrage durch blockieren von Flächen simuliert.

In der EU wird in den beiden Nachhaltigkeitsszenarien zusätzlich ein Grünlandumbruchverbot ab 2020 eingeführt, sodass ab 2020 Grünlandflächen nicht mehr in Ackerflächen umgewandelt werden können.

### 5.2.3 MAGNET-Ergebnisse

Zunächst wird ein Überblick der Wirtschaft im KS-BAU-Szenario gegeben. Danach folgt ein Vergleich der Szenarien.

### 5.2.3.1 KS-BAU-Szenario

Das KS-BAU-Szenario beschreibt eine Welt, in der eine hohe Nachfrage nach erster Generation Biokraftstoffen – insbesondere für Deutschland – besteht und verschiedene Landtypen in Agrarflächen umgewandelt werden können. Die globale Produktion von Gütern aller Art vervierfacht sich bis 2050 gegenüber 2010. Dahingegen verzeichnet die Produktion von primären Agrarprodukten nur ein Wachstum von 200 %. Die durch MAGNET berechneten Produktionssteigerungen der primären Agrargüter pro Kultur, Region und Zeitabschnitt wurden als Inputdaten an LandSHIFT weitergegeben. Als Startwert dienen hierfür die Produktionsmengen aus (FAO 2013). Im Bereich der Agrarkulturen, die auch als Rohstoff zur Biokraftstoffproduktion dienen, steigt insbesondere die Produktion der Ölsaaten prozentual überdurchschnittlich (siehe Abb. 5-13).

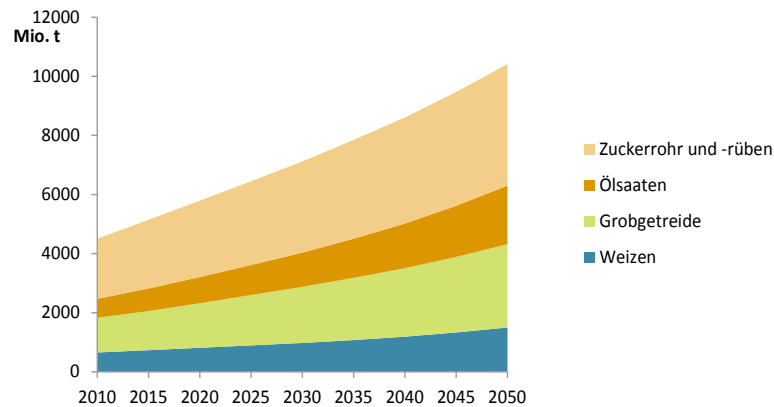


Abbildung 5-13: Weltweite Produktion in Mio. Tonnen im KS-BAU-Szenario für ausgewählte Kulturen. Quelle: Eigene MAGNET-Berechnungen; Startwert in 2007 von (FAO, 2013).

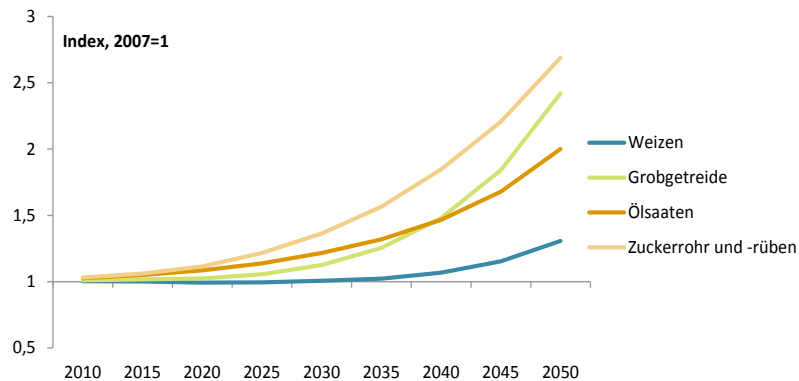


Abbildung 5-14: Durchschnittliche reale Preisentwicklung weltweit im KS-BAU-Szenario für ausgewählte Agrarprodukte als Index mit 2007=1. Quelle: Eigene MAGNET Berechnungen.

Haupttreiber der Entwicklung sind das regionsspezifische Wachstum der Wirtschaft und der Bevölkerung. Diese erhöhen die weltweite Nachfrage – insbesondere nach Nahrungs- und Futtermitteln – und somit die Produktion. Um ein neues Gleichgewicht zu erreichen, verändern sich auch die Preise sowohl für die produzierten Güter als auch die eingesetzten Produktionsfaktoren und Vorleistungsgüter. Die Änderungen der realen Weltmarktpreise für ausgewählte Kulturen sind in Abbildung 5-14 dargestellt. Bis 2050 steigen die realen Preise für die Produkte mit Ausnahme von Weizen auf mehr als das Doppelte im Vergleich zu 2010.

Der Konsum pflanzlicher Agrarprodukte steigt global zwischen 2010 und 2050 um etwas mehr als 150 %. Dabei verzeichnen die Ölsaaten mit einem Plus von 250 % das höchste Wachstum. Dieses überdurchschnittliche Wachstum ist auf die zunehmende Nachfrage nach Biodiesel zurück zu führen. Die Verwendung von Ölsaaten in Form von Biodiesel an der gesamten Verwendung steigt von 7 % in 2010 auf 15 % in 2050 (Abb. 5-15).

Die Szenarien-Ergebnisse machen deutlich, dass in Zukunft landwirtschaftliche Nutzfläche immer stärker zu einem limitierenden Produktionsfaktor wird, was sich weltweit durch stark steigende Bodenpreise ausdrückt. Deutlich wird auch, dass sich diese Preissteigerungen nicht nur auf Industrieländer beschränken, sondern besonders hoch in Afrika, Asien und Südamerika ausfallen.

Allerdings verbleiben die absoluten Bodenpreise in diesen Regionen auf einem wesentlich niedrigeren Niveau als in Europa und Nordamerika. Steigende Preise sind ein Anreiz für Forschung und Entwicklung und tragen so zum technischen Fortschritt bei. Dieser spiegelt sich in den Erträgen der Ackerkulturen wider, die weltweit durchschnittlich jährlich um 0,8 % zwischen 2010 und 2050 steigen. Details sind im nächsten Abschnitt in Tabelle 5-3 zu finden.

Deutschland – wie auch andere entwickelte Länder – sind bereits auf einem hohen Produktionsniveau und somit liegen auch die Wachstumsraten in allen Sektoren unter dem globalen Durchschnitt. In Deutschland steigt die gesamte Produktion um etwa 70 %. Die primäre Agrarproduktion kann sogar ein Wachstum von 80 % verzeichnen, was auf den überdurchschnittlich hohen Biomassebedarf durch die Kraftstoffnachfrage zurückzuführen ist. Innerhalb der Ackerkulturen, die auch als Rohstoffe zur Biokraftstoffproduktion ver-

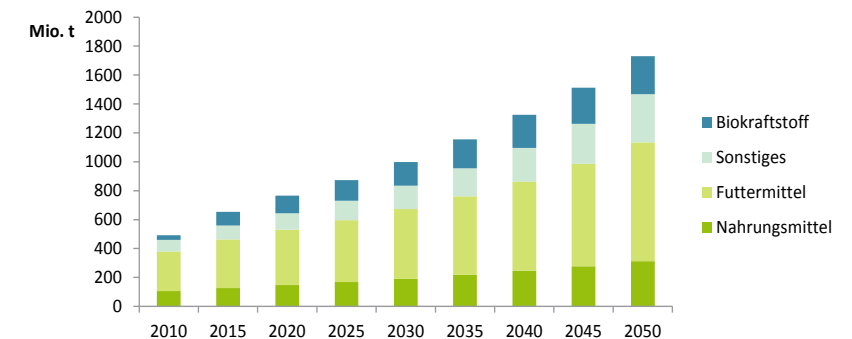


Abbildung 5-15: Globaler Konsum von Ölsaaten (Millionen Tonnen) nach Endverwendung im Szenario KS-BAU. Quelle: Eigene MAGNET-Berechnungen.

wendet werden, verzeichnen die Ölsaaten das größte Wachstum und die Produktion steigt um mehr als das Doppelte zwischen 2010 und 2050.

Die reale Preisentwicklung für heimisch produzierte Rohstoffe zur Biokraftstoffgewinnung ist in Abbildung 5-17 beschrieben. Diese Ergebnisse in Kombination mit den Importpreisen dienen als Input für BENSIM. Die Preise in Deutschland entwickeln sich im Vergleich zur Entwicklung auf dem Weltmarkt relativ moderat. Da in Deutschland die Bevölkerung rückläufig ist und das Wirtschaftswachstum unterdurchschnittlich ansteigt, fallen die heimischen Preise zunächst und steigen erst ab 2035 leicht an. Der Preis für Boden steigt über den Zeitabschnitt kontinuierlich an, ab 2035 stark, siehe auch Tabelle 5-4 im nächsten Abschnitt. Die durchschnittliche jährliche Ertragssteigerung der Ackerkulturen liegt in Deutschland mit 0,85 % zwischen 2010 und 2050 etwas über dem weltweiten Durchschnitt.

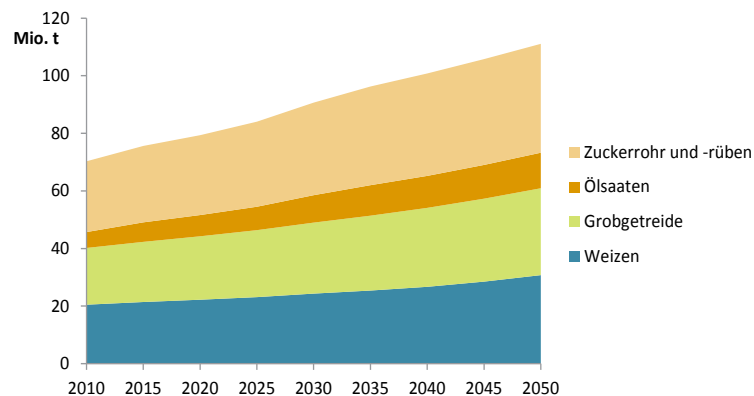


Abbildung 5-16: Produktion in Deutschland in Mio. Tonnen im KS-BAU-Szenario für ausgewählte Kulturen. Quelle: Eigene MAGNET-Berechnungen; Startwert in 2007 von (FAO, 2013).

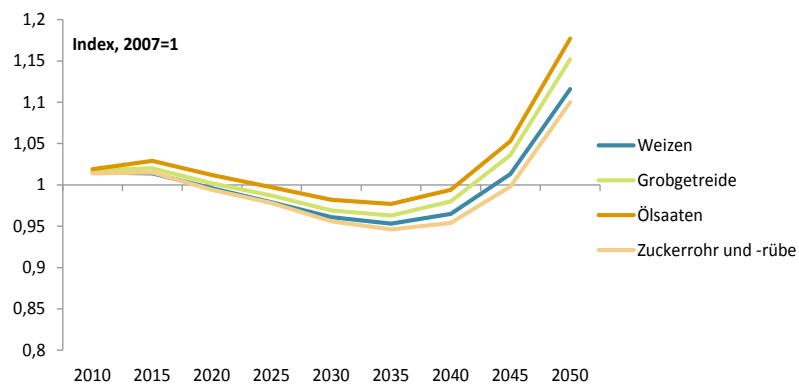


Abbildung 5-17: Reale Preisentwicklung in Deutschland für ausgewählter Agrarprodukte als Index mit 2007=1. Quelle: Eigene MAGNET Berechnungen.

Der Konsum pflanzlicher Agrarprodukte steigt zwischen 2010 und 2050 um etwas mehr als 50 % in Deutschland. Dabei verzeichnen die Ölsaaten mit einem Plus von 200 % das höchste Wachstum. Dies ist auf die erhöhte Biokraftstoffnachfrage zurückzuführen (siehe auch Abbildung 5-18), die zum größten Teil durch Biodiesel gedeckt wird. Im Folgenden bezieht sich die Darstellung daher auf Ölsaaten und Pflanzenöl.

Die Ölsaaten, die in Deutschland konsumiert werden, werden zum Großteil in anderen Ländern hergestellt und in Form von Ölsaaten, Pflanzenöl oder Ölkuchen nach Deutschland importiert, dabei hat Pflanzenöl den größten Anteil. Die meisten Importe für alle drei Formen kommen aus Europa, gefolgt von Amerika für Ölsaaten und Ölkuchen sowie Asien für Pflanzenöl. Abbildung 5-19 zeigt die Herkunftsregionen von Pflanzenölimporten nach Deutschland.

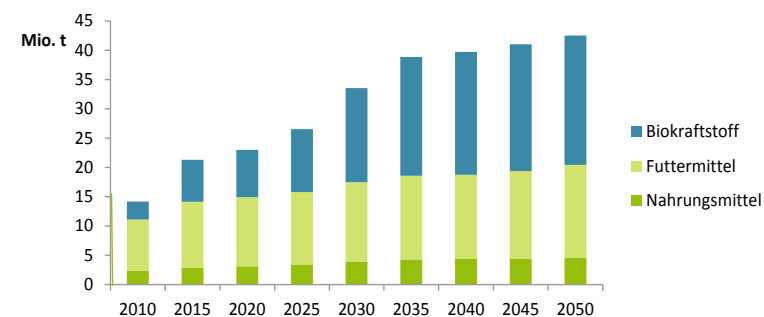


Abbildung 5-18: Konsum von Ölsaaten (Millionen Tonnen) in Deutschland nach Endverwendung. Quelle: Eigene MAGNET Berechnungen.

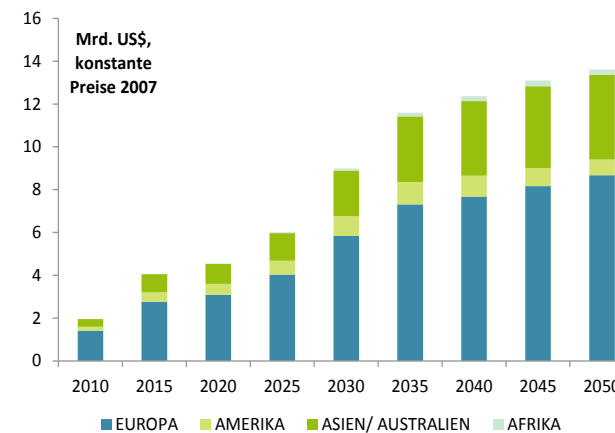


Abbildung 5-19: Pflanzenölimporte nach Deutschland in Mrd. US\$ zu konstanten Preisen 2007. Quelle: Eigene MAGNET Berechnungen.

Der Anteil von importiertem zu heimischem Pflanzenöl in der Biodieselproduktion liegt bei über 70 % in 2010 und steigt auf 77 % in 2050 an. Die Herkunft derjenigen Ölsaaten, die in Deutschland zu Biodiesel verwendet werden, wurde aus den MAGNET-Modellergebnissen abgeleitet. Abbildung 5-20 zeigt eine Verteilung der Herkunft für 2010 und 2050.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die weltweiten Preise und Mengen von Agrarprodukten hauptsächlich durch den Anstieg der Bevölkerung und des BIPs und somit durch die steigende Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermitteln getrieben werden. Die zusätzliche Nachfrage nach Biokraftstoffen verstärkt den Druck weiter. Die stark steigenden Bodenpreise sind ein Indikator dafür, dass Boden zum limitierenden Faktor in der Agrarproduktion wird.

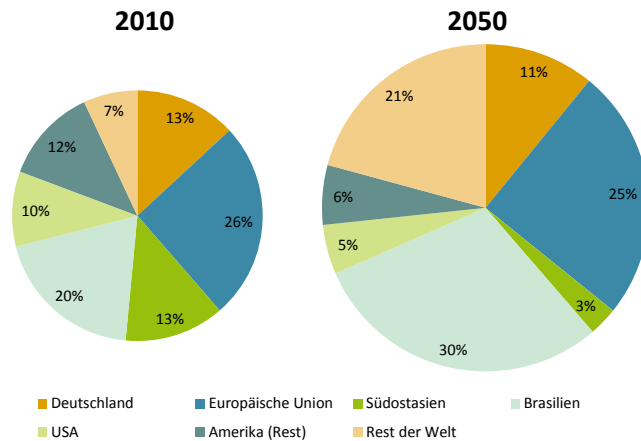


Abbildung 5-20: Herkunft von Ölsaaten, die in Deutschland in Form von Biodiesel verbraucht werden. Quelle: Eigene Berechnungen.

### 5.2.3.2 Szenarienvergleich

Die aggregierte globale Produktion über alle Produkte hinweg, variiert zwischen den Szenarien nur leicht (unter 1 %). Dagegen wird die landwirtschaftliche Produktion insbesondere durch den Rückgang der nutzbaren Fläche eingeschränkt und ist somit in den Nachhaltigkeitsszenarien um etwa 5 % in 2030 und fast 10 % in 2050 geringer im Vergleich zum KS-BAU-Szenario im gleichen Jahr. Hierbei ist zu beachten, dass die in MAGNET nicht erfasste Produktion von Rohstoffen zur Bioenergiegewinnung, die durch eine Flächenreduktion simuliert wird, hier nicht enthalten ist und nicht ausgewiesen werden kann. Durch die geänderte Nachfrage nach erster Generation Kraftstoff werden insbesondere die Produktion von Weizen, Grobgetreide, Ölsaaten und Zuckerrohr und -rübe reduziert. Abbildung 5-21 zeigt die prozentualen Änderungen der Produktion im Vergleich zum KS-BAU-Szenario für Deutschland und weltweit in 2050. Im SW-BAU-Szenario wird modelliert, dass anstatt Biokraftstoff landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland nachgefragt wird. Dies hat zur Folge, dass sich die Produktion in Deutschland ändert, es weltweit in der Produktion aber nur geringe Auswirkungen gibt.

Die Preise für primäre Agrarprodukte steigen bis 2050 insbesondere in den Nachhaltigkeitsszenarien stärker als in den BAU-Szenarien. Dies ist hauptsächlich durch die reduzierte Fläche der potenziell möglichen Agrarfläche induziert. In Deutschland sind die Preise für Weizen, Grobgetreide, Ölsaaten und Zuckerrohr / -rübe in den Nachhaltigkeitsszenarien mehr als doppelt so hoch verglichen mit dem KS-BAU-Szenario und weltweit sind ähnlich starke Ausprägungen zu erkennen (siehe Abb. 5-22).

Die Bodenpreise unterscheiden sich global betrachtet nicht zwischen den KS- und den SW-Szenarien, lediglich zwischen den BAU- und den Nachhaltigkeitsszenarien. In den Nachhaltigkeitsszenarien steigen die Preise im Modell ab 2020 stark an. Dies ist bedingt durch das unter Schutz stellen von Flächen ab 2020 und spiegelt hier die Knappheit von Boden wider. In Deutschland sind die Bodenpreise in den SW-Szenarien etwas höher als in den vergleichbaren Kraftstoffszenarien, da in den SW-Szenarien der Anteil heimischer Rohstoffprodukti-

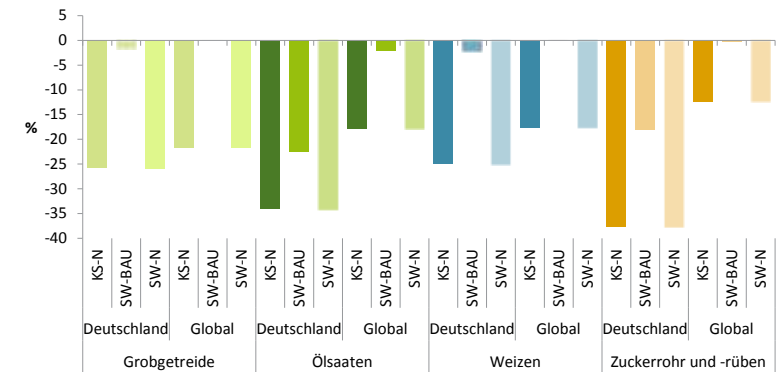


Abbildung 5-21: Prozentuale Änderung in 2050 der Produktion von bestimmten Agrarrohstoffen in Deutschland (links) und weltweit (rechts) zwischen den Szenarien und dem KS-BAU-Szenario. Quelle: Eigene MAGNET-Berechnungen.

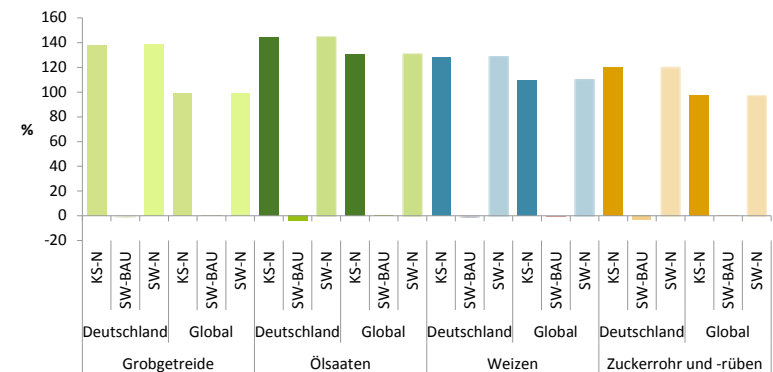


Abbildung 5-22: Prozentuale Änderung in 2050 der Preise von bestimmten Agrarrohstoffen in Deutschland (links) und weltweit (rechts) zwischen den Szenarien und dem KS-BAU-Szenario. Quelle: Eigene MAGNET-Berechnungen.

on zur Deckung des Bioenergiebedarfs höher ist als in den KS-Szenarien. Tabelle 5-3 zeigt, dass die jährlichen Ertragssteigerungen der einzelnen Kulturen sich untereinander sowie zwischen den Szenarien unterscheiden. Die Erträge werden durch eine exogen vorgegebene Steigerung der Produktivität von Boden sowie durch zwei endogene Komponenten im Zusammenspiel der Modelle beeinflusst. Dies ist zum einen die Auswirkung steigender Preise für Agrarprodukte als auch für den Produktionsfaktor Boden. Beide bewirken eine Intensivierung der Agrarproduktion durch einen höheren Einsatz von Dünger- und Pflanzenschutzmitteln sowie eine verbesserte Produktivität durch Forschung und Entwicklung. Zum anderen resultieren diese Ertragseffekte auch aus der gekoppelten Analyse mit dem Modell LandSHIFT, das die vorgegebene Produktion auf die Fläche verteilt und einen Durchschnittsertrag basierend auf bio-physikalischen Gegebenheiten ermittelt.

Tabelle 5-3: Durchschnittliche jährliche Ertragssteigerungen für bestimmte Ackerkulturen in Deutschland und global in Prozent zwischen 2010-2050 für alle Szenarien

		Weizen	Grobgetreide	Ölsaaten	Zuckerrohr und -rüben
Deutschland	KS-BAU	0,72	0,68	0,67	0,65
	KS-N	0,92	0,92	0,86	0,89
	SW-BAU	0,72	0,68	0,67	0,65
	SW-N	0,92	0,92	0,86	0,89
Global	KS-BAU	0,44	0,69	0,64	1,04
	KS-N	0,80	0,90	0,61	1,35
	SW-BAU	0,44	0,69	0,62	1,04
	SW-N	0,80	0,90	0,61	1,35

Der Ölsaatenkonsum in Deutschland ist insbesondere von der Nachfrage nach Biodiesel abhängig. In den Szenarien ohne Nachfrage nach erster Generation Biokraftstoffe in Deutschland (SW Szenarien ab 2020 und KS-N-Szenario ab 2050) werden keine Ölsaaten mehr in Form von Biodiesel konsumiert, selbst der Nahrungs- und Futtermittelkonsum geht um über 30 % in allen Szenarien verglichen mit dem KS-BAU-Szenario in 2050 in Deutschland zurück.

In allen drei Szenarien sinken die Pflanzenölimporte in 2050 um circa 90 % im Vergleich zum KS-BAU-Szenario, dahingegen wird mehr Ölkuchen importiert. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass eine erhöhte Nachfrage nach Biodiesel in Deutschland hohe Pflanzenölimporte zur Folge hat.

#### 5.2.4 Sensitivitätsanalyse

Das MAGNET Modell wird durch die Annahmen zu makroökonomischen Trends (BIP, Bevölkerung, technischer Fortschritt), zu Politiken (insbesondere zu Handels- und Agrarpolitiken) und in diesem Projekt auch zur Nachfrage nach Bioenergie getrieben. Die Sensitivität der beschriebenen Modellergebnisse wird für das KS-BAU-Szenario an zwei Stellen getestet. Zum einen wurde die Entwicklung des BIP mit plus 10 % und minus 10 % für alle Regionen

und Perioden im Vergleich zum KS-BAU-Szenario variiert und zum anderen wurde die globale Nachfrage nach erster Generation Biokraftstoffe weltweit um plus 20 % und minus 20 % pro Periode modifiziert, dabei ist die Nachfrage in Deutschland konstant geblieben. Einen Flächenabzug durch den Einsatz von Biokraftstoffen der zweiten Generation wurde nicht modelliert, da dieser im KS-BAU-Szenario sehr gering ist. Im Folgenden werden die Szenarien mit den Namen Plus10BIP, Minus10BIP, Plus20KS und Minus20KS beschrieben. Abbildung 5-23 zeigt den Einfluss auf die Produktion von Agrarrohstoffen der Szenarien. Eine Variation des BIP um 10 % hat einen stärkeren Einfluss auf die Produktion als eine Variation der Biokraftstoffnachfrage um 20 %. Die Produktionsänderungen sind prozentual immer geringer als die simulierten Änderungen mit Ausnahme der globalen Ölsaatenproduktion.

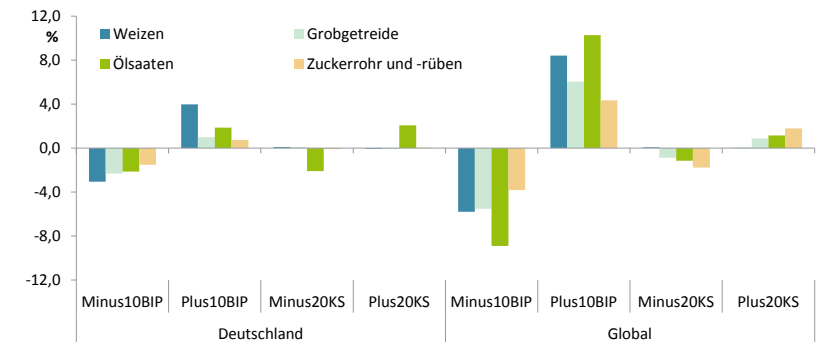


Abbildung 5-23: Prozentuale Produktionsänderungen in 2050 der Szenarien im Vergleich zum KS-BAU-Szenario für ausgewählte Produkte und Regionen. Quelle: Eigene MAGNET-Berechnungen.

Tabelle 5-4: Prozentuale Preisänderungen in 2050 der Szenarien im Vergleich zum KS-BAU-Szenario für ausgewählte Produkte, Boden und Regionen. Quelle: Eigene MAGNET-Berechnungen.

		Ölsaaten	Weizen	Grobgetreide	Zuckerrohr und -rüben	Boden
Deutschland	Minus10BIP	-10,0	-8,6	-9,5	-8,5	-31,4
	Plus10BIP	18,9	16,5	17,8	16,4	59,0
	Minus20KS	-1,0	-0,6	-0,7	-0,6	-1,9
	Plus20KS	0,9	0,5	0,5	0,6	1,7
Global	Minus10BIP	-12,9	-9,4	-13,3	-14,3	-19,7
	Plus10BIP	23,4	17,6	44,5	23,9	34,6
	Minus20KS	-0,3	-0,4	-0,2	0,5	-0,5
	Plus20KS	0,3	0,3	0,2	-0,5	0,4



Boden- und Agrarpreise hingegen reagieren sehr viel sensibler auf Änderungen des BIP. Während Preise für Industrieprodukte mit steigendem BIP leicht sinken, steigen die Agrarpreise zu einem höheren Prozentsatz als die BIP-Änderungen sowohl in Deutschland als auch global, näheres ist in Tabelle 5-4 zu finden.

Die Variation der globalen Biokraftstoffnachfrage (Deutschland ausgeschlossen), beeinflusst die Ergebnisse nur unwesentlich. Es zeigt sich, dass die Annahmen zum BIP entscheidend für den allgemeinen Trend sind. Da das BIP über alle Szenarien annähernd gleich gehalten ist (maximaler Unterschied von weniger als 3 % durch die endogene MAGNET-Komponente), hat es keinen Einfluss auf den Vergleich zwischen den Szenarien.

### 5.2.5 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Ein allgemeiner Trend über alle Szenarien ist die steigende Nachfrage nach Agrarrohstoffen bedingt durch das Wachstum des BIP und der Bevölkerung. Dies hat zur Folge, dass der Produktionsfaktor Boden zum limitierenden Faktor wird und so dessen Preise im Zeitablauf stark steigen. Durch das geringe Wachstum der Bevölkerung und ein unterdurchschnittliches Wachstum des BIP ist Europa von dieser Entwicklung weniger stark betroffen als andere Regionen der Welt.

Die zusätzliche Nachfrage nach Bioenergie verstärkt diese Entwicklung weiter. Die deutsche Nachfrage nach Bioenergie spielt dabei kaum eine Rolle. Das weltweite unter Schutz stellen von Flächen hat dagegen eine weit größere Auswirkung auf die Agrarproduktion und -märkte.

Die in den Modellrechnungen ermittelten notwendigen Ertragssteigerungen stellen sich in der realen Welt jedoch nicht von selbst oder nur stark verzögert ein. Daher erscheint neben einer weiteren Steigerung der landwirtschaftlichen Intensivierung die Realisierung von Ertragssteigerungen durch technischen Fortschritt, beispielsweise durch Züchtung, dringend erforderlich. Hierzu ist besonders eine Förderung von Forschung und Entwicklung unabdingbar.

Es bleibt festzuhalten, dass die Produktion von Pflanzenöl in Deutschland wirtschaftlich nicht mit der Konkurrenz aus anderen Regionen der Erde mithalten kann und so eine Biodieselstrategie zur Folge hat, dass importierte Rohstoffe den Grundstein für die Biodieselversorgung in Deutschland legen.

## 5.3 Ressourcen und Landnutzung 2050

Die Analyse räumlicher und zeitlicher Auswirkungen der Entwicklung der globalen Biomasseproduktion zur Befriedigung der Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermitteln sowie Bioenergie auf Landnutzungsänderungen erfolgt mit dem geographischen Landnutzungsmodell LandSHIFT (SCHALDACH et al., 2011; ALCAMO et al., 2011). Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf Ländergruppen, die als Exporteure von Biomasse nach Deutschland auftreten. Hierzu wird LandSHIFT mit dem ökonomischen Gleichgewichtsmodell MAGNET (siehe Kapitel 3.2) gekoppelt. Die von MAGNET berechneten regionalen Informationen über die landwirtschaftliche Produktion werden dabei von LandSHIFT in ein räumliches Landnutzungsmuster (5-Bogenminuten-Raster) übersetzt. Der Beitrag von LandSHIFT liegt in der Berechnung von Rasterkarten über globale Landnutzungsänderungen unter den jeweiligen Szenarienannahmen bis zum Jahr 2050 und dient als Voraussetzung zur Berechnung der damit einhergehenden Umweltwirkungen, die in den Folgekapiteln beschrieben werden.

### 5.3.1 Überblick über die Ergebnisse

Ergebnisse der Simulationsläufe sind Rasterkarten der globalen Landnutzungsmuster sowie Statistiken der Flächennutzung in den 35 MAGNET-Regionen. In allen vier Szenarien zeigt sich ein starker Anstieg der globalen landwirtschaftlich genutzten Fläche zwischen 2007 und 2050. Unterschiede ergeben sich vorrangig durch die Nachhaltigkeitsstrategie (BAU vs. Nachhaltig) und weniger durch die Endnutzungsart der Biomasse (Kraftstoff vs. Strom / Wärme), (siehe Abb. 5-24).

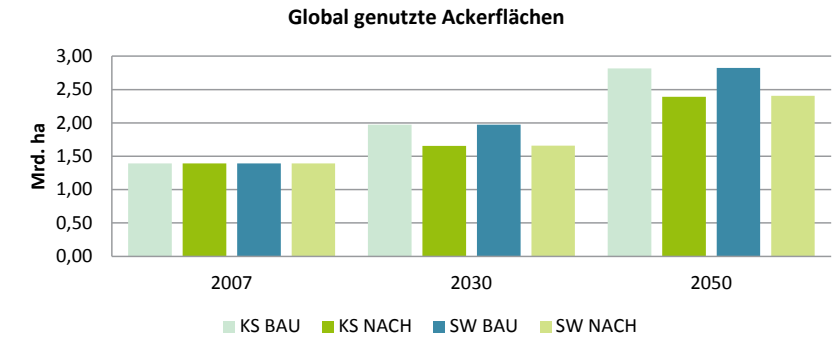


Abbildung 5-24: Globale Ackerfläche (inkl. Biokraftstoffen) in Mrd. ha für die vier Szenarien

In den weiteren Ausführungen wird daher besonders auf die Unterschiede zwischen den BAU-Szenarien und den Nachhaltigkeitsszenarien eingegangen. Zur Verdeutlichung der grundsätzlichen Unterschiede in den globalen Landnutzungsmustern werden die Kraftstoffszenarien KS-BAU und KS-N herangezogen. Für Deutschland sieht die Situation anders aus, weshalb hier gesondert auf die Simulationsergebnisse für alle vier Szenarien eingegangen wird. Durch die in den Szenario-Annahmen spezifizierte großflächige Produktion von nicht-handelbarer Biomasse zur energetischen Nutzung („fixierte Bioenergiefläche“, z. B. zur Produktion von Silage-Mais für die Biogaserzeugung), der u. a. durch Schutzgebiete stark eingeschränkt zur Verfügung stehenden Fläche und dem Verbot von Grünlandumbruch nach 2025 in den Nachhaltigkeitsszenarien sind hier die Unterschiede zwischen den vier Szenarien stärker ausgeprägt als auf globaler Ebene.

### 5.3.2 BAU-Szenarien Global

Die BAU-Szenarien haben eine höhere Gesamtproduktion von Agrargütern (21 Mrd. t) als die Nachhaltigkeitsszenarien (18 Mrd. t). Bis 2050 sinkt die Nutzung von Grünland zur Futterbereitstellung (in Form von Weide) auf 96 % des Wertes im Startjahr. In den BAU-Szenarien finden keine Ausdehnung bestehender Schutzgebiete sowie keine Verschärfung des Grünlandumbruchverbots in der EU statt. Die fixierte Fläche zur Produktion von nicht-handelbarer Biomasse zur energetischen Nutzung (hauptsächlich KUP-Flächen) ist in den BAU-Szenarien weitaus geringer als in den Nachhaltigkeitsszenarien.

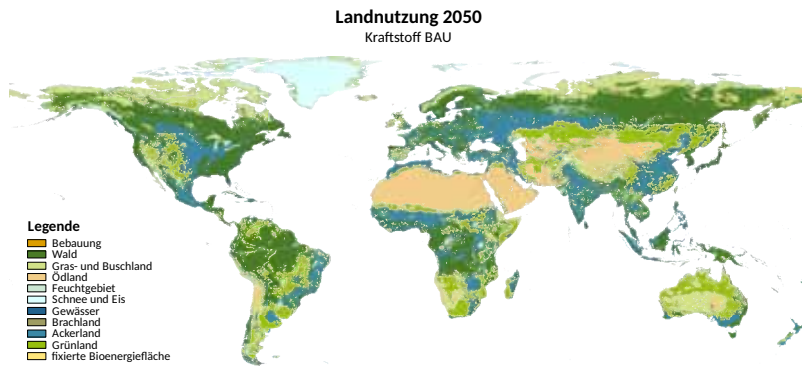


Abbildung 5-25: Globale Landnutzung im Jahr 2050 für das KS-BAU-Szenario. Die Klasse fixierte Bioenergiefläche umfasst Flächen zur Produktion von nicht handelbarer Biomasse zur energetischen Nutzung. In Deutschland kann dies u. a. Silomais beinhalten, im Rest der Welt wird von der Anlage von Kurzumtriebsplantagen (KUPs) ausgegangen.

Abbildung 5-25 zeigt die globale Landnutzung im Jahr 2050 für das KS-BAU-Szenario. Die Annahmen des BAU-Szenarios führen dazu, dass sowohl in KS-BAU als auch in SW-BAU die global genutzte landwirtschaftliche Fläche bis 2050 stark zunimmt (vgl. Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6). Die Ackerfläche verdoppelt sich von 1,39 Mrd. ha auf 2,82 Mrd. ha bzw. 2,83 Mrd. ha. Die Grünlandfläche dehnt sich in beiden Szenarien bis 2030 von 490 Mio. ha auf 640 Mio. ha aus. Danach sinkt die Grünlandfläche um 40 Mio. ha auf 600 Mio. ha in 2050. Die starke Ausdehnung von Ackerland und Grünland führt zu einer Reduktion der natürlichen Landbedeckung: in beiden Szenarien werden weltweit Waldflächen von fast 300 Mio. ha gerodet und 770 Mio. ha Busch- und Grasland umgewandelt. Allein die Ausdehnung von Siedlungsflächen führt zu einer Versiegelung von zusätzlich 60 Mio. ha Boden. Das im Startjahr 2007 ausgewiesene Brachland wird im BAU-Szenario in Höhe von 530 Mio. ha in Nutzung genommen, wodurch sich dessen Fläche von 840 Mio. ha in 2007 auf 310 Mio. ha in 2050 reduziert.

Räumlich ist die starke Ausdehnung der Ackerfläche vor allem im Osten von Brasilien und im Südwesten von Russland zu erkennen, sowie in Südostasien. In den drei Regionen wird mit einer Zunahme der Produktion von Feldfrüchten gerechnet. In Brasilien vor allem Zuckerrohr, in Russland Weizen und in Südostasien Ölsaaten. In den USA ist vor allem eine steigende Produktion von Grobgetreide verantwortlich für die dortige Expansion der Ackerfläche. Zusätzlich dehnt sich im Westen der USA die genutzte Grünlandfläche (Weideland) aus. In Russland besteht eine stetig steigende Nachfrage nach Grünland bis 2050, während dieser Trend in Brasilien, den USA und Südostasien nur bis 2035 besteht und die Nachfrage danach leicht rückläufig ist.

Tabelle 5-5: Globale Flächennutzung für das KS-BAU-Szenario in Mrd. ha

	Bebauung	Ackerland	Grünland	Brachland	Wald	Grasland / Buschland	Feuchtgebiete / Schnee / Eis / Wasser
2007	0,12	1,39	0,49	0,84	4,32	5,49	1,15
2030	0,16	1,97	0,64	0,47	4,28	5,14	1,14
2050	0,18	2,82	0,60	0,31	4,04	4,72	1,14

Tabelle 5-6: Globale Flächennutzung für das SW-BAU-Szenario in Mrd. ha

	Bebauung	Ackerland	Grünland	Brachland	Wald	Grasland / Buschland	Feuchtgebiete / Schnee / Eis / Wasser
2007	0,12	1,39	0,49	0,84	4,32	5,49	1,15
2030	0,16	1,97	0,64	0,47	4,28	5,14	1,14
2050	0,18	2,83	0,60	0,31	4,03	4,72	1,14

### 5.3.3 Nachhaltigkeitsszenarien Global

Die Nachhaltigkeitsszenarien sind vor allem geprägt durch die Ausdehnung und strikte Einhaltung von Schutzgebietsflächen ab dem Jahr 2025. Durch die unter Schutzstellung von Waldflächen und Feuchtgebieten, sowie eines Grünlandumbruchverbotes in der EU wird die für Landwirtschaft zur Verfügung stehende Nutzfläche stark reduziert. Daraus resultiert, dass auch die globale Produktion landwirtschaftlicher Güter gegenüber den BAU-Szenarien niedriger ausfällt.

Die Annahmen der Nachhaltigkeitsszenarien (vgl. Kapitel 4 sowie Anhang A 4) führen gleichwohl den BAU-Szenarien zu einer Zunahme der landwirtschaftlich genutzten Flächen, sowohl in den Kraftstoff- als auch in den Strom- / Wärme-Szenarien (Tabelle 5-7 und Tabelle 5-8). Abbildung 5-26 zeigt exemplarisch die mit LandSHIFT simulierte globale Landnutzung

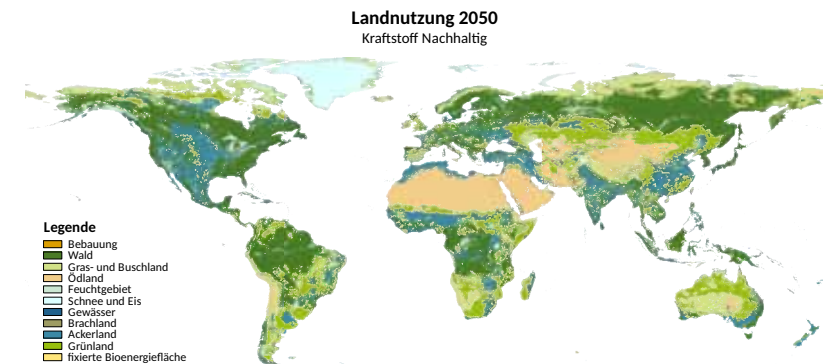


Abbildung 5-26: Globale Landnutzung im Jahr 2050 für das KS-N-Szenario

im Jahr 2050 für das KS-N-Szenario. Mit einer Zunahme von 1,39 Mrd. ha auf 2,39 Mrd. ha bzw. 2,41 Mrd. ha (+ ~70 %) fällt die Ausdehnung der Ackerfläche geringer aus als in den BAU-Szenarien. Die Grünlandfläche entspricht annähernd den BAU-Szenarien, sie steigt von 2007 mit 490 Mio. ha auf 630 Mio. ha in 2030 und sinkt danach bis 2050 auf 610 bzw. 600 Mio. ha.

Der geringere Bedarf an Ackerland führt zu einem geringeren Verlust an natürlicher Vegetation. 20 Mio. ha Waldflächen werden gerodet und 850 Mio. ha Gras- und Buschland werden umgewandelt. Durch den Schutz von Wäldern in den Nachhaltigkeitsszenarien nach 2025 fällt die Rodung insgesamt geringer aus als in den BAU-Szenarien, führt aber dazu, dass mehr Gras- und Buschland umgebrochen wird. In den Nachhaltigkeitsszenarien wird zudem weniger Brachland für die Landwirtschaft genutzt als in den BAU-Szenarien, nur 310 Mio. ha von den 840 Mio. ha in 2007 werden in Nutzung genommen.

Tabelle 5-7: Globale Flächennutzung für das KS-N-Szenario in Mrd. ha

	Bebauung	Ackerland	Grünland	Brachland	Wald	Grasland / Buschland	Feuchtgebiete / Schnee / Eis / Wasser
2007	0,12	1,39	0,49	0,84	4,32	5,49	1,15
2030	0,16	1,66	0,63	0,76	4,31	5,15	1,14
2050	0,18	2,39	0,61	0,54	4,30	4,65	1,14

Tabelle 5-8: Globale Flächennutzung für das SW-N-Szenario in Mrd. ha

	Bebauung	Ackerland	Grünland	Brachland	Wald	Grasland / Buschland	Feuchtgebiete / Schnee / Eis / Wasser
2007	0,12	1,39	0,49	0,84	4,32	5,49	1,15
2030	0,16	1,66	0,63	0,76	4,31	5,15	1,14
2050	0,18	2,41	0,60	0,53	4,30	4,64	1,14

Brasilien's Ackerflächen sind 2050 mit 112 Mio. ha in den Nachhaltigkeitsszenarien fast 85 Mio. ha kleiner als in den BAU-Szenarien. Weideflächen werden in etwa gleichem Umfang genutzt. Dies führt zusammen zu einer deutlich geringeren Umwandlung von Wald und anderen natürlichen Flächen. Durch den hohen Flächenverbrauch zur Produktion von nicht handelbarer Biomasse zur energetischen Nutzung in den Nachhaltigkeitsszenarien kommt es zur Ausdehnung der Ackerflächen nach Westen und damit zu einer Verdrängung von Grünlandflächen und natürlichen Gras- und Buschländern. In Russland findet in den Nachhaltigkeitsszenarien vor allem extensive Weidewirtschaft statt, und kaum noch Ackerbau, wodurch sich die Landnutzung hin zu Grünland verschiebt. In Südostasien ist der Bedarf an Ackerfläche halb so groß wie in den BAU-Szenarien und die Grünlandfläche ist um 10 Mio. ha kleiner. Dies zusammen führt zu einer geringeren Abholzung von über 24 Mio. ha und einer geringeren Umwandlung von Gras- und Buschland von 8 Mio. ha gegenüber den BAU-Szenarien. Diese Entwicklungen sind primär auf die Ausweitung von Schutzgebieten und der geringeren Produktion an Agrargütern in diesen Regionen (vorgegeben durch MAGNET) zurückzuführen.

### 5.3.4 Deutschland

In Deutschland zeigen sich größere Unterschiede zwischen allen vier Szenarien. Diese sind zurückzuführen auf die unterschiedlichen Flächenbedarfe für nicht handelbare Biomasse zur energetischen Nutzung zwischen den Szenarien sowie die Unterschiede in den Flächenrestriktionen, insbesondere durch das Verbot von Grünlandumbruch. Die Agrarproduktion verhält sich tendenziell entsprechend der globalen Entwicklung. Die beiden BAU- und die beiden Nachhaltigkeitsszenarien verhalten sich von der Tendenz jeweils ähnlich.

Im KS-BAU- und SW-BAU-Szenario berechnet MAGNET eine kontinuierliche Zunahme der Produktionsmengen von Feldfrüchten (ohne fixierte Flächen für die energetische Nutzung) über den gesamten betrachteten Zeitraum. Die Nachhaltigkeitsszenarien weisen beide, sowohl für Kraftstoff als auch für Strom / Wärme, um 2030 / 2035 ein Produktionsmaximum auf. Im KS-N-Szenario sinkt die Produktion von 2035 mit 116 Mio. t auf 100 Mio. t bis 2050. Im SW-N-Szenario bleibt die Produktionsmenge ab 2030 konstant bei 100 Mio. t. Zudem wird im SW-N-Szenario auf größeren Flächen nicht handelbare Biomasse zur energetischen Nutzung produziert (siehe Abschnitt 1.3) wodurch diese für andere Feldfrüchte blockiert werden. Die Nutzung von Grünland als Weidefläche entwickelt sich dazu gegenläufig, d. h. in den Kraftstoffszenarien sinkt der Bedarf an Grünlandfläche in Deutschland bis 2030 um 15-20 %, während er in den Strom- / Wärme-Szenarien um über 30 % bis 2030 sinkt. In allen Szenarien sinkt danach bis 2050 der Bedarf nach Grünlandfläche weiter.

Abbildung 5-27 zeigt die mit LandSHIFT simulierte Landnutzung in Deutschland im Jahr 2050. Ackerland dehnt sich dabei bis 2030 unterschiedlich stark aus (siehe Tabelle 5-9

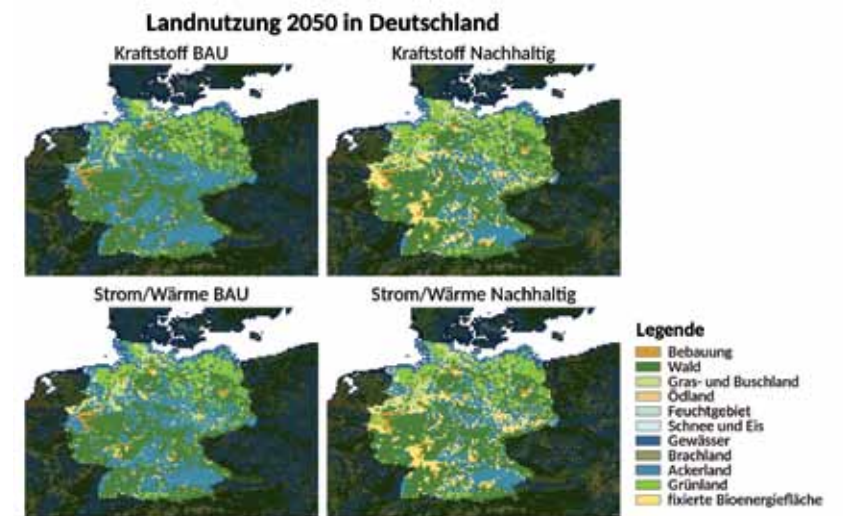


Abbildung 5-27: Landnutzung in Deutschland für das KS-BAU-Szenario (links, oben) und das KS-N- (rechts, oben) sowie das SW-BAU-Szenario (links, unten) und das SW-N-Szenario (rechts, unten) für das Jahr 2050.

bis Tabelle 5-12). Auf Grund der höheren Priorisierung von Ackerland gegenüber Grünlandnutzung in den LandSHIFT Simulationen wird Grünland in Ackerland umgewandelt. In den Strom- / Wärme-Szenarien findet bis 2030 eine stärkere Zunahme der Ackerfläche als im Kraftstoff Szenarien statt. Danach wird bis 2050 durch einen Rückgang der Produktion von Agrargütern in den Strom- / Wärme-Szenarien Ackerland für Grünlandnutzung frei. In den Kraftstoffszenarien nimmt Ackerland im KS-BAU-Szenario bis 2050 weiter zu, während es in KS-N konstant bleibt.

Tabelle 5-9: Flächennutzung in Millionen ha in Deutschland für das KS-BAU-Szenario

	Bebauung	Ackerland	Grünland	Brachland	Wald	Grasland / Buschland	Feuchtgebiete / Schnee / Eis / Wasser
2007	1,66	9,35	6,96	0,00	14,68	2,24	1,50
2030	1,66	10,78	5,60	0,00	14,68	2,18	1,50
2050	1,66	11,46	4,91	0,00	14,68	2,18	1,50

Tabelle 5-10: Flächennutzung in Millionen ha in Deutschland für das KS-N-Szenario

	Bebauung	Ackerland	Grünland	Brachland	Wald	Grasland / Buschland	Feuchtgebiete / Schnee / Eis / Wasser
2007	1,66	9,35	6,96	0,00	14,68	2,24	1,50
2030	1,66	10,04	6,34	0,00	14,68	2,18	1,50
2050	1,66	10,04	6,34	0,00	14,68	2,18	1,50

Tabelle 5-11: Flächennutzung in Millionen ha in Deutschland für das SW-BAU-Szenario

	Bebauung	Ackerland	Grünland	Brachland	Wald	Grasland / Buschland	Feuchtgebiete / Schnee / Eis / Wasser
2007	1,66	9,35	6,96	0,00	14,68	2,24	1,50
2030	1,66	11,86	4,51	0,00	14,68	2,18	1,50
2050	1,66	11,72	4,65	0,00	14,68	2,18	1,50

Tabelle 5-12: Flächennutzung in Millionen ha in Deutschland für das SW-N-Szenario

	Bebauung	Ackerland	Grünland	Brachland	Wald	Grasland / Buschland	Feuchtgebiete / Schnee / Eis / Wasser
2007	1,66	9,35	6,96	0,00	14,68	2,24	1,50
2030	1,66	11,67	4,71	0,00	14,68	2,18	1,50
2050	1,66	11,35	5,02	0,00	14,68	2,18	1,50

Deshalb kommt es in den Kraftstoffszenarien zu keiner Umwandlung von Ackerland in Grünland. Im KS-N-Szenario zeigt das in 2025 in der EU eingeführte Grünlandumbruchverbot Wirkung und verhindert eine Umwandlung von Grünland in Ackerland. In beiden Strom- / Wärme-Szenarien steigt ab 2030, bedingt durch das frei werdende Ackerland, die

Grünlandnutzung wieder an. Natürliche Vegetation (Gras- / Buschland) wird bis 2030 in geringem Umfang von 60 Tausend ha umgewandelt. Dies entspricht der natürlichen / naturnahen Fläche, die in Deutschland nicht unter Schutz steht. Waldflächen in Deutschland werden auf Grund des in den Szenarien angenommenen Schutzgebietscharakters ebenfalls nicht gerodet. Eine Ausdehnung der Bebauung ist wegen der in Deutschland rückläufigen Bevölkerungszahlen nicht zu beobachten.

### 5.3.5 Diskussion der Modellergebnisse

Innerhalb des Projekts konnte ein erster Ansatz zur Kopplung eines ökonomischen Modells mit einem räumlichen Landnutzungsmodell entwickelt werden. Allerdings sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, um die Abstimmung zwischen den Modellen zu verfeinern und eine stärkere Konvergenz zwischen den Modellergebnissen zu erreichen. Bei den aktuellen Simulationsergebnissen ist zu beachten, dass in allen Szenarien Produktionsmengen, sowohl für Feldfrüchte als auch für Grünland, durch einen Mangel an potenziell nutzbarer Fläche, nicht vollständig von LandSHIFT verortet werden konnten. Bei den Feldfrüchten konnte in den BAU-Szenarien lediglich die Produktion von Reis nicht vollständig verortet werden. Davon entfallen ~90 % auf die Region Nordafrika und 10 % auf Pakistan. Da es sich hierbei in beiden Fällen um Regionen mit großem Brachland / Wüstenanteil handelt, wird die Anbaufläche vor allem durch diesen Umstand natürlich limitiert. Bei Grünland sieht es für BAU ähnlich aus. Auch hier liegen wieder ~90 % in den Wüstenregionen Nordafrikas, die restlichen 10 % im Mittleren Osten. In den Nachhaltigkeitsszenarien gibt es deutlich größere Produktionsmengen sowohl bei den Feldfrüchten als auch bei Weideland, die nicht verortet werden konnten. Stark betroffen sind wieder vor allem Regionen mit wenig potenziell nutzbarem Agrarland wie Nordafrika oder der mittlere Osten. Allerdings sind auch Regionen mit großen Waldflächen (die in diesen Szenarien unter Schutz stehen) wie Skandinavien & Baltische Staaten betroffen, sowie Länder mit einem hohen Anteil von KUP-Flächen (z. B. USA), durch welche die potenziell nutzbare Fläche blockiert wird.

### 5.3.6 Modellsensitivität und -unsicherheiten

Das LandSHIFT Modell wird angetrieben durch die Entwicklung der quantitativen Produktionsmengen einzelner Feldfrüchte und Weidenutzung (Grünland Netto Primärproduktion), Bevölkerungsentwicklung, durch eine Veränderung des Ernteertrags durch technologischen Wandel sowie in diesem Projekt zusätzlich durch den Bedarf an Bioenergieflächen (fixiert). Mit diesen Szenarientreibern erfolgt auf einer Basis-Landbedeckungskarte die Modellierung von Landnutzungsänderungen. Sowohl die Basiskarte als auch die Szenarientreiber wirken sich damit sensitiv auf die Landnutzungsverteilung in den Szenarien aus und beeinflussen sowohl das Risiko des Verlusts an Biodiversität als auch die Veränderung der Kohlenstoffspeicherung in Vegetation und Böden durch Flächenumwandlung (vgl. Kap. 5.4 u. Kap. 5.5).

Zur Analyse der Sensitivität von LandSHIFT gegenüber den Veränderungen des BIP sowie der weltweiten Nachfrage nach Biokraftstoffen wurden analog zu MAGNET (Kap. 5.2.4) die vier Sensitivitätsszenarien Plus10BIP, Minus10BIP, Plus20KS und Minus20KS (Abb. 5-28) verwendet.



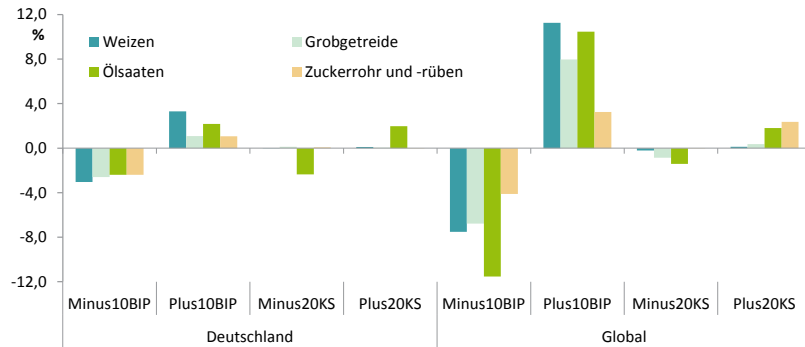


Abbildung 5-28: Prozentuale Flächenänderungen in 2050 der Sensitivitätsszenarien aus MAGNET (Kap. 5.2.4) im Vergleich zum KS-BAU-Szenario für ausgewählte Produkte und Regionen. Quelle: Eigene MAGNET-Berechnungen.

Zur Analyse der Sensitivität von LandSHIFT gegenüber den Veränderungen des BIP sowie der weltweiten Nachfrage nach Biokraftstoffen wurden analog zu MAGNET (Kap. 5.2.4) die vier Sensitivitätsszenarien Plus10BIP, Minus10BIP, Plus20KS und Minus20KS verwendet. Die Flächeninanspruchnahme verhält sich erwartungsgemäß näherungsweise äquivalent zu den Produktionsänderungen – das BIP beeinflusst durch die höheren Schwankungen in der Produktion auch die Flächennutzung stärker als die Biokraftstoffnachfrage. Die prozentualen Änderungen der Flächen in Deutschland entsprechen in etwa den Produktionsänderungen, global sind die prozentualen Änderungen der Flächen in fast allen Fällen größer als die der prozentuale Produktionsänderung, insbesondere bei Weizen im Plus10BIP-Szenario. Dies resultiert daraus, dass eine Ausdehnung der Agrarfläche in der Tendenz zu einer Verringerung des durchschnittlichen Ertrags führt, da sich die räumliche Verteilung der landwirtschaftlich genutzten Fläche sukzessive hin zu Flächen mit niedrigerem Ertragspotenzial verschiebt. Folge ist eine im Verhältnis zur Produktionszunahme überproportionale Flächeninanspruchnahme.

Die Modellierung der Agrarflächen wird von LandSHIFT, wie Studien in Afrika (ALCAMO et al., 2011) und Brasilien (LAPOLA et al., 2010) zeigen, sehr gut abgebildet. Sowohl die berechneten Landnutzungskarten weisen Ackerflächen detailliert aus, als auch die Länderstatistiken sind entsprechend detailliert. Eine Verortung der Weideflächen dagegen ist, wegen mangelnder historischer und aktueller räumlicher Daten, mit einem hohen Unsicherheitsfaktor verbunden. Diese Informationen sind auch mit hochaufgelösten Fernerkundungsdaten nicht zu ermitteln, denn Landbedeckungskarten (wie GLOBCOVER) weisen diese Informationen nicht aus und auch die Weideflächenstatistiken der einzelnen Länder sind wegen unterschiedlicher Definitionen nicht ohne Vorsicht nutzbar. So spezifizieren einige Länder nur intensiv beweidete Flächen als Weideland, andere aber auch Flächen mit (nomadischer) Wanderviehwirtschaft. Dies führt unweigerlich in der Initialisierung des Modells und damit auch in den Simulationsläufen zu einer großen Unsicherheit bei der räumlichen Verteilung von Weideflächen.

Zudem reagiert das LandSHIFT-Modell sensitiv auf Änderungen in den klimatischen Entwicklungen (siehe ALCAMO et al., 2011). Durch diesen Einfluss ändern sich sowohl die Höhe der Ertragspotenziale als auch die räumliche Verortung von landwirtschaftlich nutzbaren Flächen. Im Meilensteine-Projekt wurden mögliche Klimaeinflüsse nicht explizit betrachtet.

### 5.3.7 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Die Simulationsergebnisse der gekoppelten Modelle zeigen, dass unterschiedliche Pfade der Biomassenutzung in Verbindung mit verschiedenen Nachhaltigkeitsanforderungen sowohl Auswirkungen auf den Agrarhandel als auch auf die räumlichen Landnutzungsmuster nach sich ziehen. Diese Ergebnisse unterstreichen nochmals den zusätzlichen Wert, den die Kombination der verschiedenen Modellansätze mit sich bringt. Die von LandSHIFT erzeugten Rasterkarten dienen als Eingang für die Analysen möglicher Umweltfolgen durch den Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung (siehe folgende Kapitel). Hier zeigt sich, dass durch die räumliche Verortung von Landnutzung eine wesentliche detailliertere Analyse erfolgen kann als es auf Ebene der MAGNET-Regionen möglich gewesen wäre.

## 5.4 Ökobilanzielle Bewertung der Bioenergieszenarien

In diesem Abschnitt werden die Umweltauswirkungen zukünftiger Bioenergienutzungsszenarien analysiert und bewertet. Zunächst werden das Ziel, die Vorgehensweise und nötige Festlegungen beschrieben (Kap. 5.4.1), dann die Ergebnisse aufgeführt (Kap. 5.4.2) und schließlich Schlussfolgerungen daraus gezogen (Kap. 5.4.3).

### 5.4.1 Ziel, Vorgehensweise und Festlegungen

Das Ziel der ökobilanziellen Analyse besteht darin, die Umweltauswirkungen verschiedener Bioenergieszenarien auszuweisen und zu bewerten. Dabei soll gezeigt werden, wie sich die Umweltwirkungen aufgrund der Bioenergienutzung über den Zeitraum von 2010 bis 2050 in den vier Szenarien entwickeln. Die Analyse wird mittels so genannter Übersichtsökobilanzen durchgeführt, welche eng an die Ökobilanznormen ISO 14040 / 14044 angelehnt sind (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V., 2006). Wie in der Ökobilanz üblich, werden alle Prozessschritte der Lebenswege von der Biomassebereitstellung über die Konversion bis hin zur Nutzung etwaiger Kuppelprodukte und Entsorgung von Abfällen in die Betrachtung einbezogen. Lebenswegen mit Kuppelprodukten wie Rapsschrot, Glycerin, Gärresten oder Rübenschnittzeln werden die vermiedenen Umweltwirkungen gutgeschrieben, die mit der Produktion äquivalenter Produkte verbunden wären, d. h. es wird die so genannte Gutschriftmethode (Systemraumerweiterung) angewandt, welche nach Maßgabe der Ökobilanznormen gegenüber einer Allokation zu bevorzugen ist. Dies stellt einen Unterschied zu den Rechenregeln der Europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie dar (siehe Kasten folgende Seite). Weitere Details siehe Anhang A 3.1.4.

In der Untersuchung werden die Umweltwirkungen der in BENSIM ermittelten Endenergiemenge aller Bioenergietechnologien bestimmt und in einem Nutzenkorb zusammen mit denen der im jeweiligen Jahr noch verbleibenden fossilen Energien (residualer Mix) darge-



stellt. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Ansätze, wie viel Gesamtenergie für die Auswertung zugrunde gelegt wird, und damit, wie groß die dargestellte Menge fossiler Energien ist:

1. Zur Darstellung im Systemvergleich (Abschnitt 5.4.2.1) wird die Endenergie zugrunde gelegt, die in Deutschland gemäß Szenario 2011 A aus (NITSCH et al., 2012) über fossile oder biogene Energieträger abgedeckt wird. Diese entspricht dem dritten Block „Rest“ in Tabelle 5-13 und ändert sich von Jahr zu Jahr.

2. Dagegen wird in allen anschließenden Abschnitten eine einheitliche Endenergiemenge für alle Szenarien und Zeitpunkte festgelegt, nämlich die in jedem Sektor über alle Jahre maximal verfügbare Bioenergie. Die bilanzierte fossile Energiemenge ergibt sich dann als Differenz aus dieser maximalen Bioenergie und der Bioenergiemenge des jeweiligen Jahres und Szenarios. Diese Festlegung wird im Folgenden als Nutzenkorb bezeichnet. Dadurch werden die Ergebnisse zwischen den unterschiedlichen Szenarien und Zeitpunkten vergleichbar.

Es wird also angesetzt, dass Biomasse ausschließlich fossile Energieträger ersetzt, nicht jedoch andere erneuerbare Energieträger (gemäß [NITSCH et al., 2012] fortgeschrieben). Die im jeweiligen Fall (Jahr, Bioenergieszenario) nicht durch Bioenergie abgedeckte Energie wird durch den fossilen (Residual-)Mix gestellt, wie er sich im jeweiligen Jahr im Szenario 2011 A nach (NITSCH et al., 2012) darstellt, während die Aufteilung auf die verschiedenen Bioenergieträger sich nach den Analysen mit BENSIM ergibt.

#### Unterschiede zwischen Ökobilanzen nach ISO und Treibhausgasbilanzen nach RED (Anhang V)

Die in Anhang V der Europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED, 2009/28/EG 2009) enthaltenen Regeln für die Berechnung von Treibhausgasbilanzen (für Biokraftstoffe und flüssigen Biobrennstoffen) unterscheiden sich signifikant von der Vorgehensweise nach ISO (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V., 2006). Dies hängt damit zusammen, dass die RED nicht für politische Analysen entwickelt worden ist, sondern für eine (gerichts-feste) Regulierung in Bezug auf einzelne Wirtschaftsakteure und einzelne Kraftstofflieferungen. Zu diesem Zweck müssen die Rechenregeln objektiv, transparent und eindeutig sein. Dies erforderte jedoch grobe Vereinfachungen, von denen einzelne aus wissenschaftlicher Sicht mindestens fragwürdig bis falsch sind wie z. B. die Unterscheidung zwischen Nebenprodukten und Reststoffen (die ISO-Normen kennen nur Kuppelprodukte) oder fehlende Bewertung der Emissionen aus der Nutzungsphase (per Definition zu null gesetzt, obwohl CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen u. U. nicht vernachlässigbar sind). Ferner sind diverse Einzelregelungen trotz aller Bemühungen der EU-Kommission (Mitteilung 2010/C 160/02 EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2010), des Europäischen Komitees für Normung (EN 16214-4:2013, Europäisches Komitee für Normung 2013) und des BioGrace-Projekts (www.biograce.net) weiterhin unklar bzw. nicht eindeutig definiert, insbesondere im Hinblick auf lignozellulosebasierte Biokraftstoffe.

Da auch in der Präambel der RED (Abs. 81) empfohlen wird, für politische Analysen die Substitutionsmethode heranzuziehen, werden die Ökobilanzen im Rahmen des vorliegenden Projekts in Anlehnung an die ISO-Normen durchgeführt, da sie u. E. die Realität besser abbilden. Diese Ergebnisse sind nicht mit Ergebnissen vergleichbar, die nach der RED-Methode bilanziert wurden.

Tabelle 5-13: Entwicklung der gesamten Endenergie, der nicht-biogenen erneuerbaren sowie der biogenen und fossilen Energieträger (ET) in Petajoule (PJ) pro Jahr nach (NITSCH et al., 2012)

PJ/a	Endenergie gesamt			Davon nicht-biogene erneuerbare ET			Rest = Biogene bzw. fossile ET		
	2010	2030	2050	2010	2030	2050	2010	2030	2050
Kraftstoffe*	1,989	1,466	1,182	0	100	227	1,989	1,366	955
Strom**	1,647	1,824	1,888	252	1,058	1,548	1,394	766	340
Wärme***	4,599	3,346	2,451	41	356	661	4,558	2,990	1,790

\* Hier nur Straßenverkehr; Wasserstoff wird zu den biogenen Energieträgern gerechnet, Elektrofahrzeuge und Plug-in-Hybride als mit Strom aus nicht-biogenen erneuerbaren Quellen betrieben gezählt

\*\* Auch aus Kraft-Wärme-Kopplung

\*\*\* Brennstoffenergie, ohne Strom zur Wärmeerzeugung

## 5.4.2 Ergebnisse

Dieses Kapitel ist in drei Abschnitte gegliedert. Zunächst wird die Darstellung der Umweltwirkungen am Beispiel des gesamten Energiesystems (außer den nicht biogenen erneuerbaren Energien) erklärt (5.4.2.1), danach werden die technologiebezogenen Ergebnisse untereinander verglichen (5.4.2.2). Weiter werden die Umweltwirkungen der Landnutzungsänderungen dargestellt (5.4.2.3) und schließlich die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber einigen Rahmenbedingungen diskutiert (5.4.2.4).

### 5.4.2.1 Systemvergleich

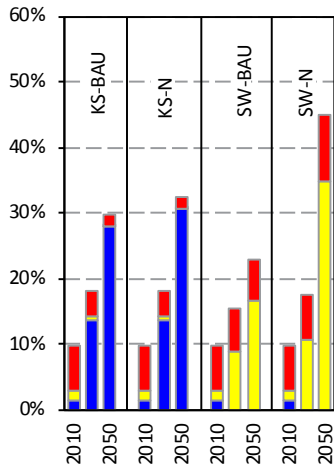
Dieser stellt die Umweltwirkungen dar, die durch die biogene und fossile Kraftstoff-, Strom- und Wärmeproduktion und -nutzung (als Teil des Energiesystems) verursacht werden. Die Betrachtung umfasst den Zeitraum von 2010 bis 2050 in den vier Szenarien Kraftstoff-BAU (= Business as usual, KS-BAU), Kraftstoff-Nachhaltig (KS-N), Strom- / Wärme-BAU (SW-BAU) und Strom- / Wärme-Nachhaltig (SW-N). Die Gesamt-Energiemengen für die einzelnen Sektoren sind aus (NITSCH et al., 2012), Szenario 2011 A entnommen, die Bioenergiemengen stammen aus BENSIM. Die berechneten Umweltwirkungen der Energieerzeugung entsprechen der abgeschätzten Entwicklung und nicht der offiziellen Berichterstattung. In Abbildung 5-29 werden die Umweltwirkungen ohne etwaige Landnutzungsänderungen dargestellt. Letztere werden in Abschnitt 5.4.2.3 gesondert betrachtet.

### Ergebnisse

- Der dargestellte Systemvergleich zeigt zwar in allen Szenarien über die Jahre zurückgehende Umweltwirkungen, diese sind allerdings auch dem sich verringerten Endenergiebedarf geschuldet. Grund hierfür ist, dass einerseits der Endenergiebedarf nach und nach zurückgeht und andererseits die anderen erneuerbaren Energien einen immer größeren Anteil an der Energieversorgung haben werden.

- Daher können die dargestellten Zeitpunkte nicht miteinander verglichen werden. Für einen Vergleich zwischen den Jahresschritten siehe nächster Abschnitt.
- Bei der Darstellung der Endenergie zeigt sich 2050 insbesondere im SW-N-Szenario ein negativer Balken für den aus fossilen Quellen gelieferten Strom, was sich in den Grafiken der Umweltwirkungen fortsetzt. Dies liegt daran, dass mehr Strom aus biogenen Quellen produziert wird als nach Leitstudie bzw. Tabelle 5-13 nötig, so dass die noch zu ersetzende Strommenge negativ wird. Mit anderen Worten stünde hier elektrische Energie zur Verfügung, die in zusätzliche sinnvolle Anwendungen gespeist werden kann.
- Beim Treibhauseffekt schlagen die Bioenergieträger in nur geringem Maße zu Buche, während sie bei Versauerung und Feinstaubbelastung in allen Szenarien bis 2050 auf teils über die Hälfte der gesamten Emissionen ansteigen. Dabei liegt beispielsweise 2050 im Szenario SW-N, wo die Bioenergie einen Anteil von 65 % an der Versauerung hat, der Bioenergieanteil bei nur 40 %. Hier ist die bekannte Tatsache zu erkennen, dass Bioenergieträger aus Anbaubiomasse verglichen mit fossilen Energien weniger zum Treibhauseffekt (und zum Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen), aber typischerweise in erhöhtem Maße zu anderen Umweltwirkungen beitragen.
- Der Rückgang der Treibhausgasemissionen ist im Szenario SW-N am größten (man beachte den negativen Balken), bei der Versauerung hingegen ist der Rückgang in den drei anderen Szenarien größer, d. h. es liegt ein Zielkonflikt vor.

Bioenergieanteil (System ohne andere EE)



Endenergie (System ohne andere EE)

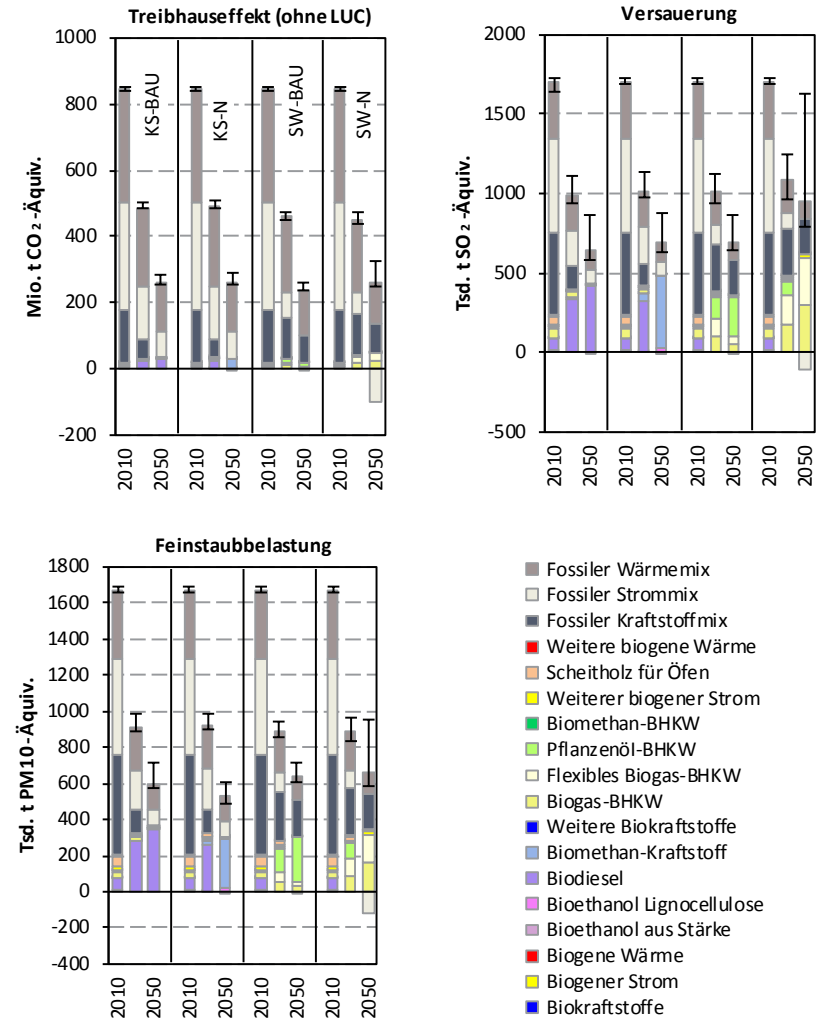
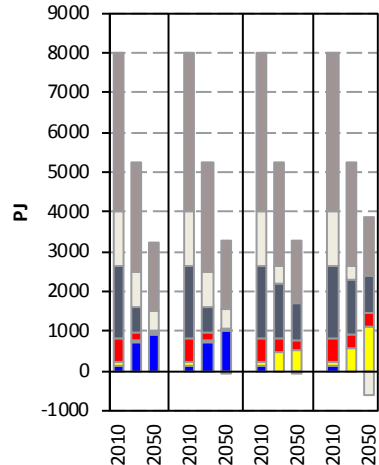


Abbildung 5-29: Umweltwirkungen der fossilen und biogenen Energiebereitstellung (ohne Landnutzungsänderungen) sowie Endenergie aus fossilen und biogenen Energieträgern in den vier Szenarien 2010, 2030 und 2050. Im Block „Bioenergieanteil“ ist das Verhältnis des jeweiligen Bioenergie-Balkenabschnitts im Block „Endenergie“ zum Gesamtbalken dargestellt. Die Bandbreiten stellen einen Entwicklungskorridor der Bioenergie dar, der die Unsicherheiten zukünftiger technologischer Entwicklungen abbildet. BHKW: Blockheizkraftwerk. EE: Erneuerbare Energien. PM10: Particulate Matter unter 10 µm (Feinstaub).

Lesebeispiel für den ersten Balken im Block „Treibhauseffekt“, Abb. 5-29 auf der vorigen Seite:

Dargestellt werden die Treibhausgasemissionen, die im Szenario KS-BAU im Jahr 2010 mit der fossilen und biogenen Energiebereitstellung verbunden sind. Insgesamt ergeben sich Emissionen von rund 900 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv. Dem Block „Endenergie“ lässt sich entnehmen, auf welche bereitgestellten Energiemengen die Treibhausgasemissionen zurückzuführen sind. Mit der Bereitstellung von gut 4 Exajoule (EJ; 1 EJ = 1.000 PJ) Wärmeenergie über fossile Energieträger (s. Block „Endenergie“) sind gut 400 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv. verbunden. Mit der Bereitstellung von ca. 600 PJ biogener Energie sind lediglich ca. 20 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv. verbunden.

#### 5.4.2.2 Technologien

In diesem Abschnitt werden die Umweltwirkungen analysiert, die bei jeweils gleicher Endenergie (Kraftstoff, Strom, Wärme) vollständig durch Bioenergie gedeckt werden können. Dabei wird über alle Szenarien und Zeitpunkte hinweg in jedem Sektor der maximal durch Bioenergie bereitstellbare Nutzen als Normierung für die Darstellung genommen. Die jeweilige Differenz zum maximalen Nutzen wird durch fossile Kraftstoff-, Strom- bzw. Wärmeenergie aufgefüllt. Daher sinkt z. B. in den Kraftstoff-Szenarien der dargestellte fossile Kraftstoffanteil bis 2050 auf null (wenn das betreffende Szenario die höchste produzierte Biokraftstoffmenge aufweist) bzw. nahe null.

Auch in diesem Abschnitt werden etwaige Landnutzungsänderungen nicht berücksichtigt. Letztere werden im nächsten Abschnitt gesondert betrachtet.

Zunächst werden in Abbildung 5-30 die Umweltwirkungen der Energiebereitstellung, differenziert nach Technologien und Jahren, für das Kraftstoff-BAU-Szenario dargestellt.

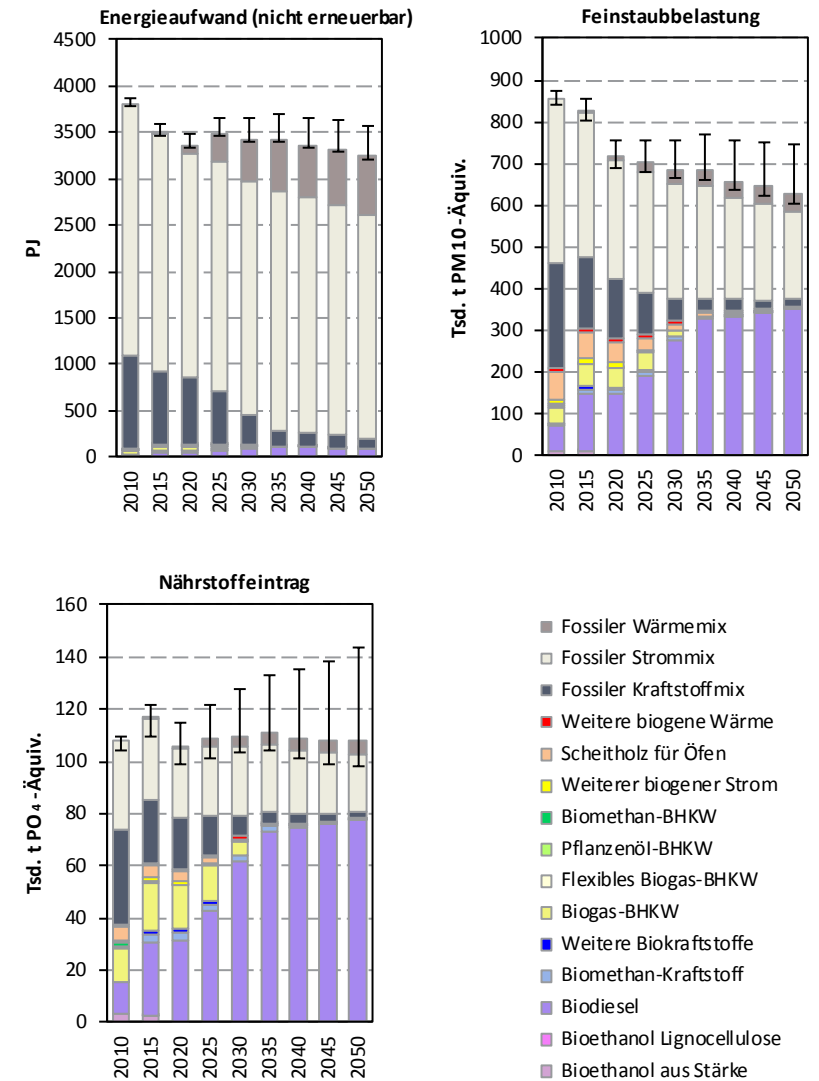
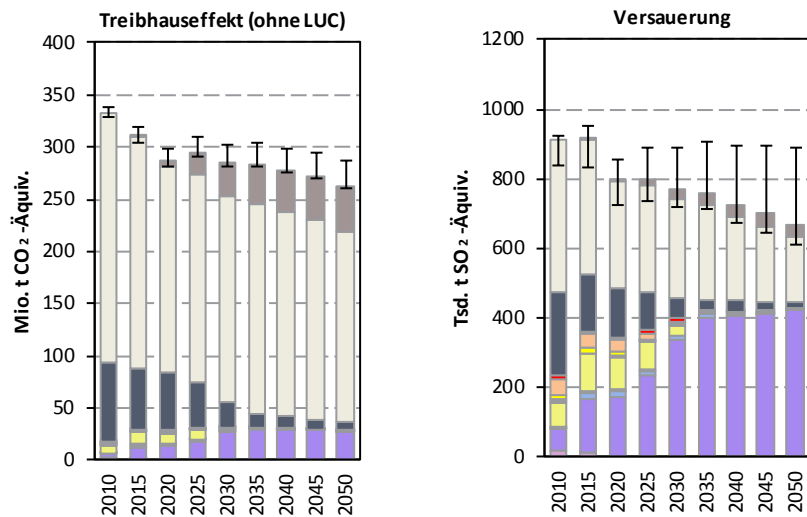


Abbildung 5-30: Umweltwirkungen der Energiebereitstellung bei normierter Endenergie (Summen aus biogener und fossiler Endenergie identisch); Differenzierung nach Technologien und Jahren für das KS-BAU-Szenario.

#### Lesebeispiel für den ersten und letzten Balken im Block „Treibhauseffekt“, zu Abb. 5-30:

Dargestellt werden die Treibhausgasemissionen, die im Szenario KS-BAU in den Jahren 2010 und 2050 mit fossiler und biogener Energiebereitstellung verbunden sind. Die Emissionen sinken von ca. 330 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv. im Jahr 2010 auf gut 250 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv. im Jahr 2050. Die Summe der Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung fossiler und biogener Kraftstoffe halbiert sich zwischen 2010 und 2050 von ca. 90 auf ca. 40 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquiv. Der Großteil der aus der Verwendung biogener Energieträger resultierenden Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 ist auf die Bereitstellung von Biodiesel zurückzuführen.

#### Ergebnisse zu Abbildung 5-30

- Die Treibhausgasemissionen und der (nicht-erneuerbare) Energieaufwand sinken über die Jahre. Grund hierfür ist der steigende Anteil der Bioenergieträger, die weniger Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch aus fossilen Ressourcen verursachen.
- Bei den anderen Umweltwirkungen gibt es zum Teil wenig Variation. Die Ursache liegt darin, dass die versauernden, eutrophierenden und Feinstaub bildenden Emissionen aus der Landwirtschaft auch in Zukunft ähnlich den oder teilweise höher als die entsprechenden Emissionen aus fossilen Energiequellen sind. Bei steigendem biogenem Anteil können die Gesamtemissionen in diesen Umweltwirkungen also nicht so stark sinken, sondern im Extremfall (ausschließlich Bioenergie) sogar noch ansteigen.
- Die Tatsache der teils steigenden Gesamtemissionen lässt sich anhand der dargestellten Bandbreiten z. B. beim Nährstoffeintrag nachvollziehen, die aufzeigen sollen, wie die Umweltwirkungen der Bioenergieträger – in einem als realistisch eingeschätzten günstigen und einem ungünstigen Fall – aussehen, die sich z. B. durch Umweltauflagen, Innovation in der Technologie oder Innovation durch Technologiesprung ergeben.
- Die Ergebnisse der anderen Szenarien (KS-N, KS-BAU-B, SW-BAU, SW-N und SW-BAU-B) sind im Anhang A 2.1 dargestellt. Zu den Unterschieden siehe nächster Abschnitt.

In der Abbildung 5-31 werden ausgewählte Umweltwirkungen in allen untersuchten Szenarien zu jeweils drei Zeitpunkten dargestellt (2010, 2030, 2050), um Aussagen über die Szenarien hinweg treffen zu können. Die Daten für das Kraftstoff-BAU-Szenario entsprechen den Ergebnissen in Abbildung 5-30.

#### Ergebnisse zu Abbildung 5-31

- Gut erkennbar ist, dass die Umweltwirkungen in den Nachhaltigkeitsszenarien gegen 2050 in der Regel niedriger ausfallen als in den BAU-Szenarien. Eine Ausnahme bildet hier das SW-N-Szenario mit zwar deutlich sinkenden Treibhausgasemissionen zwischen 2030 und 2050, aber nahezu unveränderten Werten für die Versauerung.
- Im Vergleich zwischen den Kraftstoff- und den Strom- / Wärme-Szenarien fällt kein signifikanter Unterschied auf. Auch hier sind allerdings ähnliche Effekte wie im vorstehenden Fall erkennbar: Während der Beitrag zum Treibhauseffekt in den SW Szenarien in Zukunft deutlich geringer wird als in den KS-Szenarien, liegen die anderen Umweltwirkungen in den SW-Szenarien höher (Zielkonflikt).

#### Lesebeispiel für den sechsten und den letzten Balken im Block „Versauerung“ (Abb. 5-31):

Dargestellt werden die Säurebildneremissionen der Szenarien KS-N und SW-N im Jahr 2050. Das Versauerungspotenzial ist im Szenario KS-N mit ca. 700 Tsd. t SO<sub>2</sub>-Äquiv. geringer als im Szenario SW-N (ca. 850 Tsd. t SO<sub>2</sub>-Äquiv.). Das größte Versauerungspotenzial weist im Szenario KS-N die Bereitstellung von Biomethan auf und im Szenario SW-N die Bereitstellung von Biogas. Aufgrund von Unsicherheiten in Bezug auf die technologische Entwicklung der Bereitstellung von Biogas ist die Ergebnisbandbreite im Szenario SW-N deutlich größer als im Szenario KS-N.

#### Lesebeispiel für den Block „Endenergie normiert (max. Bioenergie)“:

Dargestellt wird die Zusammensetzung der in den einzelnen Sektoren, Szenarien und Jahren bereitgestellten Endenergie. Die Summe aus biogener und fossiler Energiebereitstellung ist je Sektor konstant. Über alle drei Sektoren beträgt die Summe in allen Szenarien und Jahren ca. 2.700 PJ. So werden im Jahr 2050 im Szenario KS-N mehr Kraftstoffe aus Biomasse bereitgestellt als in den anderen Szenarien und Zeitscheiben (etwa 1.000 PJ). Die Normierung auf diesen Maximalwert lässt dort die Energiebereitstellung über fossile Kraftstoffe auf null sinken. Entsprechend werden maximal 1.100 PJ biogener Strom bereitgestellt, und zwar im Szenario SW-N im Jahr 2050, so dass dort die Energiebereitstellung über den fossilen Strommix auf null sinkt. Die maximal biogen bereitgestellte Wärme liegt bei knapp 600 PJ im Jahr 2010 (in allen Szenarien). In der Summe ergeben sich daraus die oben genannten 2.700 PJ.

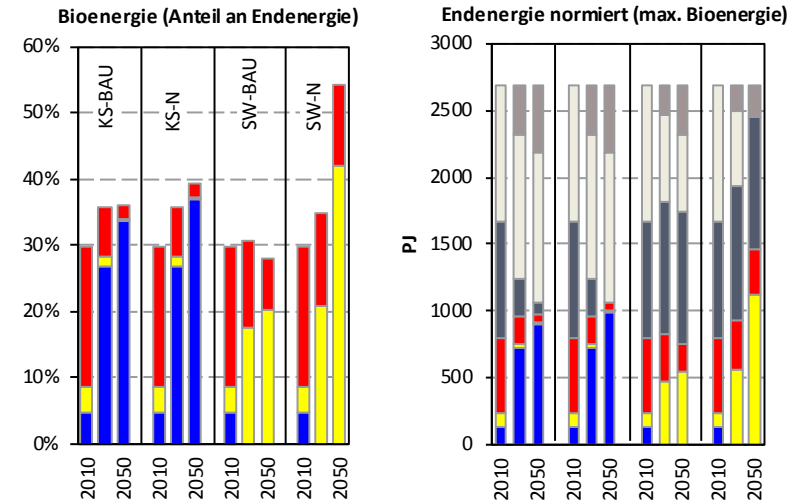
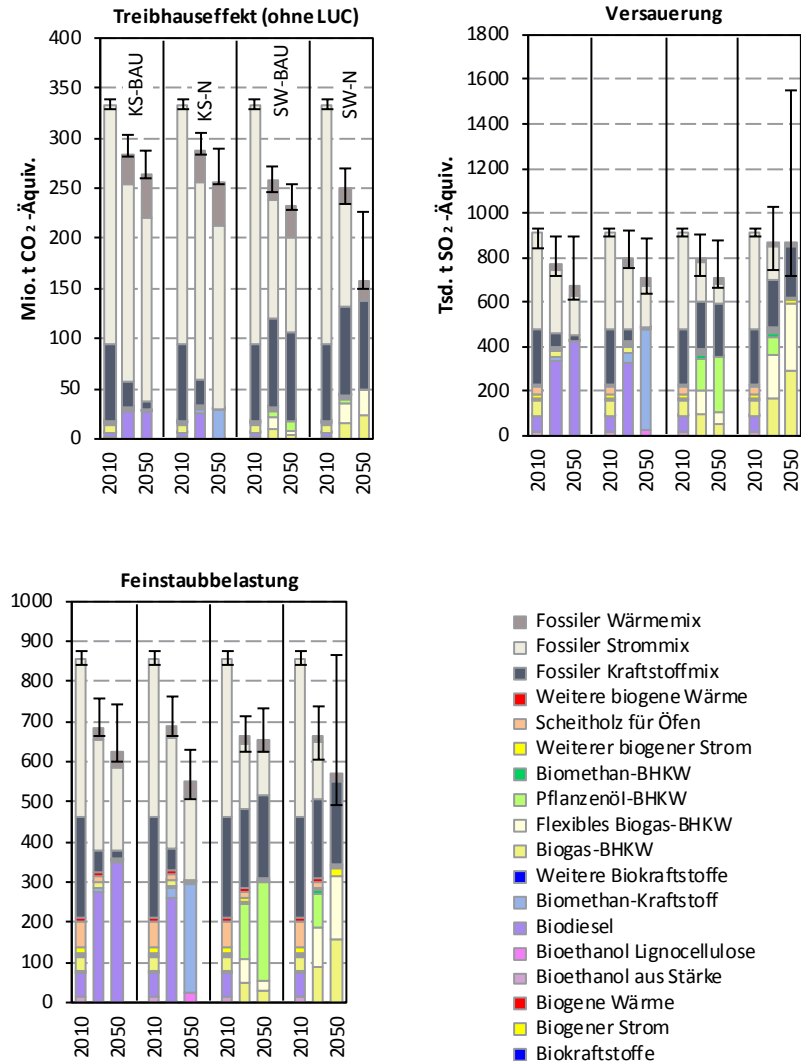


Abbildung 5-31: Treibhauseffekt, Versauerung und Feinstaubbelastung bei normierter Endenergie (Summen aus biogener und fossiler Endenergie identisch), Bioanteil an dieser Endenergie und Aufschlüsselung der Endenergie (Energiegehalte Kraftstoff, Strom, Wärme) auf fossile und Bioenergieträger in den vier Szenarien für 2010, 2030 und 2050.

#### 5.4.2.3 Landnutzung

Dieser Abschnitt zeigt die Landnutzungsänderungen und daraus resultierenden Treibhausgasemissionen auf, die sich in den Kraftstoff-Szenarien aufgrund unterschiedlicher Bioenergienutzung zusätzlich zu den Emissionen aus den Technologien ergeben. Da in den Strom- / Wärme-Szenarien nur unwesentliche Mengen an (welt-)handelbarer Biomasse in die energetische Nutzung gehen, ist hier eine sinnvolle Auswertung nicht möglich.

Wenn in einem Szenario (oder einer Zeitscheibe) höhere Biomassemengen zur Energiebereitstellung eingesetzt werden als in einem anderen, muss berücksichtigt werden, dass Anbaubiomasse zusätzlich produziert werden muss (bzw. Reststoffe nicht für andere Aufgaben zur Verfügung stehen). Die Konsequenz dieser Mehrbelastung ist eine zusätzliche Landnutzung für Bioenergie, die einerseits direkte Landnutzungsänderungen zur Folge haben kann, wenn für Energiepflanzen Grünland, Brache oder natürliche Landschaften umgebrochen werden, andererseits indirekte Landnutzungsänderungen, wenn auf bestehenden Ackerflächen neu Energiepflanzen angebaut werden, was dazu führt, dass die vormals dort produzierten Nahrungs- oder Futtermittel anderswo angebaut werden müssen.



**Beschreibung der Vorgehensweise und Randbedingungen:** Untersucht werden die durch Landnutzungsänderungen bedingten Treibhausgasemissionen in den Szenarien KS-BAU und KS-N. Das Referenzjahr der Abschreibung ist 2005; die Abschreibedauer beträgt 20 Jahre. Zunächst werden die aus MAGNET und LandSHIFT entnehmbaren Daten zu Flächenbelegungen aufgrund des Anbaus von Energiepflanzen zusammengestellt und parallel zu den durch die Verdrängung von Nahrungsmittelpflanzen aus der deutschen Landwirtschaft verursachten Flächenbelegungen anderswo in der Welt dargestellt.<sup>10</sup> In Abbildung 5-32 ist im Block „Anbaufläche“ links die direkte Flächenbelegung durch Energiepflanzen in den beiden Kraftstoff-Szenarien dargestellt, rechts die indirekte Flächenbelegung (Verdrängung von Weizenanbau aus Deutschland durch Energiepflanzenanbau). Daneben werden die mit Landnutzungsänderungen verbundenen Treibhausgasemissionen abgeschätzt, zum einen auf Basis der LandSHIFT-Ergebnisse und zum anderen auf Basis der von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen Faktoren für indirekte Landnutzungsänderungen (12 – 55 g CO<sub>2</sub>/MJ Biokraftstoff) (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2012). Die Effekte aus der Nutzung von Reststoffen wie Resthölzern und Getreidestroh sind definitionsgemäß nicht im Untersuchungsumfang. In Abbildung 5-32 In den beiden Blöcken „Treibhauseffekt“ sind die mit den in LandSHIFT modellierten Landnutzungsänderungen verbundenen Treibhausgasemissionen (Balken „LUC Welt“ und „LUC Europa“) sowie der durch indirekte Landnutzungsänderungen verursachte Treibhauseffekt als „iLUC“-Balken enthalten (differentielle Betrachtung, d. h. nur die Differenz zwischen iLUC und LUC ist als Balken „iLUC“ abgetragen).

#### Ergebnisse zu Abbildung 5-32

- Die Gesamtsumme der für Biokraftstoffe in Deutschland und im Ausland direkt oder indirekt belegten Anbauflächen entspricht in etwa der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche Deutschlands. Zusätzlich bedarf es natürlich auch Anbauflächen für Nahrungs- und Futtermittel, so dass sich Deutschlands Flächenfußabdruck bei einem stark auf Ölpflanzen basierten Kraftstoff Szenario massiv vergrößern würde. Das Szenario KS-N schneidet diesbezüglich günstiger ab.

<sup>10</sup> Aufgrund der fehlenden Referenzszenarien können hier nicht die gesamten indirekten Landnutzungsänderungen (iLUC) bestimmt werden. Die Verdrängungseffekte beziehen sich nur auf Deutschland und stellen damit nur einen Teil des iLUC dar.

- Landnutzungsänderungen finden überwiegend im nichteuropäischen Ausland statt (siehe auch Kap. 5.3 bzw. Kap. 5.5). Die durch direkte Landnutzungsänderungen verursachten Treibhausgasemissionen können die durch den Anbau, Bereitstellung und Nutzung von Bioenergeträger bedingten Emissionen deutlich vergrößern. Berücksichtigt man auch indirekte Effekte, so liegen die Effekte unter Umständen bei über dem Doppelten. Dies ist der Fall insbesondere gegen 2050, wenn die abbeschriebenen Treibhausgasemissionen aus den 20 Vorjahren voll zu Buche schlagen. Im Szenario KS-N sinken die iLUC-Treibhausgasemissionen ab 2040 aufgrund des Wechsels vom Biodiesel zum Biomethankraftstoff, da mit Stärkepflanzen laut (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2012) geringere indirekte Effekte als mit Ölpflanzen verbunden sind.
- Beim gesamten Treibhauseffekt, wie er in Abbildung 5-30 dargestellt ist, besteht daher in beiden Szenarien das Risiko, dass die Emissionen nur noch minimal zurückgehen und im ungünstigen Fall trotz Bioenergieeinsatz über lange Jahre in etwa konstant bleiben. Lediglich im Nachhaltig-Szenario tendieren die Emissionen nach 2040 etwas nach unten. Eine detailliertere Darstellung der Treibhausgasemissionen der biogenen Energieträger findet sich im Anhang A 2.1.

#### Lesebeispiel für den Block „Anbaufläche“, erster Balken, in Abb. 5-32 auf der nächsten Seite:

Dargestellt werden die Anbauflächen, die im Szenario KS-BAU für die Bereitstellung von Biokraftstoffen im Jahr 2030 benötigt werden. In Deutschland werden ca. 2 Mio. ha Anbaufläche direkt für den Anbau der entsprechenden Energiepflanzen belegt, mehr als die Hälfte davon für die Bereitstellung von Biodiesel. Außerdem werden ca. 10 Mio. ha Anbaufläche außerhalb Deutschlands für den Anbau dieser Pflanzen belegt, größtenteils für die Bereitstellung von Biodiesel. Durch den Energiepflanzenanbau in Deutschland wird die vorherige landwirtschaftliche Produktion auf andere Flächen verdrängt, wodurch knapp 4 Mio. ha Anbaufläche im Ausland belegt werden. Auch der Pflanzenanbau außerhalb Deutschlands führt zur Verdrängung der vorherigen landwirtschaftlichen Produktion, so dass die Energiebereitstellung im Szenario KS-BAU mit der Belegung weiterer Anbauflächen verbunden ist. Deren Größe wurde im Rahmen dieses Projekts nicht quantifiziert. Stattdessen wird der Effekt qualitativ durch Pfeile abgebildet.

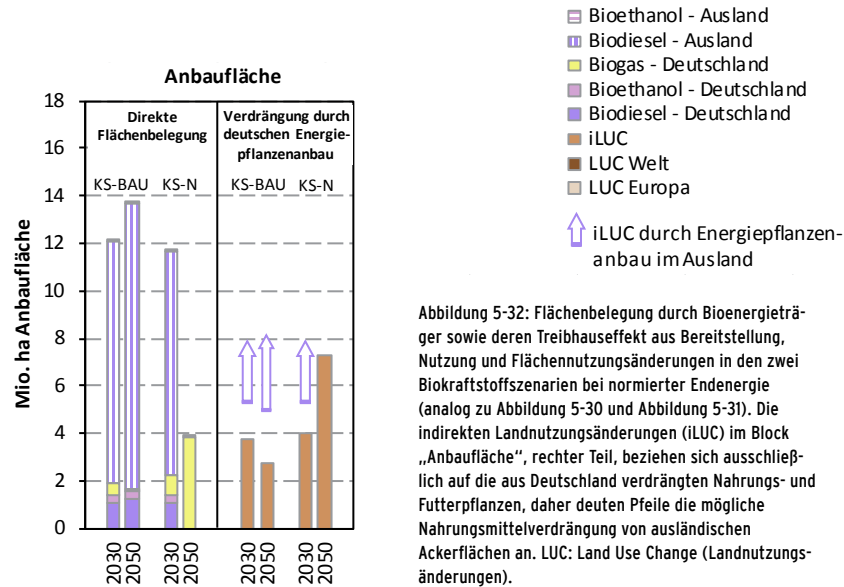
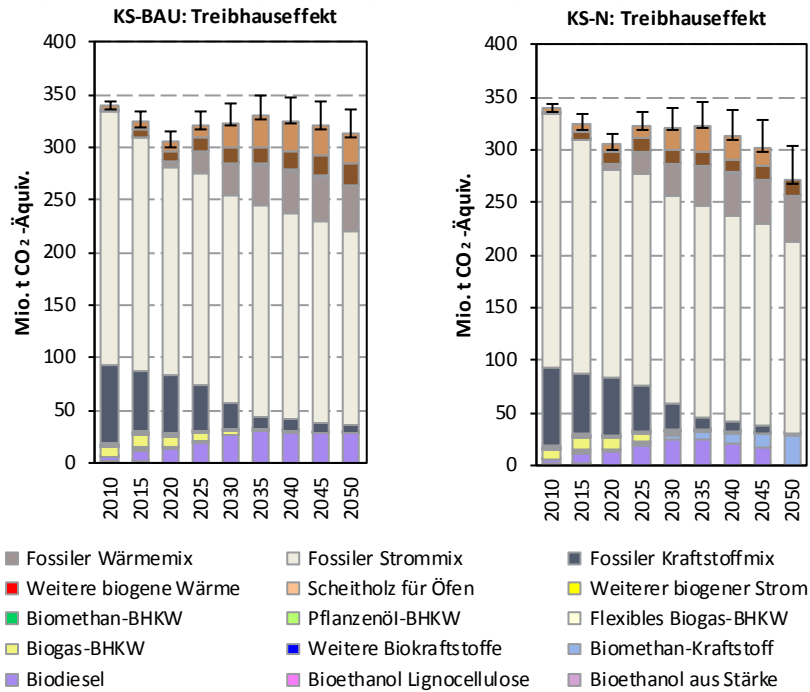


Abbildung 5-32: Flächenbelegung durch Bioenergieträger sowie deren Treibhauseffekt aus Bereitstellung, Nutzung und Flächennutzungsänderungen in den zwei Biokraftstoffszenerarien bei normierter Endenergie (analog zu Abbildung 5-30 und Abbildung 5-31). Die indirekten Landnutzungsänderungen (iLUC) im Block „Anbaufläche“, rechter Teil, beziehen sich ausschließlich auf die aus Deutschland verdrängten Nahrungs- und Futterpflanzen, daher deuten Pfeile die mögliche Nahrungsmittelverdrängung von ausländischen Ackerflächen an. LUC: Land Use Change (Landnutzungsänderungen).

5.4.2.4 Sensitivitätsanalysen

Zum vollständigen Systemverständnis ist es nötig, auch den Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen auf die Umweltwirkungen der Bioenergieproduktion und -nutzung zu untersuchen. In diesem Abschnitt werden zwei dieser Sensitivitätsanalysen vorgestellt.

Verbot von Biokraftstoffen erster Generation und Pflanzenöl-BHKWs

Zunächst wird dargestellt, wie sich die Umweltwirkungen verändern, wenn bei „business as usual“ im Kraftstoff-Szenario nach 2025 keine Nahrungsmittelpflanzen für die Kraftstoffproduktion mehr verwendet werden und im Strom- / Wärme-Szenario Pflanzenöl-BHKWs auslaufen („BAU-B“-Berechnungen).

Ergebnisse zu Abbildung 5-33

- Die Unterschiede zwischen den BAU- und den BAU-B-Szenarien sind relativ gering. Beim KS-BAU-B-Szenario tritt ein ähnlicher Effekt wie zwischen dem KS-BAU- und dem KS-N-Szenario auf, nämlich bei nahezu konstantem Treibhauseffekt 2050 eine Erhöhung der Versauerung und eine Verminderung der Feinstaubbelastung. Der Grund hierfür liegt in einem Wechsel vom Biodiesel zum Biomethankraftstoff.
- Das SW-BAU-B-Szenario schneidet beim Treibhauseffekt und der Versauerung leicht schlechter ab als das SW-BAU-Szenario, beim Feinstaub aber günstiger. Auch hier ist der Wechsel im Brennstoff Ursache, von den Pflanzenölen zum Biogas.

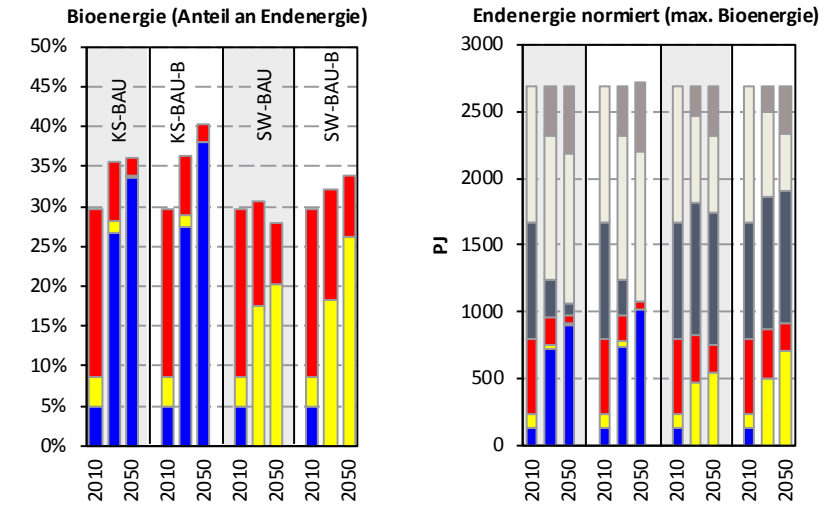
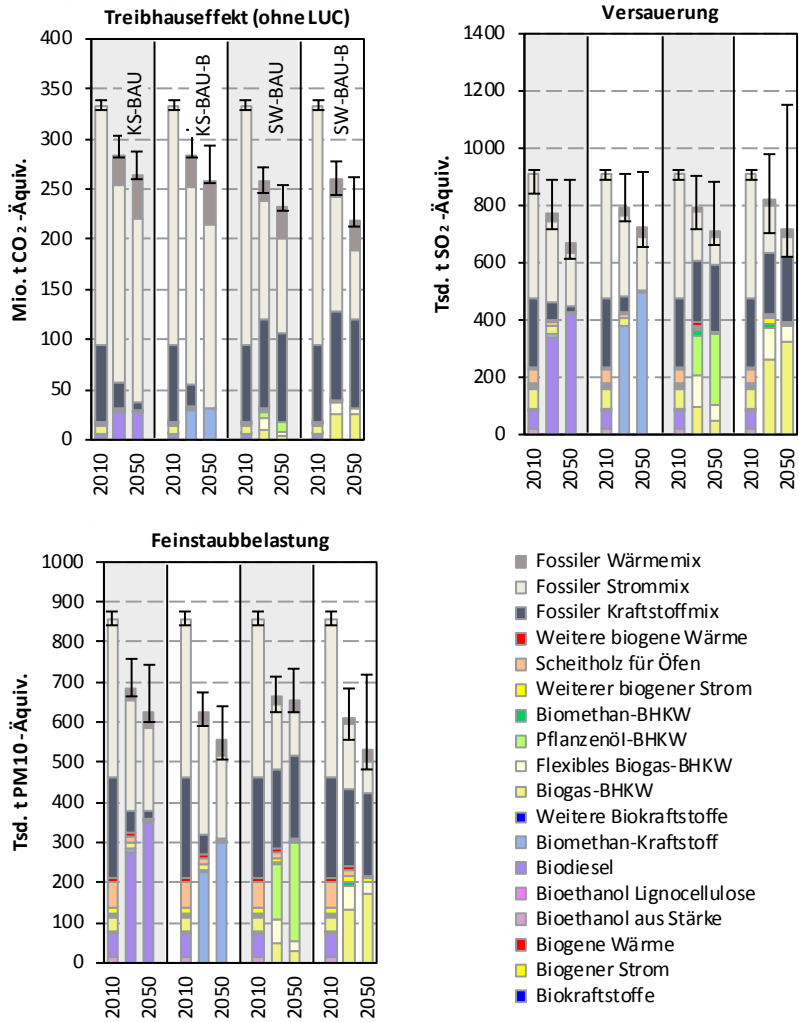
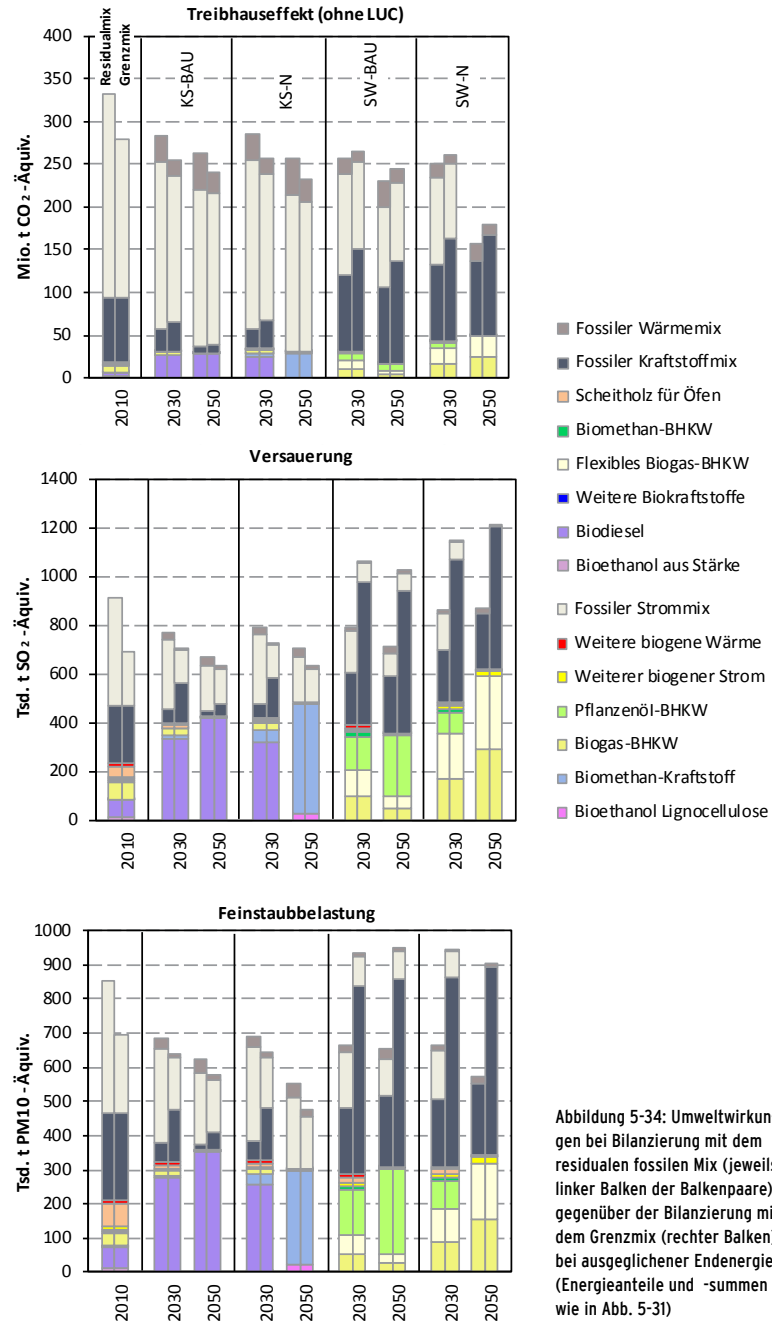


Abbildung 5-33: Umweltwirkungen in den beiden BAU-B-Szenarien bei ausgeglichener Endenergie (Summen aus biogener und fossiler Endenergie identisch) im Vergleich zu den BAU-Szenarien 2010, 2030 und 2050

**Unterschiedliche Bilanzierungsweise: Grenzmix versus Residualmix**

Diese Analyse beschreibt die Unterschiede, die sich in den Umweltwirkungen ergeben, wenn angesetzt wird, dass durch Bioenergie nicht alle fossilen Energieträger gleichermaßen ersetzt werden (Substitution des Residualmix), sondern bestimmte fossile Energieträger eher ersetzt werden als andere (Substitution des Grenzmix). Dieser Grenzmix stammt laut Methodenhandbuch des BMWi-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ (THRÄN et al., 2013) bei den Kraftstoffen aus kanadischen Ölsanden, beim Strom aus Erdgas-Gas- und Dampf(GuD)- und Import-Steinkohle-Kraftwerken und bei der Wärme aus Erdgas-Brennwert-Heizungen. Damit wird ausgesagt, dass die Nutzung von Biokraftstoffen in erster Linie den Import von Kraftstoff aus Ölsanden verringert oder Wärme aus Biomasse zunächst die Nutzung von Erdgas-Brennwert-Heizungen einschränkt. Da bisher der Import von Ölsanden noch nicht erfolgte, wird davon ausgegangen, dass in der Grenzbetrachtung 2010 mit geringer werdendem Anteil bis incl. 2025 der residuale fossile Kraftstoffmix ersetzt wird.



## Ergebnisse zu Abbildung 5-34

- In den Kraftstoffszenarien zeigt die Bilanzierung mit dem Grenzmix gegenüber dem Residualmix niedrigere Umweltwirkungen. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass der fossile Strom und die fossile Wärme bei der Grenz Betrachtung aus umweltbezogen besonders günstigen Technologien stammen. Die Umweltwirkungen fallen jedoch über die Jahre nicht so stark oder bleiben sogar (bei der Versauerung) nahezu konstant, weil die im Grenzmix zugrunde gelegten Kraftwerke bzw. Wärmereizeuger schon sehr effizient und ausgereift sind.
- In den Strom- / Wärme-Szenarien sind die Umweltwirkungen für die Grenzmix-Bilanzierung 2010 geringer und in den darauf folgenden Zeitscheiben höher als für den Residualmix. Versauerung und Feinstaubbelastung nehmen dadurch von 2010 bis 2030 deutlich zu, während sich der Treibhauseffekt weiterhin, wenn auch abgeschwächt, über die Jahre verringert. Dieser Sprung beruht ebenso wie das schlechtere Abschneiden in den späteren Jahren auf der Wandlung des Kraftstoff-Grenzmixes vom fossilen Residualmix hin zum Kraftstoff aus Ölsanden. Das bessere Abschneiden 2010 liegt wiederum an den geringeren Umweltwirkungen der Grenzmixe für Strom und Wärme.
- Auch bei Bilanzierung mit dem Grenzmix gibt es keine wissenschaftlich objektive Aussage, welches Szenario zu bevorzugen ist. Wird subjektiv einer Reduzierung des Treibhauseffekts die höchste Priorität eingeräumt, dann ist weiterhin das stärker nachhaltige Strom- / Wärme-Szenario SW-N zu bevorzugen.

## Lesebeispiel für den siebten und achten Balken im Block „Feinstaubbelastung“:

Dargestellt wird die Feinstaubbelastung des Szenarios KS-N im Jahr 2030 unter Ansetzung des fossilen Residualmixes (siebter Balken) und des Grenzmixes (achter Balken). Erfolgt die Bilanzierung mit dem Residualmix, ergeben sich höhere Feinstaubbelastungen (knapp 700 Tsd. t PM<sub>10</sub>-Äquiv.) als bei Bilanzierung mit dem Grenzmix (gut 600 Tsd. t PM<sub>10</sub>-Äquiv.). Die mit der biogenen Energiebereitstellung verbundenen Feinstaubbelastungen sind bei beiden Bilanzierungsansätzen nahezu gleich groß. Die fossile Strombereitstellung ist beim Grenzmix mit deutlich geringeren Feinstaubbelastungen verbunden als beim Residualmix. Andererseits ist die Bereitstellung fossiler Kraftstoffe beim Grenzmix mit größeren Belastungen verbunden als beim Residualmix.

### 5.4.3 Schlussfolgerungen

#### Zusammenführung

Die Analyse der Umweltwirkungen im Vergleich der Technologien zeigt, dass der fossile Energieaufwand bei normiertem Endenergiebedarf (Nutzenkorbanatz) in allen Szenarien über die Jahre sinkt. Gleiches gilt grundsätzlich für die Feinstaubbelastung und die Versauerung, wobei sich hier allerdings die Bandbreite der möglichen Werte so breit entwickelt, dass in einem ungünstigen Fall auch ein Anwachsen der Werte denkbar erscheint. Der Nährstoffeintrag zeigt keine Tendenz zu fallen, sondern steigt in einigen Szenarien sogar leicht an. Auch beim Treibhauseffekt gehen die technologiebedingten Emissionen über die Jahre zurück, allerdings schlagen hier zusätzliche Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderungen deutlich zu Buche (siehe unten). Letztere können teilweise noch einmal so hoch oder höher sein als die Emissionen aus Anbau, Verarbeitung und Nutzung der Bioenergieträger. Insbesondere bei Berücksichtigung indirekter Effekte (nur für Kraftstoffszenerarien möglich) besteht das Risiko, dass die Gesamt-Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2025 bis 2040 nur geringfügig sinken und im Fall ungünstiger Randbedingungen trotz Bioenergieinsatz sogar konstant bleiben.

Wie in den Sensitivitätsanalysen dargestellt, zeigen sich ähnliche Bilder auch unter anderen Rahmenbedingungen.

Aufgrund dieser Konstellation kann man aus wissenschaftlich-objektiver Sicht keinem Szenario den Vorzug geben. Erst wenn subjektive Kriterien einfließen, lässt sich eine Bewertung vornehmen. Wenn beispielsweise der Verringerung der Treibhausgasemissionen der absolute Vorrang gegeben werden soll, so sind die Strom- / Wärme-Szenarien und davon insbesondere das Strom- / Wärme-Nachhaltig-Szenario den übrigen Szenarien vorzuziehen.

Im Folgenden werden Einzelaspekte von Fragestellungen näher untersucht, die im Rahmen der Umweltanalyse von Bioenergie von Belang sind.

#### Fragestellungen

##### 1. Wie entwickeln sich die Umweltwirkungen in den einzelnen Technologien und der Landwirtschaft?

- Signifikante Umweltvorteile ergeben sich durch die Effizienzsteigerungen sowohl bei der Energienutzung als auch (bei neueren, innovativen Technologien) in der Bereitstellung der Energieträger.
- Versauerung, Nährstoffeintrag und Feinstaubbelastung können stark durch die Rahmenbedingungen, z. B. Umweltauflagen, beeinflusst werden. Diese ökologische Ausrichtung gehört zu einer nachhaltigen Bioenergiestrategie dazu und trägt damit dazu bei, dass die natürlichen Lebensgrundlagen in diesen Umweltwirkungen durch den Umbau des Energiesystems nicht stärker als zuvor belastet werden.

- Bei allen Technologien zeigen sich überwiegend sinkende Emissionen. Nur bestimmte schon ausgereifte Technologien, die typischerweise keine größeren Emissionsminderungen erwarten lassen, haben in ungünstigen Fällen steigende Emissionen, da hier externe Faktoren wie ein steigender Anteil an Harnstoff-Düngung zum Tragen kommen. Hier kann die Politik insbesondere in der Landwirtschaft durch Rahmenvorgaben negative Effekte verhindern und positive Ziele anstreben.
- Die Treibhausgasemissionen aufgrund von direkten und indirekten Landnutzungsänderungen liegen grob in der Höhe der Emissionen des übrigen Lebensweges der Bioenergieträger. Dies liegt besonders am signifikanten Flächenverbrauch von Naturflächen wie Wäldern, Mooren und Grünland, der auch in Zukunft weitergehen wird.

##### 2. Wie entwickeln sich die Umweltwirkungen in den einzelnen Szenarien?

- Da sich die Szenarien aus einzelnen Technologien zusammensetzen und sogar überwiegend von einzelnen Technologien bestimmt sind, gilt das zur ersten Frage Gesagte.
- Insgesamt zeigen sich in allen Szenarien überwiegend sinkende Emissionen. Ausnahmen hiervon bilden Treibhauseffekt und Nährstoffeintrag. Beim Treibhauseffekt besteht aufgrund von Landnutzungsänderungen das Risiko, dass die Emissionen im Laufe der Jahre nur geringfügig sinken und im Fall ungünstiger Randbedingungen trotz Bioenergieinsatz sogar über viele Jahre auf gleichem Niveau bleiben. Beim Nährstoffeintrag wird erwartet, dass er in keinem Szenario fällt.
- Die Strom- / Wärme-Szenarien erreichen höhere Treibhausgaseinsparungen als die Kraftstoff-Szenarien.

##### 3. Wie entwickeln sich die Umweltwirkungen des Gesamtsystems?

- In einem Energiesystem aus fossilen und biogenen Quellen, das einen konstanten Kraftstoff-, Strom- und Wärmebedarf befriedigt (Nutzenkorbanatz), sinken die Emissionen über die Jahre mit Ausnahme von Treibhauseffekt und Nährstoffeintrag (siehe Antworten zur vorigen Fragestellung).
- Um das gesamte Energiesystem zu analysieren, müssen noch die anderen erneuerbaren Energiequellen sowie bis 2020 Atomstrom berücksichtigt werden, deren Emissionen gegenüber den fossilen und auch biogenen Energieträgern recht gering sind.
- Aufgrund des bis 2050 sinkenden Endenergiebedarfs, der zudem teilweise durch die anderen erneuerbaren Energieträger gedeckt wird, reduzieren sich auch die Umweltwirkungen des Energiesystems.



### Handlungsempfehlungen

- Die Bundesregierung sollte durch Rahmenvorgaben sicherstellen, dass der Umbau des Energiesystems nicht zu einer Erhöhung von Umweltlasten führt. Neben der Erreichung der Klimaschutzziele sollte insbesondere auch die Erreichung der gesteckten Zielvorgaben im Bereich Wasser-, Boden- und Luftreinhaltung (z. B. Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000/60/EG) oder Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe (NEC, 2001/81/EG, [2001/81/EG 2001]) sichergestellt werden.
- Wenn das oberste Ziel einer Bioenergiestrategie der Klimaschutz wäre, sollte ein nachhaltiges Strom- / Wärme-Szenario (SW-N) angestrebt werden, da hiermit die meisten Treibhausgasemissionen vermieden werden würden.
- Hierbei sollte aber darauf geachtet werden, dass das hinsichtlich des Treibhauseffektes günstige Biomethan und Biogas aus großen Anlagen im Hinblick auf andere Umweltwirkungen schlechter als die übrigen untersuchten Bioenergieträger abschneidet.
- Zu den Maßnahmen im landwirtschaftlichen Bereich kann zählen, den Düngemiteleinsatz stärker zu reglementieren und zu kontrollieren, nicht nur hinsichtlich der Mengen, sondern auch der Art des Stickstoffdüngers. Beispielsweise führt der aus Klimaschutzsicht günstige Harnstoff zu einer Erhöhung der Ammoniak-Emissionen und damit zu einer Erhöhung anderer Umweltwirkungen.
- Die Bundesregierung sollte die national wie international zu erwartende Intensivierung in der Landwirtschaft wissenschaftlich kritisch begleiten und Maßnahmen ergreifen, um deren Nachhaltigkeit zu gewährleisten.
- Ferner sollte die Bundesregierung sich in internationalem Rahmen aktiv für den Schutz von kohlenstoffreichen Flächen wie Primärwäldern und Torfmooren einsetzen.
- Nicht zuletzt sollte der Biomassebedarf durch Vorgaben zur Energieeffizienz, aber auch Maßnahmen zur Verringerung der Tierproduktion so niedrig wie möglich gehalten werden.

### Limitierungen der Untersuchung und Forschungsbedarf

- Die vorliegenden Analysen beruhen auf Modellläufen verschiedener Wirtschafts-, Landnutzungs- und Bioenergiemodelle (MAGNET, LandSHIFT und BENSIM). Obwohl die qualitativen Ergebnisse als grundsätzlich stabil angesehen werden können, entsprechen die ermittelten Zahlenwerte aufgrund der Vielzahl der eingehenden Faktoren und der wissenschaftlichen Zielrichtung dieser Untersuchung grundsätzlich nicht denen der offiziellen Berichterstattung zu Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen, sind aber in sich konsistent.

- Aufgrund der manuellen Kopplung der Modelle über wiederholte Datenangleichung ergeben sich zum Teil Unterschiede zwischen den Modellen hinsichtlich der Basisdaten und Randbedingungen. So wird beispielsweise bei den Ökobilanzen mit festen Ertragssteigerungen gerechnet, während MAGNET zusätzlich zu einer festen Basissteigerung einen von der wirtschaftlichen Entwicklung der Ländergruppe abhängigen zusätzlichen Faktor intern bestimmt. Während in (GÄRTNER et al., 2014) Annahmen zu den Entwicklungen in der Landwirtschaft ein Korridor der Ertragssteigerungen von 0 bis 0,8 % pro Jahr für etablierte Kulturen und von 0,3 bis 1,2 % für weniger etablierte Bioenergiepflanzen abgeleitet wurde, gehen die durch MAGNET ermittelten Ertragssteigerungen leicht darüber hinaus und liegen in den Nachhaltigkeitsszenarien z. T. bei 0,92 bzw. 1,35 % (siehe Tabelle 5 3 in Kap. 5.2.3.2). Deutlich höhere Erträge bergen das Risiko höherer Emissionen von Nährstoffen in Böden und Gewässer, aber auch die Luft. Insofern können sie zu erhöhten Umweltwirkungen führen.
- Die indirekten Auswirkungen der landwirtschaftlichen Flächennutzung für Bioenergie sind in diesem Vorhaben nicht genuin über die Modelle untersucht, sondern in einem rudimentären Ansatz abgeschätzt worden. In einem Folgevorbahn könnten Parallelszenarien ohne Bioenergienutzung in Deutschland berechnet werden. Die Differenz, die sich zu den vorliegenden Szenarien mit Bioenergienutzung ergibt, ist dann die Gesamtwirkung der deutschen Bioenergienutzung auf die Flächenbelegung und das zugehörige Kohlenstoffinventar. Indirekte Effekte entsprechen der Differenz zwischen der direkten Flächenbelegung durch Energiepflanzen und der Gesamtwirkung auf die Flächen.

## 5.5 Ökologische Bewertung der Landnutzung

Im Hinblick auf die ökologische Bewertung der Landnutzung werden flächenbezogene Risiken durch die Biomassenachfrage für die Schutzgüter Biologische Vielfalt und Boden analysiert. Hierzu werden zuerst globale Flächenmuster betrachtet. Hierauf aufbauend wird die Flächennutzung zur Produktion der Biomasse, die zur energetischen Nutzung in Deutschland benötigt wird, dargestellt.

### 5.5.1 Bewertungsansatz

Die Bewertung der ökologischen Risiken für die Biologische Vielfalt und den Boden basiert auf den Ergebnissen aus LandSHIFT (Landnutzungsmuster) und MAGNET (Biomasseproduktion und -handel). Eine ausführliche Beschreibung des methodischen Ansatzes findet sich im Anhang A 3.1.6. Auf Basis der räumlich hoch aufgelösten Information wird für die Feldfrüchte (MAGNET-Kategorien) in einem Land die Flächenbelegung für die Zeitscheiben 2007, 2030 und 2050 ermittelt. Anhand der Handelsinformationen aus MAGNET sind die Rohstoffmengen, die zur energetischen Nutzung in Deutschland verwendet werden, bekannt. In den Ergebnissen werden zum einen eine weltweite Bewertung und zum anderen eine Bewertung der Biomassenutzung in Deutschland dargestellt.

Zur Bewertung der Auswirkung des Anbaus auf Böden wird die Bodeneignungskarte von IIASA verwendet (IIASA-Bodendaten „Soil-constrained-combined [Plate 27]). Die IIASA-Kategorien 1 bis 4 werden als Böden mit guter Eignung für eine landwirtschaftliche Nutzung zusammengefasst. Den IIASA-Kategorien 5 und 6 kommt eine mittlere Eignung für die landwirtschaftliche Nutzung zu. Hingegen sind die IIASA-Kategorien 7 und 8 nur schlecht für eine landwirtschaftliche Nutzung geeignet. Für eine Bewertung der Flächen wird angenommen, dass eine schlechte Eignung für die landwirtschaftliche Nutzung in der Regel auch mit höheren Risiken für den Boden einhergeht. Die Darstellung erfolgt für die Jahre 2007, 2030 und 2050.

Um mögliche Risiken für die Biologische Vielfalt einzustufen, wird die Flächenbelegung für den Anbau von Biomasse in den Zeitscheiben 2030 und 2050 mit der Flächenbelegung im Jahr 2007 verglichen.<sup>11</sup> Es wird also der kumulative Effekt durch die Flächenumwandlung betrachtet. Es kann damit analysiert werden, ob Biomasse von bereits bestehenden Anbauflächen stammt oder ob bisher nicht genutzte Flächen verwendet werden (Schutzgebiete, Primärwälder, Wald, ungenutztes Grünland (Grasland / Buschland), Feuchtgebiete oder Torfmoor). Zur Bewertung wird eine Umwandlung von Schutzgebieten und Primärwald als ein hohes Risiko für die Biologische Vielfalt eingestuft. Für die Umwandlung von Wald, ungenutztem Grünland, Feuchtgebieten und Torfmoor wird ein mittleres Risiko für die Biologische Vielfalt angenommen. Für bereits genutzte Flächen wird ein geringes Risiko (Low Risk) angenommen. Im Hinblick auf bereits genutztes Grünland ist eine Differenzierung in genutztes Grünland mit großer Biologischer Vielfalt und genutztes Grünland mit geringer Biologischer Vielfalt nicht möglich. Da der Flächenanteil von der letzten Kategorie im weltweiten Maßstab deutlich überwiegt, wird für die Umwandlung von genutztem Grünland hin zu Ackerland ein niedriges Risiko angenommen. In einer Bewertung ist es aber notwendig, auf Länderebene mögliche Risiken zu diskutieren.

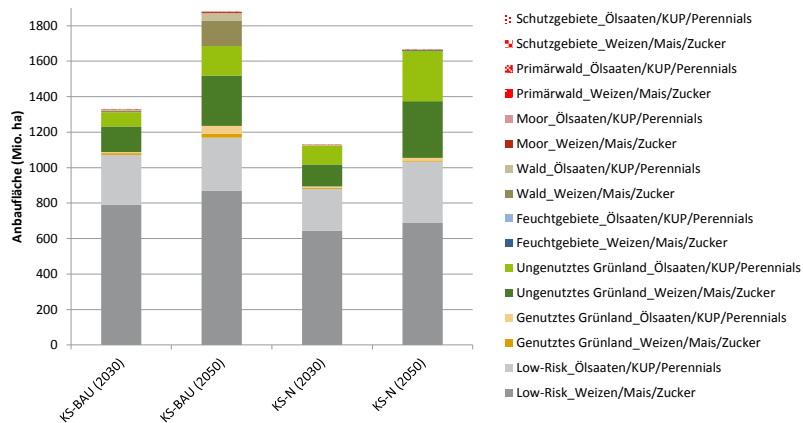


Abbildung 5-35: Globale Flächennutzung von Flächen mit niedrigem, mittlerem und hohem Risiko für die Biologische Vielfalt durch Feldfrüchte, die für Biokraftstoffe genutzt werden können (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N).

<sup>11</sup> Mit dieser Differenzbetrachtung können nur Werte für das Jahr 2030 und 2050 dargestellt werden.

Die Analyse der Flächen findet auf Basis einer mittleren Flächennutzung für eine Feldfrucht in einem Land bzw. einer Ländergruppe statt. Dies bedeutet, dass z. B. für die Anbaufläche von Zuckerrohr in Brasilien der Anteil der oben genannten Flächen bestimmt wird und auch für Importe nach Deutschland gilt. Es wird also der mittlere Anbaueffekt bewertet und nicht der Effekt, der durch eine zusätzliche Nachfrage aus Deutschland entsteht.

Die ökologische Bewertung basiert vor allem auf den Effekten von gehandelter Biomasse. Da in den Szenarien SW-BAU und SW-N die Importe nach Deutschland weitestgehend ausgeschlossen werden, ist in diesen Szenarien keine sinnvolle Auswertung möglich und es wird auf eine Darstellung verzichtet.

## 5.5.2 Risiken für die Biologische Vielfalt

### 5.5.2.1 Globale Risiken (Kraftstoff-Szenarien)

Die globale Auswertung der Nutzungsmuster zeigt, dass im Szenario KS-BAU im Jahr 2030 die Anbaufläche bei ca. 1.350 Mio. ha lag (Abb. 5-35). Dabei wurden ca. 80 % der Anbaufläche zu Flächen mit niedrigen Risiken für die Biologische Vielfalt genutzt. Die im Jahr 2030 neu erschlossenen Anbauflächen liegen vor allem auf ehemaligen Grünlandflächen, wobei die zuvor ungenutzten Grünlandflächen (mittleres Risiko) eine deutlich höhere Rolle spielen als bereits genutzte Grünlandflächen (geringes bis mittleres Risiko). Andere Flächen mit mittlerem Risiko für die Biologische Vielfalt (Wälder, Feuchtgebiete und Torfmoor) und Flächen mit hohem Risiko für die Biologische Vielfalt (Schutzgebiete und Primärwälder) werden kaum neu erschlossen (Abb. 5-35).

Bis ins Jahr 2050 steigt im Szenario KS-BAU die globale Anbaufläche auf gut 1.850 Mio. ha an. Dabei nehmen Flächen mit geringem Risiko für die Biologische Vielfalt nur leicht zu, wohingegen Grünland- und zu einem kleineren Anteil auch Waldflächen (mittleres Risiko für die Biologische Vielfalt) deutlich zunehmen. Flächen mit hohem Risiko für die Biologische Vielfalt (Schutzgebiete und Primärwaldflächen) werden auch im Jahr 2050 im Szenario KS-BAU in nur geringem Umfang in Nutzung genommen (Abb. 5-35).

Es ist herauszustellen, dass im Szenario KS-BAU insbesondere Risiken durch die Umwandlung von Grünlandflächen in Anbauflächen bestehen. Unter den Grünlandflächen kann sich Grünland mit großer biologischer Vielfalt befinden, was aber aufgrund einer fehlenden Datengrundlage nicht eingeschätzt werden kann. Waldflächen werden deutlich weniger als neue Anbauflächen in Anspruch genommen. Dies fällt erst nach dem Jahr 2030 ins Gewicht. Auch hier können unter diesen kleinräumige Waldflächen mit großer biologischer Vielfalt sein, da nur großflächige Primärwälder als eigene Kategorie betrachtet werden konnten (Abb. 5-35).

Im Szenario KS-N lag die gesamte Anbaufläche mit gut 1.100 Mio. ha im Jahr 2030 und ca. 1.650 Mio. ha im Jahr 2050 niedriger als im Szenario KS-BAU (Abb. 5-35). Durch den strikten Ausschluss von sensiblen Flächen ab dem Jahr 2025 wird als neue Anbaufläche vor allem Grünland erschlossen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass ab dem Jahr 2025 je Land 17 % der Landesfläche unter Schutz gestellt wird – und damit auch ein entsprechender Anteil an Grünland, so dass zumindest ein gewisser Anteil an Grünland mit großer biologischer Vielfalt nicht umgebrochen wird (Abbildung 5-35).

Die geringere Flächenbelegung im Szenario KS-N im Vergleich zum Szenario KS-BAU geht einher mit einer Erhöhung der Flächenerträge. Dies bedeutet eine stärkere Erhöhung der Nutzungsintensität von Flächen im Szenario KS-N als im Szenario KS-BAU. Aus Sicht des

Schutzes der Biologischen Vielfalt birgt diese stärkere Intensivierung zwar Risiken für die Biologische Vielfalt (z. B. Eutrophierung), aber im Vergleich zu den Risiken aus der höheren Inanspruchnahme von neuen, bisher nicht genutzten Anbauflächen im Szenario KS-BAU sind die Risiken aus der höheren Intensivierung im Szenario KS-N als geringer einzuschätzen (vgl. z. B. GROOM et al., 2006).

### 5.5.2.2 Risiken durch die Nutzung in Deutschland (Kraftstoff-Szenarien)

Für eine Bewertung der Risiken für die Biologische Vielfalt, die durch die Nutzung von Biomasse als Kraftstoff in Deutschland auftreten, ist es notwendig, zwischen Anbauflächen in Deutschland und außerhalb von Deutschland (Importe) zu unterscheiden. Bei der Bewertung wurde in einem ersten Schritt angenommen, dass Biokraftstoffe auch dann nach Deutschland gelangen, wenn sie gegen die geltenden Kriterien der RED verstoßen und von einem Import ausgeschlossen wären (Annahme OHNE-RED). In einem zweiten Schritt wird die Bewertung mit der Annahme dargestellt, dass ausschließlich RED-konforme Biokraftstoffe nach Deutschland importiert werden (Annahme MIT-RED). An dem Unterschied der beiden Darstellungen wird deutlich, wie stark der Effekt der RED ist. Zudem lassen sich mögliche Verdrängungseffekte im internationalen Handel einschätzen.

Um im Szenario KS-BAU (OHNE-RED) im Jahr 2030 den Biomassebedarf für Biokraftstoffe zu decken, ist eine gesamte Fläche von gut 12 Mio. ha notwendig, wovon knapp zwei Mio. ha in Deutschland liegen und sich über 10 Mio. ha im Ausland befinden (Abb. 5-36).<sup>12</sup> Der Großteil der Flächennutzung entfällt auf Biomasse zur Produktion von Biodiesel. Ähnlich wie im globalen Maßstab wird vor allem Grünland im Ausland und dabei zu einem größeren Anteil zuvor ungenutztes Grünland als neue Anbaufläche erschlossen (mittleres Risiko für die Biologische Vielfalt). Aber auch in Deutschland werden auf einem deutlichen Anteil zuvor genutztem Grünland Bioenergie-Rohstoffe angebaut (ca. 390.000 ha). Die Anbaufläche für Biogassubstrate in Deutschland könnte für die Szenarien nicht bewertet werden. Im

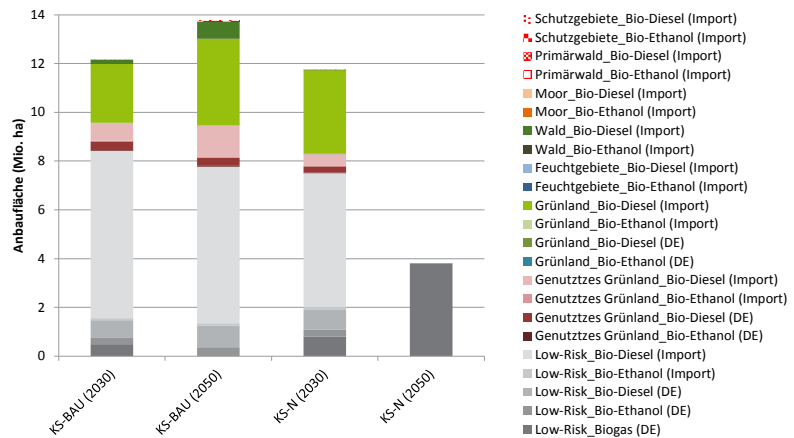


Abbildung 5-36: Annahme OHNE-RED – Nutzung von Flächen mit niedrigem, mittlerem und hohem Risiko für die Biologische Vielfalt (global und Deutschland) für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N).

12 Zum Vergleich ist herauszustellen, dass die aktuelle Ackerfläche in Deutschland ca. 14 Mio. ha beträgt.

Hinblick auf die Modellierung des Grünlandumbruchs innerhalb der EU und in Deutschland konnten die neuen Regelungen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP 2014-2020; Direkt-ZahlDurchfG<sup>13</sup>) im Rahmen des Projektes nicht mehr berücksichtigt werden, die bereits ab dem Jahr 2015 in Kraft treten. Im Falle einer strikten Umsetzung der neuen Regelungen mit einer niedrigen Genehmigungsrate für den Umbruch von Dauergrünland ohne Wiederanlegen von neuem Dauergrünland kann ein Grünlandumbruch bereits im Szenario KS-BAU niedriger ausfallen als in Abbildung 5-36 dargestellt. Im Szenario KS-N wird bis 2020 ein Grünlandumbruch zugelassen und nach 2020 vollständig ausgeschlossen, so dass bis zum Jahr 2030 im Szenario KS-N weniger umgebrochenes Grünland für Biokraftstoffe genutzt wird als im Szenario KS-BAU Abbildung 5-36).

Im Jahr 2050 im Szenario KS-BAU (OHNE-RED) nimmt die Anbaufläche in Deutschland für Biomasse zur Kraftstoffproduktion leicht ab. Gleichzeitig reduziert sich im Ausland die Anbaufläche auf Flächen mit geringem Risiko. Es steigt aber im Ausland die Nutzung von ehemaligen Grünlandflächen deutlich und von ehemaligen Waldflächen in einem kleineren Umfang an (beide Flächen mit einem mittleren Risiko für die Biologische Vielfalt, Abbildung 5-36).

Die Darstellung in Abbildung 5-36 (OHNE-RED) berücksichtigt nicht die Importrestriktionen durch die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED), die z. B. Waldflächen für den Anbau ausschließt. Bei Berücksichtigung der RED-Restriktionen (MIT-RED) werden Anstelle von Wald (und ebenso von Primärwald, Schutzgebiet und Torfmoor) entsprechend mehr Grünland und Flächen ohne Risiko, vor allem im Ausland genutzt (siehe Abb. 5-38). Im Szenario KS-BAU (MIT-RED) im Jahr 2050 steigt zudem die insgesamt genutzte Anbaufläche gegenüber dem Szenario KS-BAU (OHNE-RED) leicht an, was auf Unterschiede in den Erträgen der genutzten Flächen beruht.

Im Szenario KS-N (MIT-RED und OHNE-RED) liegt im Jahr 2030 die gesamte Anbaufläche (Deutschland und Ausland) zur Produktion von Biokraftstoffen für eine Nutzung in Deutschland niedriger als im Szenario KS-BAU. Dies geht einher mit einem leichten Anstieg von Anbauflächen von Biogassubstraten für Biomethankraftstoff. Auch wenn die gesamte Anbaufläche zurückgeht, steigt im Szenario KS-N im Jahr 2030 der Anteil an neuer Grünlandfläche, auf der jetzt Rohstoffe für Biokraftstoffe angebaut werden, im Vergleich zum

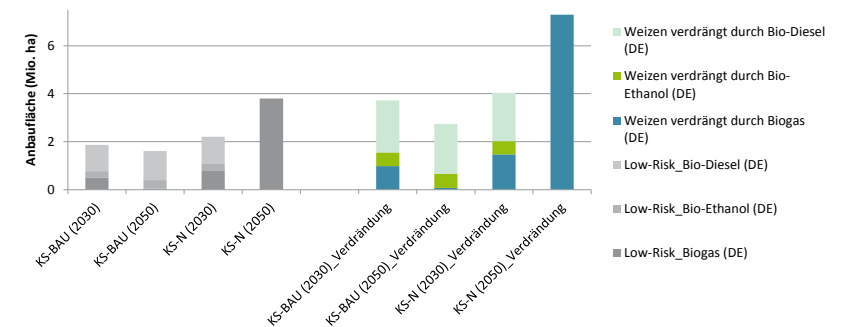


Abbildung 5-37: Analyse möglicher Verdrängungseffekte ins Ausland durch die Flächenbelegung für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N).

13 Direktzahlungen-Durchführungsgesetz: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/direktzahldurchfg/gesamt.pdf>

Szenario KS-BAU an. Die Nutzung andere sensibler Flächen treten kaum (OHNE-RED) bzw. nicht auf (MIT-RED), da sie in diesem Szenario weitestgehend (OHNE-RED nach dem Jahr 2025) bzw. vollständig (MIT-RED) ausgeschlossen sind.

Im Jahr 2050 im Szenario KS-N wird ausschließlich Anbaubiomasse aus Deutschland in Form von Biomethan als Kraftstoff eingesetzt. Hierzu werden knapp vier Mio. ha belegt (Abb. 5-36). Wie bereits oben erläutert wird, kann für diese Flächen das Risiko für die Biologische Vielfalt nicht eingeschätzt werden. Ein deutlicher Anteil der Fläche wird auf Flächen mit geringem Risiko liegen, es ist aber auch ein Anteil an Grünlandumbruch zu erwarten.

Außerdem ist festzuhalten, dass die hohe Flächenbelegung mit Biogassubstraten im Szenario KS-N im Jahr 2050 dazu führt, dass andere Agrarprodukte in geringerem Umfang angebaut werden und importiert werden müssen bzw. nicht mehr exportiert werden können. Diese indirekten Effekte werden in Abbildung 5-37 für alle Kraftstoffszenarien abgeschätzt. Dabei wird vereinfacht angenommen, dass auf der Bioenergie-Anbaufläche zuvor Weizen angebaut wurde, der nun im Ausland angebaut werden muss. Es zeigt sich, dass der Flächenbedarf im Ausland zur Weizenproduktion etwa doppelt so hoch ist wie in Deutschland. In der Summe liegt damit der direkte und indirekte Flächenbedarf im Szenario KS-N im Jahr 2050 bei ca. 12 Mio. ha. Im Gegensatz hierzu beträgt der Flächenbedarf (direkt und indirekt) im Szenario KS-N im Jahr 2030 – bei niedrigem Biogasanteil – knapp 16 Mio. ha. Auch in den Szenarien KS-BAU 2030 und 2050 ist mit einem hohen Flächenbedarf (direkt und indirekt) von knapp 16 bzw. etwa 16,5 Mio. ha zu rechnen (vgl. Abb. 5-36 und Abb. 5-37). Damit liegt selbst bei der Berücksichtigung von Verdrängungseffekten der Flächenbedarf im Szenario KS-N im Jahr 2050 niedriger als in den übrigen Fällen.

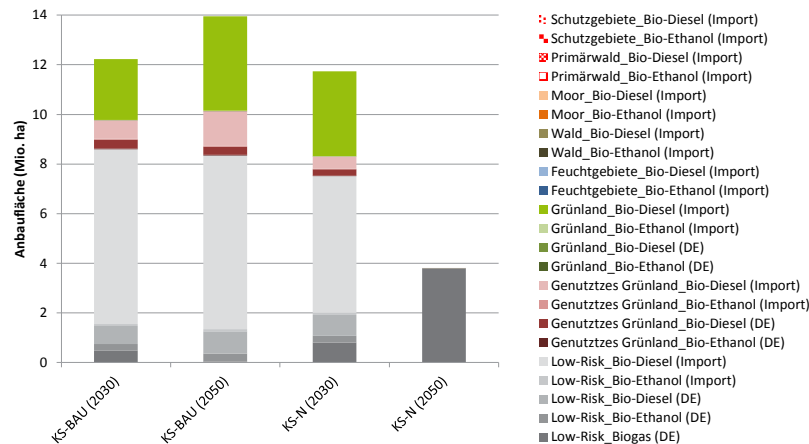


Abbildung 5-38 MIT-RED - Nutzung von Flächen mit niedrigem, mittlerem und hohem Risiko für die Biologische Vielfalt (global und Deutschland) für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N)

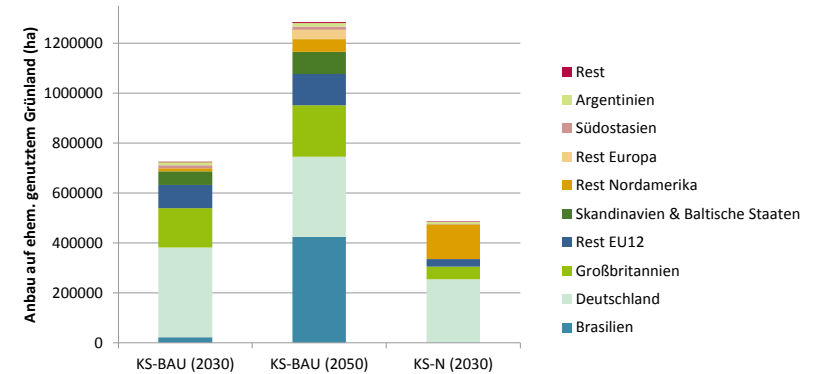


Abbildung 5-39: Annahme OHNE-RED - Verteilung der Länder, in denen ehemals genutztem Grünland für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland genutzt werden (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N). Da das Szenario KS-N nicht sinnvoll ausgewertet werden könnte, ist es nicht dargestellt.

Im Hinblick auf die räumliche Verteilung der neuen Flächeninanspruchnahme, die durch die Biokraftstoffnutzung in Deutschland bedingt ist, zeigt sich, dass der Umbruch von genutztem Grünland vor allem in den Ländern / Regionen Deutschland, Großbritannien, Brasilien und in anderen Europäischen Ländern stattfindet (Abb. 5-39). Im Hinblick auf den Umbruch von zuvor ungenutztem Grünland sind der Mittlere Osten, Brasilien, USA, Spanien und Portugal, Rest Nordamerika, Rest Südamerika und Frankreich relevant (Abb. 5-40 a). Die dargestellte Verteilung bezieht sich auf den Fall OHNE-RED. Im Fall MIT-RED ist das Muster identisch bei leicht höheren Flächenanteilen.

Ohne Einhalten der RED-Anforderungen tritt im Szenario KS-BAU (OHNE-RED) eine aus Deutschland induzierte Nutzung von ehemaligen Waldflächen vor allem in den Ländern / Regionen Brasilien, Rest Nordamerika, Russland, Rest EU12, Rest Europa und Südostasien auf (Abb. 5-40 b). Im Szenario KS-N (OHNE-RED) findet keine nennenswerte Nutzung ehemaliger Waldflächen statt. Im Hinblick auf Torfmoor spielen vor allem die Ländern /Regionen Russland, Rest Nordamerika, Skandinavien & Baltische Staaten, Südostasien und Rest Europa eine Rolle (Abb. 5-40 c). Im Szenario KS-N im Jahr 2030 (OHNE-RED) stammt nur eine kleine Menge an Biomasse von ehemaligen Moorflächen in Skandinavien & Baltische Staaten. Eine Nutzung von Primärwaldflächen tritt Szenario KS-BAU in Südostasien und Russland auf (Abb. 5-40 d, OHNE-RED). Biomasseanbau in Schutzgebieten liegt insbesondere im Szenario KS-BAU im Mittleren Osten (Abb. 5 40-e, OHNE-RED).

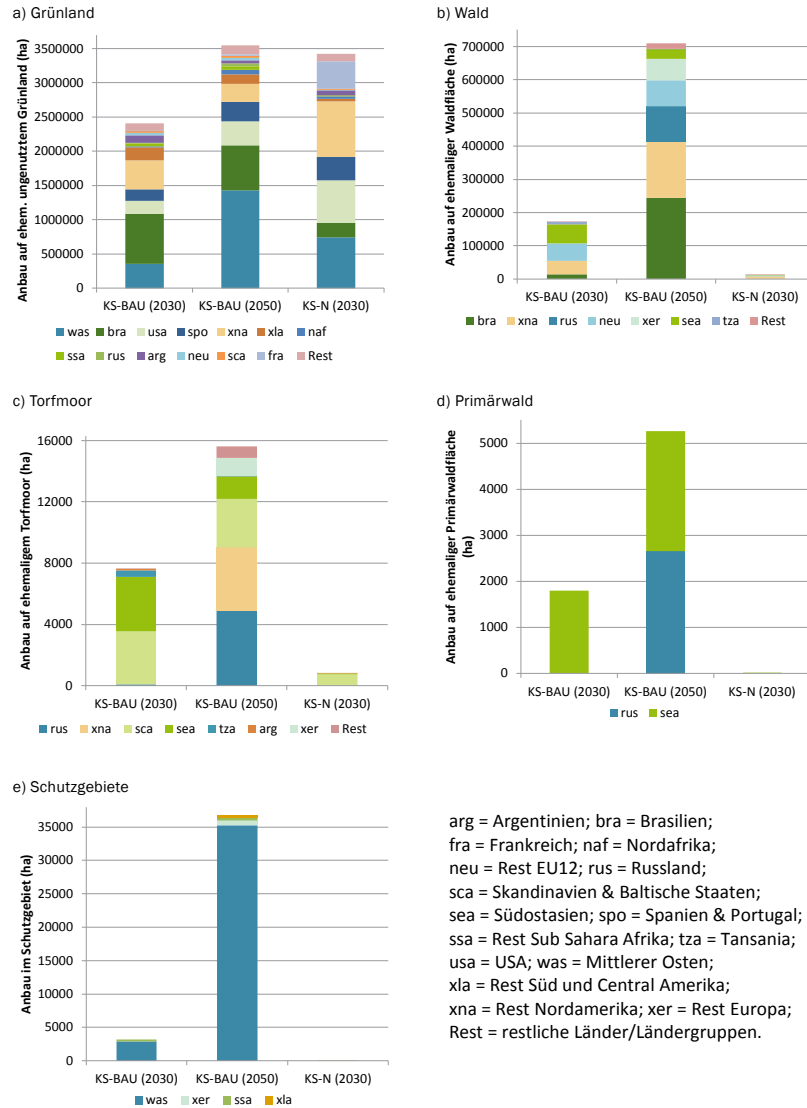
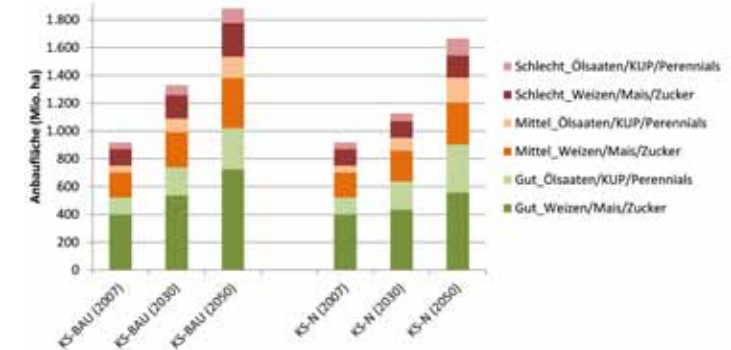


Abbildung 5-40: Annahme OHNE-RED - Verteilung der Länder, in denen in sensiblen Gebieten (ungenutztes Grünland, Wald, Torfmoor, Primärwald, Schutzgebiete) für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland genutzt werden (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N). Da das Szenario KS-N nicht sinnvoll ausgewertet werden könnte, ist es nicht dargestellt.

### 5.5.3 Risiken für Böden

Auf globaler Ebene steigt – wie bereits oben gezeigt – die landwirtschaftlich genutzte Fläche für Weizen / Mais / Zucker (potenziell geeignet für Bio-Ethanol) und für Ölsaaten / KUP / Perennials (potenziell geeignet für Biodiesel) im Szenario KS-BAU stärker an als im Szenario KS-N (Abb. 5-41). Dieser Anstieg findet aber weitestgehend in gleicher Art für die Nutzung von gut, mittel oder schlecht geeigneten Böden statt. So befinden sich über alle Szenarien und Zeitscheiben hinweg etwa 56 % der Anbauflächen auf Böden mit einer guten landwirtschaftlichen Eignung. Etwa 27 % der Anbau findet auf Böden mit einer mittleren und ca. 17 % auf Böden mit einer schlechten landwirtschaftlichen Eignung. Dies bedeutet dass mit einem generellen Anstieg der Risiken für Böden durch den generellen Anstieg der Flächennutzung zu rechnen ist.

Im Hinblick auf die Flächen, die für eine Rohstoffproduktion für den deutschen Biokraftstoffmarkt genutzt werden, zeigt sich ein ähnliches Verhältnis für die Nutzung von Flächen mit einer guten, mittleren und schlechten Eignung für die landwirtschaftliche Nutzung wie bei der globalen Betrachtung. Allerdings nimmt im Szenario KS-BAU von 2007 bis 2050 der Anteil an Flächen mit einer guten Eignung leicht von 57 % auf 51 % ab (Abb. 5-42). Gleichzeitig nimmt der Anteil der Flächen mit einer mittleren Eignung von 24 % auf 32 % zu und der Anteil der Flächen mit einer schlechten Eignung bleibt etwa konstant (19 % in 2007, 18 % in 2030 und 2050). Für das Szenario KS-N bleibt von 2007 bis 2030 der Anteil an gut geeigneten Flächen mit 57 % konstant. Der Anteil an Flächen mit mittlerer Eignung nimmt aber von 24 % auf 30 % zu, wohingegen der Anteil an schlecht geeigneten Flächen von 19 % auf 13 % abnimmt. Für Biogas-Flächen in Deutschland ist keine Einstufung möglich.



Weizen / Mais / Zucker = potenziell geeignet für Bio-Ethanol; Ölsaaten, KUP, Perennials = potenziell geeignet für Biodiesel

Abbildung 5-41: Globale Flächennutzung von Flächen mit guter, mittlerer und schlechter Eignung für eine landwirtschaftliche Nutzung durch Feldfrüchte, die für Biokraftstoffe genutzt werden können (nur Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N).



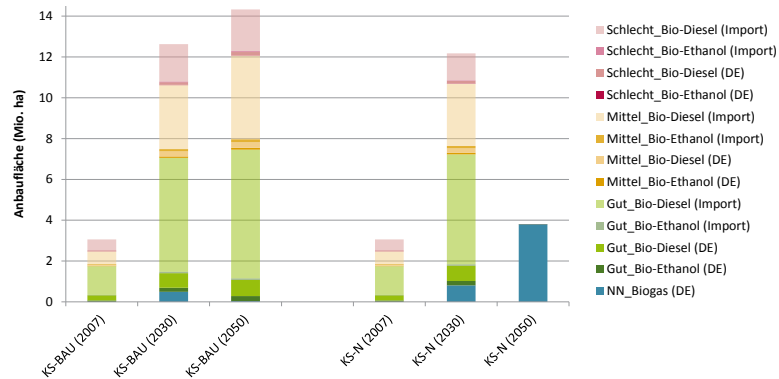


Abbildung 5-42: Nutzung von Flächen mit guter, mittlerer und schlechter Eignung für eine landwirtschaftliche Nutzung (global und Deutschland) für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N).

## 5.5.4 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

### 5.5.4.1 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Bewertung der Biologischen Vielfalt lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

1. Es ist generell mit einem Anstieg der landwirtschaftlichen Nutzfläche bis 2050 zu rechnen, auch wenn dieser im Nachhaltig-Szenario geringer ausfällt als im BAU-Szenario. Dies bedeutet per se einen Anstieg von Risiken für die Biologische Vielfalt. Dieser Anstieg wird durch die Nutzung von Bioenergie in Deutschland und ebenso durch die Nutzung anderer Biomasseströme (z. B. Futtermittel, Nahrungsmittel) beeinflusst.
2. Unter den Annahmen des Business As Usual (BAU) wird eine neue landwirtschaftliche Erschließung von Flächen bis 2030 vor allem auf Grünlandflächen im Ausland stattfinden. Bis 2050 ist damit zu rechnen, dass ein deutlicher Anteil an Waldflächen hinzukommt. Dies stellt ein mittleres Risiko für die Gefährdung der Biologischen Vielfalt dar.
3. Die neue Erschließung von weiteren sensiblen Flächen (Feuchtgebiete, Torfmoor, Primärwald, Schutzgebiete) findet bereits im BAU-Szenario nur in untergeordnetem Umfang statt.
4. Deutliche Restriktionen für die globale Flächennutzung im Nachhaltig-Szenario führen zu einer Abnahme des globalen Flächenbedarfs. Zudem befinden sich unter den ausgeschlossenen Flächen zu einem großen Anteil sensible Flächen zum Erhalt der Biologischen Vielfalt. Es ist daher mit einer generellen Reduktion von Risiken für die Biologische Vielfalt in diesem Szenario zu rechnen.

5. Im Nachhaltig-Szenario findet eine Intensivierung der Landnutzung statt, die zu einer Beeinträchtigung der Biologischen Vielfalt führen kann. Diese Risiken werden aber als geringer eingeschätzt als Risiken, die mit einer ansonsten benötigten neuen Landnutzung, die anteilig auch in sensiblen Flächen (Primärwald, Wälder, Feuchtgebiete, neue Schutzgebiete) stattfinden würde, verbunden sind.

6. Im Nachhaltig-Szenario werden als neue Flächen ausschließlich Grünland in Nutzung genommen. Da aber 17 % der Fläche eines jedes Landes und damit auch ein entsprechender Anteil des Grünlands in diesem Szenario unter Schutz gestellt wurde, ist damit zu rechnen, dass ein entsprechender Anteil an Grünland mit großer Biologischer Vielfalt nicht umgebrochen wird.

7. In Deutschland ist ein signifikanter Grünlandumbruch zu erwarten, der vor allem vor dem Jahr 2025 auftritt.

8. Die steigende Nutzung von Biogas in Deutschland im Nachhaltig-Szenario zeigt, dass es auch bei der Berücksichtigung von Verdrängungseffekten global zu einer reduzierten Flächenbelegung kommt. Eine Biogasstrategie im Kraftstoffsektor mit einem hohen Anteil an inländischer Rohstoffproduktion ist also aus Sicht der Flächenbelegung für den Schutz der Biologischen Vielfalt vorteilhaft gegenüber einer Strategie mit einem hohen Anteil an Kraftstoffen erster Generation. Dies liegt vor allem an der hohen Flächeneffizienz in der Biogasproduktion (Maisanteil von 85 %). Ein weniger Mais-lastiger und extensiverer Anbau von Biogassubstraten in Deutschland würde aus Sicht der Biologischen Vielfalt eine Verbesserung darstellen, kann aber die genannten Vorteile hinsichtlich der Flächenbelegung wieder aufheben.

9. Einschätzungen zu Risiken für Böden unterscheiden sich zwischen den Szenarien kaum. Mit der generellen Erhöhung der landwirtschaftlichen Nutzfläche steigen aber die Flächen mit möglichen Risiken für Böden.

### 5.5.4.2 Handlungsempfehlungen

Als Handlungsempfehlungen sind folgende Punkte zu betonen:

- Deutschland sollte nach Möglichkeiten suchen, den Biomassebedarf (insbesondere für Bioenergie und Futtermittel durch eine Reduktion der Tierproduktion) im Land zu senken, da dies dem weltweit steigenden Biomassebedarf entgegenwirkt und zu einer Reduktion von Risiken für die Biologische Vielfalt führt.
- Deutschland sollte auf globaler Ebene aktiver ambitionierte, internationale Ziele für den Schutz von sensiblen Flächen wie Primärwälder, Torfmoor, Feuchtgebiete, Wälder und Grünland mit großer Biologischer Vielfalt, am besten in einer globalen Schutzgebietskulisse in Anlehnung an die Beschlüsse der Convention on Biological Diversity (CBD), vorantreiben. Dieser Schutz steht nicht im Zwiespalt mit der Produktion ausreichender landwirtschaftlicher Produkte, geht aber mit einer Nutzungsintensivierung auf bereits genutzten Flächen einher.

- Deutschland sollte globale Initiativen ergreifen, dass eine zu erwartende Nutzungsintensivierung nachhaltig stattfinden kann.
- Deutschland sollte eine globale Initiative zur Identifizierung von Grünland mit großer Biologischer Vielfalt sowie zur Unterschutzstellung der wertvollen Flächen bzw. bestehende Initiativen aktiver unterstützen (z. B. Erfassung von Key Biodiversity Areas) ergreifen, da der größte Anteil der neuen Flächennutzung auf Grünlandflächen zu erwarten ist. Hier ist der aktuelle Entwurf zum Schutz von Grünland mit großer Biologischer Vielfalt unter der RED zielführend, sollte aber für alle Anbauflächen gelten.
- Zum Schutz der Biologischen Vielfalt im Grünland sollte Deutschland ein nationales Umbruchverbot von Dauergrünland oder zumindest ein Umbruchverbot von Grünland mit großer Biologischer Vielfalt erlassen. Letzteres setzt aber eine flächendeckende Kartierung des Grünlands in Deutschland voraus. In diesem Zusammenhang ist die Wirkung der neuen Regelungen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP 2014-2020) im Hinblick auf den Erhalt von Grünland zu prüfen.
- Deutschland sollte eine effiziente inländische Bioenergieproduktion – ob im Kraftstoffsektor mit Biomethan oder im Strom- und Wärmebereich mit Biogas oder anderen flächeneffizienten Bioenergieträgern – einer Importstrategie von weniger effizienten Biokraftstoffen vorziehen, da hierdurch weltweit mit geringeren Risiken für die Biologische Vielfalt zu rechnen ist. Die indirekten Effekte, die aus der Verdrängung anderer Ackerkulturen durch z. B. Biogassubstrate resultieren, konnten jedoch nur grob abgeschätzt werden (z. B. unter der Annahme, dass nur Weizen verdrängt wird) und könnten in der Realität evtl. deutlich höher ausfallen.

## 5.6 Bewertung von Ernährungsrisiken

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellierung von Ernährungssicherheit diskutiert. Dazu wird zunächst der Hintergrund, die Vorgehensweise und das Ziel der Berechnungen vorgestellt. Danach erfolgt die Analyse der Ergebnisse sowie Schlussfolgerungen aus den Berechnungen.

### 5.6.1 Hintergrund

Eine nachhaltige globale Gewährleistung von Nahrungsmittelsicherheit ist eine der wesentlichen Herausforderungen dieser Zeit. Im Kontext der Bioenergienutzung sind Debatten um Tank oder Teller in Bezug auf die Verfügbarkeit von Flächen daher besonders relevant. Auf der einen Seite steht die Einhaltung der Klimaschutzziele u. a. durch den Einsatz von Anbaubiomasse, auf der anderen Seite steht ein wachsender Bedarf an Nahrungsmitteln und dem damit verbundenen Ungleichgewicht in der globalen Verteilung. Die politische Diskussion zum Umgang mit Nahrungsmittelsicherheit wurde durch die Nahrungsmittelkrisen im Zeitraum 2006-2008 verstärkt. Hier wurde konstatiert, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen steigenden Lebensmittelpreisen und der Nutzung von Biokraftstoffen gibt. Uneins ist man sich in der wissenschaftlichen Literatur, wie groß dieser Zusammenhang

ist und ob der Einsatz von Biokraftstoffen, der einzige Preistreiber ist (HAMELINCK, 2013). (HLPE, 2013) stellen fest, dass es einen deutlichen Zusammenhang seit 2004 gibt. Dies hat zwei Gründe:

1. Ein Anstieg der Ölpreise ermöglichte Produzenten von Mais (und damit auch anderen landwirtschaftlichen Produkten) die Preise zu erhöhen.
2. Die Nachfrage nach Getreide, pflanzlichen Ölen und Zucker ist seit 2004 stärker gestiegen als das Angebot. Dies ist zum größten Teil auf die gestiegene Nachfrage nach Biokraftstoffen zurückzuführen.

Es sind jedoch nicht die einzigen Faktoren, die Einfluss nehmen: Förderung und Subvention von Biokraftstoffen, Bevölkerungswachstum und Änderung der Ernährungsgewohnheiten z. B. bzgl. verstärktem Fleischverzehr in bevölkerungsstarken Ländern wie China und Indien, fehlende Investitionen in die ländliche Entwicklung, Ernteauffälle und niedrige Lagerbestände haben Einfluss auf die Preise (GRUBER & HAUSER, 2011). Weltweit hungern heute ca. 805 Millionen Menschen (VON GREBNER et al., 2014). Dies ist und bleibt eine Frage der Verfügbarkeit von global begrenzten Flächen und der Verteilung von vorhandenen Nahrungsmitteln. Unter der Annahme eines kleinen Zusammenhangs von z. B. einem Prozent zwischen Hunger und der weltweiten Nutzung von Bioenergie würden hierdurch ca. 8 Millionen Menschen hungern. Der Zusammenhang zwischen der Nutzung von Anbaubiomasse für energetische Zwecke oder als Nahrungsmittel ist ein Aspekt, der im Sinne der Nachhaltigkeit daher zwingend beachtet werden muss, auch unabhängig davon, wie groß oder klein der Zusammenhang auch sein mag.

### 5.6.2 Ziel und Vorgehensweise

Ziel der Arbeiten war es, ein Mengenmodell zu erstellen, mit dessen Hilfe die Frage der Ernährungssicherheit abgebildet werden kann. Im Zentrum steht die Abschätzung der Menge an Biomasse, die zur ausreichenden Ernährung hungernder Menschen fehlt. Als Indikator wird diese fehlende Biomasse mit der energetisch genutzten Biomasse in reichen Ländern verglichen (fehlende Nahrung in Hungerländern / Bioenergie-Nachfrage in reichen Ländern).

Die Überlegungen gehen von der Definition für Ernährungssicherheit der Weltgesundheitsorganisation aus, welche besagt, dass Ernährungssicherheit dann besteht "when all people at all times have access to sufficient, safe, nutritious food to maintain a healthy and active life" (WORLD FOOD SUMMIT, 1996). Darauf aufbauend hat (FAO, 2008) vier Dimensionen der Ernährungssicherheit definiert:

1. ausreichende Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln
2. sicherer Zugang zu Nahrungsmitteln
3. bedarfsgerechte Verwendung und Verwertung der Nahrung sowie
4. zeitliche Beständigkeit (Stabilität) der Ernährungssicherung.

Der oben genannte Indikator zur Bewertung der Ernährungsrisiken durch die Bioenergienutzung bezieht nur die erste Dimension der Ernährungssicherheit (Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln) ein. Die übrigen Dimensionen können mit diesem Ansatz nicht bewertet werden und stehen auch nicht in einem direkten Zusammenhang mit der Nutzung von Bioenergie sondern mit politischen Fehlentwicklungen (Kriege und Krisen, Benachteiligung

von Bevölkerungsgruppen, unzureichende Unterstützung von Lagerhaltung, etc.). Geringe Werte des entwickelten Indikators bedeuten somit nicht gleichzeitig, dass der Hunger in der Welt zurückgeht. Vielmehr zeigt er auf, in welchem Verhältnis Bioenergienutzung zur unzureichenden Ernährung steht.

Für die Berechnung des Indikators zu Ernährungsrisiken wurde ein Modell entwickelt, welches die vom MAGNET-Gleichgewichtsmodell berechnete Bioenergienachfrage für Länder mit hohem Bruttoinlandsprodukt<sup>14</sup> so stark reduziert, dass mit der frei gewordenen Biomasse der bestehende Mangel an Nahrungsmitteln in Ländern mit einem erhöhten Anteil an hungernden Menschen gestillt werden könnte (1. Dimension), wobei die 2. bis 4. Dimension der Ernährungssicherheit nicht berücksichtigt sind (s. o.). Als Hunger wird in Anlehnung an die Definition der FAO die Aufnahme von weniger als 1.800 kcal pro Tag bezeichnet. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass eine Aufnahme von 2.300 kcal einem ausreichenden Tagesbedarf entspricht (HANSON 2013). Auf Basis dieser Angaben zu einer gesunden Ernährung (FAO 2008) wird für Hungerländer angenommen, dass durchschnittlich 500 kcal pro Tag und hungernder Person fehlen.

Das Modell betrachtet als Vergleichsmaß den Energiegehalt der Biomasse. Es wird jedoch nicht die konkrete Verteilung von Nahrungsmitteln zwischen den Geber- und Empfängerstaaten berechnet.

Grundlage der Bewertung waren die gegenwärtigen und zukünftigen Ernährungsgewohnheiten sowie die entsprechende Bevölkerungsentwicklung in den Ländern. Dabei wurden anhand von länderspezifischen Warenkörben (unter Einbezug der zehn quantitativ relevantesten Nahrungsmittel je Land) und der regionalen Verfügbarkeit von Nahrung, Länder mit prekärer Ernährungssituation identifiziert.

Dies war notwendig, um die entsprechenden Informationen der Länder / Länderaggregate auf den Output von MAGNET abzustimmen.<sup>15</sup> Änderungen der Kostenstruktur und Nachfrage sind durch MAGNET abgedeckt.

### 5.6.3 Ergebnisse

Anhand des KS-BAU-Szenarios wird zunächst die Methodik dargestellt. Da die Modellierung der Ernährungssicherheit auf der globalen Biomasseverteilung basiert, treten zwischen den beiden Kraftstoff-Szenarien und den Strom- / Wärme-Szenarien kaum sichtbare Unterschiede bei den Ergebnissen zur Ernährungssicherheit auf.

#### 5.6.3.1 Methodische Erläuterungen anhand des Szenarios KS-BAU

Im ersten Schritt wurden die Länder ermittelt, in den eine ernste bis gravierende Hungersituation besteht. Dies basierte auf der Grundlage des Globalen Hungerindex (GHI) (siehe Kasten Seite 113).

In die Berechnung eingeflossen sind Länder, die einen GHI von mindestens 10 und damit eine ernste Hungersituation aufweisen. Diese Länder werden entsprechend als „Hungerland“ eingestuft. Es wird für diese Länder im Grundzug unterstellt, dass eine Lösung des Hungerproblems nicht in dem Land selbst behoben werden kann, sondern dass Nahrungsimporte aus dem Ausland nötig sind. Um die Ergebnisse besser einordnen zu können, wird eine Sensitivität für den GHI 5, 15 und 20 durchgeführt und vergleichend dargestellt.

<sup>14</sup> Dabei handelt es sich um die 20 % der Länder mit dem höchsten BIP.

<sup>15</sup> Zur Beschreibung der Methodik siehe Anhang.

Im Szenario KS-BAU handelt es sich bei den GHI 10-Ländern im Zeitraum 2010 bis 2050 um die Länder bzw. Länderaggregate in Tabelle 5-15. Der Mangel an Nahrungsmitteln nimmt im Szenario KS-BAU im Zeitverlauf für die Hungerländer ab, von insgesamt 370 PJ in 2010 auf 163 PJ in 2050. Nach dem gewählten Modellansatz entsprechen diese Mengen der weltweit fehlenden Nahrung. Von 2010 bis 2030 halbiert sich der Bedarf annähernd. Dies liegt darin begründet, dass das BIP bzw. das BIP / Kopf kontinuierlich über den modellierten Zeitraum, auch in Ländern mit prekärer Ernährungssituation, steigt. Nichts desto trotz bleibt der fehlende Nahrungsmittelbedarf in Hungerländer ab 2030 annähernd auf gleichbleibendem Niveau.

Zum Vergleich wurden Sensitivitäten für drei weitere GHI-Werte berechnet. Hintergrund ist, dass schon ab einem GHI von 5 eine moderate Hungersituation besteht. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Menge an fehlender Nahrung sehr sensibel auf den angenommenen GHI-Grenzwert reagiert (Abb. 5-44). Dies ist damit begründet, dass bei einem niedrigen GHI entsprechend mehr hungernde Menschen in die Berechnung einbezogen werden als bei einem hohen GHI. Werden bei der Berechnung des Indikators lediglich die Länder mit einer besorgniserregenden Hungersituation (GHI > 20; Annahme: in den anderen Ländern kann das Hungerproblem inländisch gelöst werden) berücksichtigt, so ist die Menge der

#### Hungerindex

Der Globale Hungerindex adressiert die Hungersituation global, regional oder auf Länderebene. Er besteht aus drei Indikatoren (VON GREBMER et al., 2013):

1. Unterernährung
2. Untergewicht von Kindern bis 5 Jahre
3. Kindersterblichkeit bis 5 Jahre

Dieser Ansatz berücksichtigt nicht nur die Bevölkerung an sich, sondern insbesondere eine besonders anfällige Gruppe, die der unter 5-jährigen Kinder. Diese Gruppe ist besonders gefährdet durch Mangel an Nährstoffen zu erkranken oder gar zu sterben. Der GHI wird anhand einer Skala von 100 Punkten festgelegt, wobei 0 bedeutet, dass keinerlei Hunger besteht, 100 Punkte zeigen entsprechend das Gegenteil. Die Wahrscheinlichkeit den Wert 100 zu erreichen ist jedoch gering, da dies bedeuten würde, dass alle Kinder unter bis fünf Jahren sterben, untergewichtig sind und die gesamte Bevölkerung unterernährt ist. Die Bewertungsskala gestaltet sich wie folgt:

Tabelle 5-14: Bewertungsskala GHI (nach VON GREBMER et al., 2013)

GHI-Score	Bewertung
0 bis 4,9 Punkte	gering
5 bis 9,9 Punkte	moderat
10 bis 19,9 Punkte	ernst
20 bis 29,9 Punkte	besorgniserregend
> 30 Punkte	extrem besorgniserregend

fehlenden Nahrung mit 29 PJ sehr niedrig und nimmt bis 2025 auf null ab. Wird der Indikator mit kleineren GHI-Werten berechnet, entstehen deutlich höhere Mengen an fehlender Nahrung. Bei einem GHI von 10 liegt im Jahr 2050 die Menge an fehlender Nahrung noch bei 163 PJ. Bei einem GHI von 5 liegt der Wert im Jahr 2050 bei 252 PJ.

Für diese Länder wurde die fehlende Menge an Nahrungsmitteln ermittelt (siehe Anhang A 3.1.5), die durch die Reduktion der Bioenergienachfrage ausgeglichen wird (Abb. 5-43). Zur Berechnung der fehlenden Menge an Biomasse in PJ wurde unterstellt, dass es sich bei den fehlenden Kalorien zu 90 % um pflanzliche Nahrungsmittel und zu 10 % um tierische Nahrungsmittel handelt.

Tabelle 5-15: Länder / Länderaggregate mit GHI > 10 von 2010 bis 2050 (KS-BAU). Quelle: Eigene Berechnung.

Hungerland (GHI > 10)	Region
Kenia	Afrika
Mosambik & Äthiopien	Afrika
Pakistan	Afrika
Rest Subsahara-Afrika	Afrika
Tansania	Afrika
Bolivien	Amerika
Indien	Asien / Australien
Nordafrika	Afrika
Südostasien	Asien / Australien
Rest ehemalige Sowjetunion	Asien / Australien

Der Mangel an Nahrungsmitteln nimmt im Szenario KS-BAU im Zeitverlauf für die Hungerländer ab, von insgesamt 370 PJ in 2010 auf 163 PJ in 2050. Nach dem gewählten Modellansatz entsprechen diese Mengen der weltweit fehlenden Nahrung. Von 2010 bis 2030 halbiert sich der Bedarf annähernd. Dies liegt darin begründet, dass das BIP bzw. das BIP / Kopf kontinuierlich über den modellierten Zeitraum, auch in Ländern mit prekärer Ernährungssituation, steigt. Nichts desto trotz bleibt der fehlende Nahrungsmittelbedarf in Hungerländern ab 2030 annähernd auf gleichbleibendem Niveau.

Zum Vergleich wurden Sensitivitäten für drei weitere GHI-Werte berechnet. Hintergrund ist, dass schon ab einem GHI von 5 eine moderate Hungersituation besteht. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Menge an fehlender Nahrung sehr sensibel auf den angenommenen GHI-Grenzwert reagiert (siehe Abbildung 5-44). Dies ist damit begründet, dass bei einem niedrigen GHI entsprechend mehr hungernde Menschen in die Berechnung einbezogen werden als bei einem hohen GHI. Werden bei der Berechnung des Indikators lediglich die Länder mit einer besorgniserregenden Hungersituation (GHI > 20; Annahme: in den anderen Ländern kann das Hungerproblem inländisch gelöst werden) berücksichtigt, so ist die Menge der fehlenden Nahrung mit 29 PJ sehr niedrig und nimmt bis 2025 auf null ab. Wird der Indikator mit kleineren GHI-Werten berechnet, entstehen deutlich höhere Mengen an fehlender Nahrung. Bei einem GHI von 10 liegt im Jahr 2050 die Menge an fehlender Nahrung noch bei 163 PJ. Bei einem GHI von 5 liegt der Wert im Jahr 2050 bei 252 PJ.

Im Modell wird unterstellt, dass die berechnete fehlende Menge an Nahrung von „reichen“ Ländern ausgeglichen bzw. zur Verfügung gestellt werden sollte. Als „reiche“ Länder bzw. Länderaggregate wurden Länder identifiziert, die bei der Höhe des BIP pro Kopf zu den oberen 20 % gehören (Tabelle 5-16). Zum Vergleich ist im Anhang A 2.2 eine Sensitivität berechnet, wie sich die Auswirkung auf die Menge der „reichen“ Länder darstellt, wenn die Grenze zur Ermittlung der reichen Länder auf 10 % gesenkt bzw. auf 30 % angehoben wird. Bei einem Schwellenwert von 10 % sind nur noch vier Länder in der Rolle der „Geberländer“, bei 30 % sind es 13 Länder / Länderaggregate.

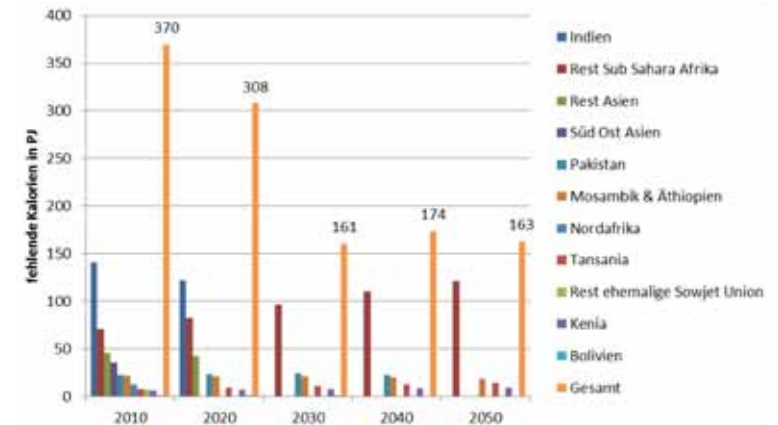


Abbildung 5-43: Entwicklung der „fehlenden Kalorien“ für Länder GHI 10 von 2010 bis 2050 (KS-BAU). Quelle: Eigene Berechnung.

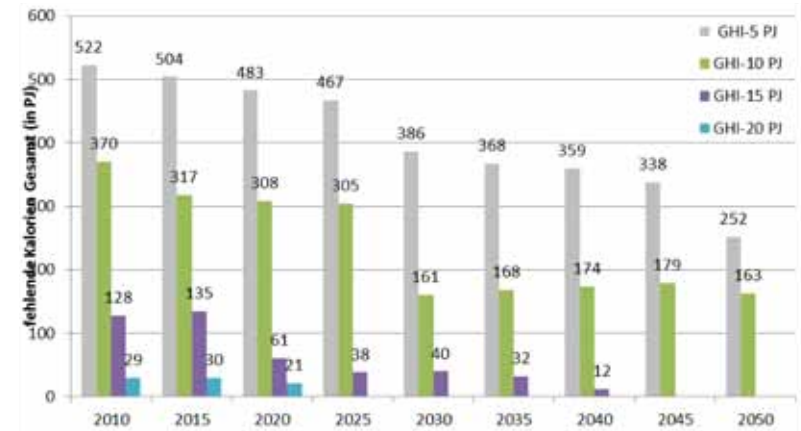


Abbildung 5-44: Fehlende Kalorien in Hungerländern (Gesamt) - Sensitivität mit GHI 5, 10, 15, 20 von 2010 bis 2050 (KS-BAU). Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 5-16 Länder mit hohem BIP / Kopf (obere 20 %; KS-BAU)

„Reiche“ Länder	Region
Benelux	Europa / EU
Deutschland	Europa
Frankreich	Europa / EU
Großbritannien	Europa / EU
Japan, Korea	Asien / Australien
Ozeanien	Asien / Australien
Skandinavien und Baltische Staaten	Europa / EU
USA	Amerika

### 5.6.3.2 Ergebnisse der Szenarien

Die Nachfrage nach Biokraftstoffen wurde aus MAGNET für die vier Szenarien KS-Bau, KS-N, SW-Bau und SW-N in den Ländern / Ländergruppen übernommen.

Die Menge an Nahrung, die in den Hungerländern zur Deckung des Bedarfs fehlt, entwickelt sich in allen Szenarien nach einem ähnlichen Muster. Relative hohe Werte in den Jahren 2010 und 2015 nehmen zu deutlich niedrigeren Werten in den folgenden Jahreszeiträumen ab und erreichen im Jahr 2050 den Wert von 163 PJ. Als einzelnes Land hat Indien den größten Bedarf, gefolgt vom Länderaggregat Rest Subsahara-Afrika. Der Bedarf Indiens hört allerdings nach 2025 auf, wohingegen Rest Subsahara-Afrika bis 2050 „fehlende Kalorien“ aufzuweisen hat. Dies gilt auch für Mosambik, Äthiopien, Tansania und Kenia (Abb. 5-45). In dem Szenario KS-N, SW-BAU und SW-N sieht die Entwicklung der fehlenden Mengen an Nahrung zur Bedarfsdeckung identisch zum Szenario KS-BAU aus.

Wie oben beschrieben werden die berechneten fehlenden Mengen an Nahrung respektive Kalorien zur Bedarfsdeckung je Szenario von der Bioenergienachfrage in den 20 Prozent reichsten Ländern ins Verhältnis gesetzt (siehe detaillierte Ergebnisse zu den Szenarien in Anhang A 2.2). Für das Szenario KS-BAU ist beispielhaft in Abbildung 5-46 für die vier GHI-Sensitivitäten die Entwicklung des Verhältnis der global fehlenden Nahrung in Hungerländern zur Bioenergienutzung in reichen Ländern dargestellt. Es wird deutlich, dass dieses Verhältnis stark zwischen den GHI-Sensitivitäten variiert. Bei einem GHI von 10 liegt das Verhältnis bei 27 % in 2010 und sinkt auf 6 % in 2030 und bleibt bis 2050 konstant. Obwohl das Verhältnis von global fehlender Nahrung in Hungerländern und Bioenergienutzung in reichen Ländern im Jahr 2010 zwischen 38 % bei GHI 5 und 2 % bei GHI 20 liegen, ist bei allen vier Betrachtungsaspekten ab 2030 eine Stagnation auf dem jeweiligen Niveau zu erkennen. Das Verhältnis liegt max. bei 15 % in 2030 und senkt sich auf max. 7 %.

Die im Szenario KS-BAU nachgefragte Menge an Biokraftstoff (ohne 2. Generation) beträgt global 2.387 PJ in 2010 (Die Detaildaten für alle Szenarien sind dem Anhang A 2.2 zu entnehmen). Davon entfallen auf 1.392 PJ auf die 20 Prozent der reichsten Länder. Die Mengen in 2010 sind für alle vier Szenarien gleich. Im Jahr 2010 betrug die global fehlende Nahrung in Hungerländern 370 PJ. Bei einer Verteilung dieser fehlenden Nahrung auf die 20 Prozent reichsten Ländern anteilig zu ihrer Bioenergienutzung entfällt ein Großteil auf die USA gefolgt von Deutschland (Abb. 5 47 a). In 2030 liegt die Gesamtmenge der nach-

gefragten Bioenergie bei 5.970 PJ im KS-BAU. Davon entfallen 2.861 PJ auf die „reichen“ Länder. Die global fehlende Nahrung in Hungerländern steigt auf 161 PJ, wobei das Muster bei einer Verteilung der fehlenden Nahrung auf die 20 % reichsten Länder nach ihrer Biokraftstoffnutzung gleich bleibt (überwiegend USA und Deutschland). In den Szenarien KS-N, SW-BAU und SW-N bleibt dieses Muster ähnlich mit der Ausnahme von Deutschland, wo die Biokraftstoffnutzung der ersten Generation stark abnimmt und z. B. durch inländisches Biogas ersetzt wird (Abb. 5-47 b-d). Die Nutzung von Biogas und Kraftstoffe der zweiten Generation werden von dem entwickelten Indikator nicht erfasst.

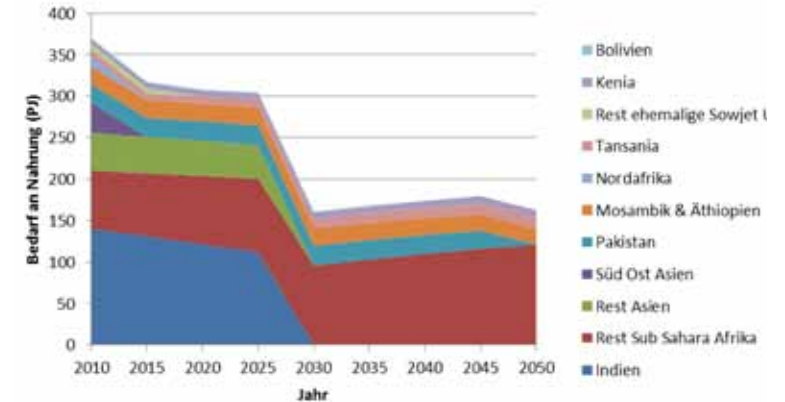


Abbildung 5-45: Entwicklung der fehlenden Menge an Nahrung zur Bedarfsdeckung in den Hungerländern (GHI 10) im Szenario KS-BAU (in PJ). Quelle: Eigene Berechnung.

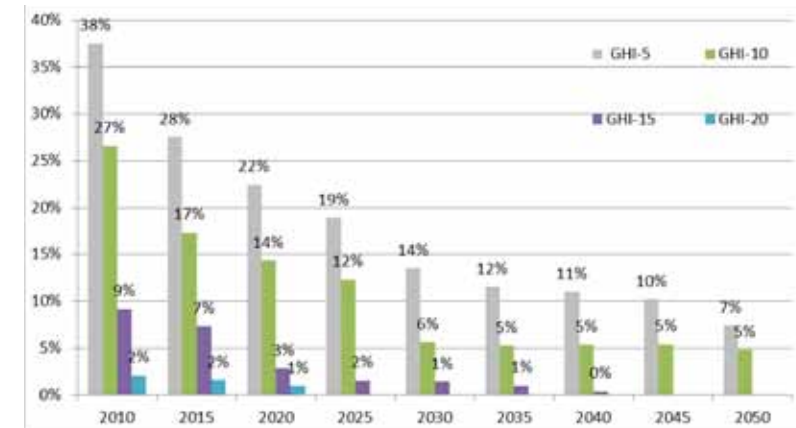


Abbildung 5-46: Anteil der global fehlenden Nahrung in Hungerländer an der Bioenergienmengen in „reichen“ Ländern im Szenario KS-BAU (in Prozent). Quelle: Eigene Berechnung.



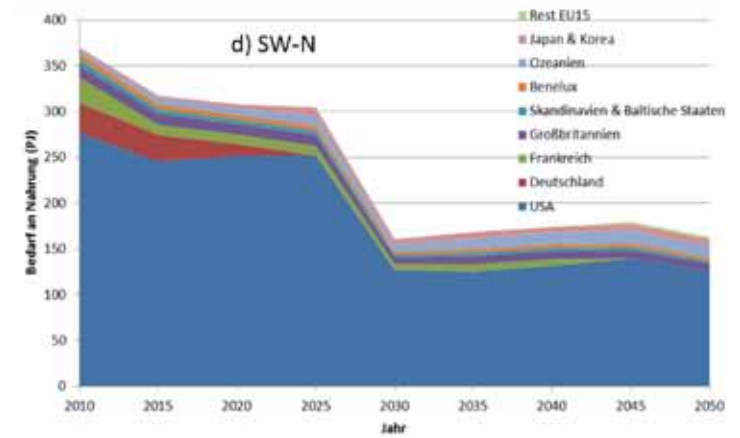
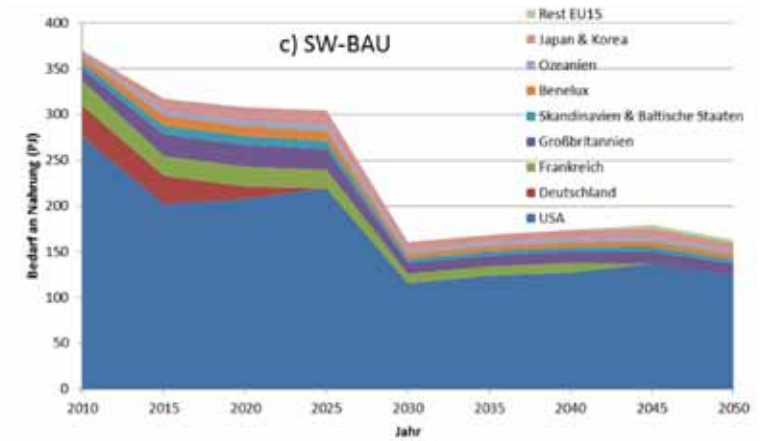
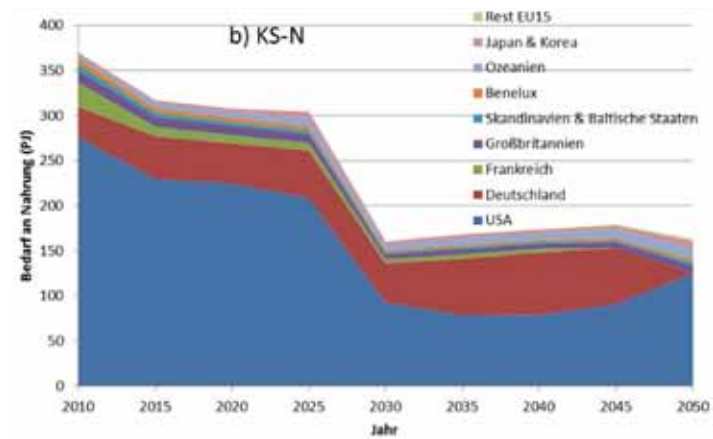
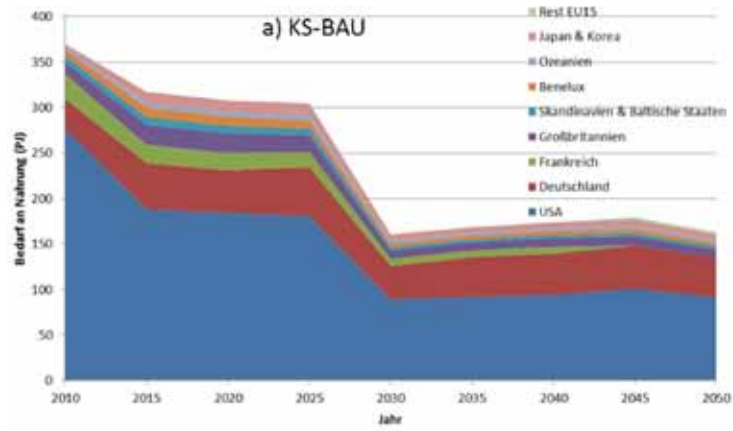


Abbildung 5-47: Verteilung der global fehlenden Nahrung in Hungerländern auf die 20 Prozent reichsten Ländern anteilig zu ihrem Bioenergieverbrauch im Szenario a) KS-BAU, b) KS-N, c) SW-BAU und d) SW-N (in PJ, GHI 10).  
Quelle: Eigene Berechnung.

Betrachtet man die Auswirkungen der Sensitivitätsrechnung für die Schwellenwerte der „reichen“ Länder zeigt sich folgendes Bild: Die Änderung der Schwellenwerte auf 10 % bzw. 30 % erhöht (bei 10 %) bzw. reduziert (bei 30 %) den Anteil, den das jeweilige Land zur Ernährungssicherheit beitragen muss. Die Änderungen sind dabei tendenziell geringer als erwartet. Sie zeigen im Gegensatz zum 20 %-Quantil einen abnehmenden Trend bis 2045 beim Schwellenwert 10 % und 30 %. Beim Schwellenwert 30 % reduziert sich die zu verteilende Menge für die Länder in 2050 stark. Das liegt daran, dass zu diesem Zeitpunkt China zu den 30 % der Länder mit dem höchsten BIP / Kopf zählt und sich zum Drittgrößten Nachfrager für Bioenergie entwickelt hat (siehe Abbildung 5-48).

Es kann festgestellt werden, dass die Auswahl der „reichen“ Länder mit dem 20 %-Quantil gut abgedeckt ist. Es kommen zwar Länder dazu (30 %) bzw. fallen weg (10 %), aber der eigene Beitrag verändert sich nicht substantiell (Daten siehe Anhang A 2.2).

#### 5.6.4 Schlussfolgerung

Mindestens 2.300 kcal pro Tag und Person sind notwendig, um eine gesunde Ernährung zu gewährleisten. Dabei wurde in dem Model zur Ernährungssicherheit ein Mindestanteil von 10 % tierischer Nahrung zu 90 % pflanzlicher Nahrung angesetzt. Unter der Maßgabe, dass Nahrungsmittelsicherheit stets Vorrang hat, ist die Inanspruchnahme von landwirtschaftlichen Flächen u. a. für energetische Zwecke davon abhängig, in welchem Umfang Biomasse bis zum Erreichen einer weltweiten sicheren und gesunden Ernährung benötigt wird.

Die Modellierung der Nahrungssicherheit hat gezeigt, dass die fehlenden Kalorienmengen zur Gewährleistung der Minimumanforderungen für eine gesunde Ernährung in Hungerländern deutlich niedriger liegen, als die Bioenergienachfrage in Ländern mit hohem BIP. Die Ergebnisse überraschen dahingehend, dass rein rechnerisch – ohne die Betrachtung von Zugang und Verteilung von Nahrung – langfristig gesehen reiche Länder ihre Nachfrage nach Bioenergie um nur ca. 7 % reduzieren müssten, um den Kalorienbedarf in Hungerländer theoretisch decken zu können. Dieser theoretische Ansatz zur Verfügbarkeit von Flächen kann jedoch auch von dieser Seite betrachtet werden: Die Reduzierung des Verbrauchs

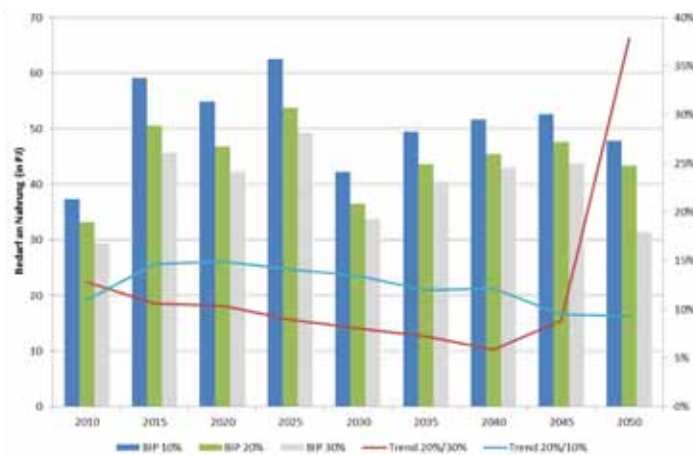


Abbildung 5-48: Sensitivität BIP-Schwellenwert für Deutschland und Entwicklung der Reduzierung bei der Bioenergienachfrage (in PJ). Quelle: Eigene Berechnung.

von Fleisch und anderen tierischen Produkten in Industriestaaten und ihre Begrenzung in den Schwellenländern ist ein weiterer Schritt zur Sicherung der Ernährung. Wenn alle Deutschen einmal pro Woche auf Fleisch und Milchprodukte verzichten, würden bereits 5 Prozent der deutschen Ackerfläche (595.000 ha) frei; die Einhaltung der Verzehrsempfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung brächte 15 Prozent an verfügbarer Fläche (knapp 1,8 Mio. ha; ZUKUNFTSSTIFTUNG LANDWIRTSCHAFT, 2013).

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass mit steigendem pro Kopfeinkommen das Hunger-Risiko in den armen Ländern deutlich zurückgeht. Dies liegt daran, dass durch eine stete wirtschaftliche Entwicklung in den armen Ländern die Kaufkraft stärker ansteigt als die Agrarpreise und sich so die Möglichkeit für eine eigenständige Beschaffung mit ausreichender Nahrung in den armen Ländern stabilisiert.

## 5.7 Regionale Effekte

Im Rahmen einer Bewertung der regionalen Effekte der vorliegenden Untersuchungsergebnisse werden die potenziellen Auswirkungen der in BENSIM modellierten Szenarien auf regional getriebene Bioenergieprojekte in einem qualitativen Sinne beurteilt. Dazu werden die Ergebnisse des Projektes KomInteg<sup>®</sup> mit den Ergebnissen der Szenarienberechnungen des Meilensteine-Vorhabens verglichen. In KomInteg wurden auf Basis der Daten von (PROGNOS/EWI/GWS, 2014) Kennwert-basiert für jede Kommune Deutschlands die Strom- und Wärmebedarfe berechnet und mit kommunalen Biomassepotenzialen für zehn verschiedene Bioenergiecluster verschnitten. Aus diesen Überlegungen heraus wurden in der Folge Technologieszenarien – im Sinne eines „Bottom-up-Ansatzes“ – entwickelt, die u.a. aus den Wärmenachfragen der Kommunen sowie der Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen resultieren. Diese Ansätze werden im Folgenden mit den „Top-down-Szenarien“ KS-BAU und SW-BAU des Meilensteine-Projektes verglichen. Der Vergleich bezieht sich dabei v. a. auf die Wärmebedarfe und die Stoffstromangebote in den einzelnen Kommunen. Ergänzend werden weitere potenzielle Infrastruktureffekte beschrieben. Im Rahmen des Projektes konnten keine quantitativen Auswertungen zu den Logistikaspekten, zu regionalen Aspekten der Flächenverschiebungen oder zur regionalspezifischen Beurteilung der vorhandenen Potenziale mit in die Bewertung aufgenommen werden.

Als im Hinblick auf die jeweiligen regionalen Infrastrukturen relevante Effekte können insbesondere folgende Punkte benannt werden:

- Stromsystem: Bedarf der Bioenergie als Systemdienstleister
- Wärmesystem: ökonomische Stabilität leitungsgebundener Wärmeversorgungssysteme (KWK); realisierbare Refinanzierungszeiträume
- Markt: Kompatibilität regionaler Vermarktungs- mit potenziell zentralen Abnehmerstrukturen von Biomasse
- Umgang mit integrierten industriellen Konzepten (z. B. integrierte Reststoffnutzung)
- Abfallsystem: Anforderungen bedingt durch Bioökonomie und Kaskadenprozesse

### 5.7.1 Kommunal adaptierte Technologien

Die in KomInteg eingesetzten Bioenergie-Technologien wurden auf der Basis einer Auswahl der im Förderprogramm ‚Energetische Biomassenutzung‘ betrachteten Technologien, der in der kommunalen Clusteranalyse herausgearbeiteten Cluster-spezifischen Biomasse-Angeboten sowie der Marktverfügbarkeit sonstiger Technologien pro kommunalem Cluster herausgearbeitet. Die Ergebnisse wurden anschließend in Szenarien mit den Prämissen ‚geringste Gesamtkosten‘, ‚höchster Stromertrag‘, ‚höchster Wärmeertrag‘ und ‚höchster THG-Vermeidungsfaktor‘ hinterlegt. Da aus kommunaler Sicht die Biotreibstoffe eine eher untergeordnete Rolle spielen, wurde angenommen, dass diese für Deutschland importiert werden.

Tabelle 5-17 zeigt die entsprechenden Eckdaten der definierten Bioenergiecluster. Der Anteil Kommune (Anteil Komm.) bezeichnet die relative Anzahl der gesamten deutschen Kommunen pro Cluster, die Kategorien Anteil Einwohner und Flächenanteil die relativen Anteile der Einwohner und der gesamten Fläche pro Kommune. Viele Kommunen sind in einem kommunalen Verbund (bspw. „Verbandsgemeinde“) zusammen geschlossen. Die Spalte „Gemeindeverbandanteil“ bezeichnet den Anteil an kommunalen Verbänden in einem Cluster. Die vier Spalten „Ant. E-pfl. Pot., Ant. E-Holzpot, Ant. Pot. landw. RS sowie Ant. sonst. Pot RS“ bezeichnen die Cluster-Anteile am gesamtdeutschen Potenzial für Energiepflanzen, Energieholz, landwirtschaftlichen Reststoffen und sonstigen Reststoffe.

Tabelle 5-17: Eckdaten zu den Clustern

Cluster	Anteil Komm.	Anteil Einwohner	Flächenanteil	Gemeindeverbandanteil	Ant. E-pfl.pot.	Ant. E-Holz-pot.	Ant. Pot. landw. RS	Ant. Pot. sonst. RS
1	17,6 %	6,2 %	14,7 %	76,9 %	15,9 %	10,4 %	17,6 %	6,2 %
2	13,5 %	13,5 %	14,0 %	67,4 %	20,3 %	8,2 %	9,6 %	13,5 %
3	13,2 %	8,5 %	4,3 %	80,3 %	3,0 %	4,1 %	5,7 %	8,5 %
4	21,5 %	2,5 %	4,2 %	96,6 %	4,9 %	3,1 %	4,4 %	2,5 %
5	12,5 %	3,1 %	6,4 %	88,0 %	3,8 %	11,1 %	4,9 %	3,1 %
6	6,8 %	8,2 %	12,8 %	41,0 %	7,1 %	22,5 %	5,9 %	8,2 %
7	10,0 %	19,9 %	30,6 %	21,3 %	36,7 %	27,7 %	36,0 %	19,9 %
8	3,4 %	4,2 %	4,0 %	56,5 %	2,6 %	3,5 %	7,8 %	4,2 %
9	0,7 %	29,5 %	3,7 %	2,6 %	1,8 %	2,3 %	2,7 %	29,5 %
10	1,7 %	4,4 %	5,4 %	30,9 %	3,8 %	7,2 %	5,5 %	4,4 %

Flächenmäßig das größte Cluster ist Cluster 7. Dieses ist charakterisiert durch größere Städte und Gemeinden mit besonders hohen Anteilen land- und forstwirtschaftlicher Flächen. Flächenmäßig das zweitgrößte Cluster ist das Cluster 1, welches kleine landwirtschaftlich geprägte Gemeinden mit hohem Viehanteil beschreibt. Abbildung 5-49 zeigt die zehn in KomInteg berechneten kommunalen Cluster und ihre Verteilung auf die verschiedenen Biomassepotenziale. Für jedes Cluster liegen dabei über 70 Indikatoren vor, um regionale Gegebenheiten zu beurteilen.

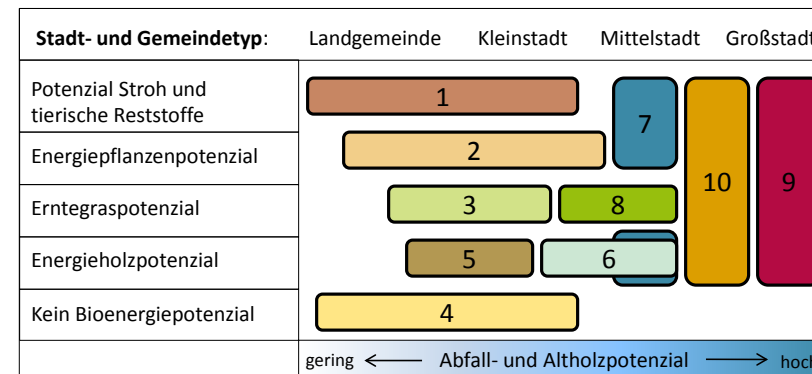


Abbildung 5-49: Vereinfachte Darstellung der Schwerpunkte der Cluster anhand der Bioenergiepotenziale

#### 5.7.1.1 Vergleich der eingesetzten Technologien

Als Ergebnis der in KomInteg durchgeführten Analysen resultieren die in Tabelle 5-18 aufgeführten Technologien mit den jeweiligen maximalen Leistungsgrenzen und Szenarien pro Cluster. Hier wurden jedoch nur Nachwachsende Rohstoffe und Altholz modelliert. Für Prozesse wie Klärgas- oder Deponiegasanlagen wurde unterstellt, dass der Anlagenpark von heute annähernd gleich bleibt. Die möglichst vollständige Nutzung der Wärme aus der Strombereitstellung wurde im Rahmen der Modellierung unterstellt.

Gemäß den Resultaten aus den durchgeführten Modellierungen werden bei Eintritt des Szenarios KS-BAU – ähnlich wie in der regionalen Herangehensweise – kleinere Anlagen den Anlagenpark bestimmen. Vor allem kleine flexible Biogasanlagen und Pflanzenöl-BHKW sind nach Modellierung durch BENSIM im Jahr 2050 vorherrschend. Daneben steigert sich die Energiebereitstellung aus Güllekleinanlagen und Bioabfallvergärungsanlagen gegenüber der heutigen Situation erheblich. Unterschiede gibt es zum einen darin, dass in der kommunalen Herangehensweise größere Anlagen z. B. zur Verwertung des Altholzes im Anlagenpark noch vorhanden sind. Dies ist insbesondere begründet durch das KomInteg-Cluster 9, also Großstädte mit einem hohen Aufkommen an Abfallstoffen und einer entsprechenden Wärmeabsatzmöglichkeit. Auch Waldholz wird – nach heutiger Einschätzung – aus kommunaler Sicht als Bestandteil im Anlagenpark weiter eine wichtige Rolle einnehmen, v. a. in kleineren Anlagen zur Darstellung des Wärmebedarfes. In Kommunen mit größeren landwirtschaftlichen Flächen, die einen ausreichenden Wärmebedarf aufweisen, wurden aus regionaler Sicht zudem größere Biogasanlagen (bis 1,5 MW<sub>el</sub>) modelliert. Insgesamt gesehen ist der Anlagenpark des SW-BAU-Szenarios mit dem regionalen Anlagenpark gemäß KomInteg vergleichbar. Bei Eintritt des Kraftstoffszenarios stellt sich die Situation allerdings anders dar. Der Kraftwerkspark unterscheidet sich dann dadurch, dass zur Bereitstellung von Strom und Wärme nur noch kleine Gülleanlagen und Bioabfallanlagen als Ergebnis der Modellbildung stehen.

Tabelle 5-18: Kommunal adaptierte Technologien mit maximalen Leistungswerten

Tech.	Landwirt. Substrate	Bio- und Grünabfall	Energieholz			Altholz	
			Stückholzvergaser	HHS-Heizungen bis 100 kW <sub>th</sub>	HHS-Heizungen ab 500 kW <sub>th</sub>	HKW (Dampf)	HKW (ORC)
Szen.	€; kWh; CO <sub>2</sub>	€; kWh; CO <sub>2</sub>	kWh; CO <sub>2</sub>	€	€	€; CO <sub>2</sub>	kWh
1	≤ 1,5 MW <sub>el</sub>	-	≤ 500 kW <sub>th</sub>	100 kW <sub>th</sub>	-	-	-
2	≤ 1,5 MW <sub>el</sub>	-	≤ 500 kW <sub>th</sub>	100 kW <sub>th</sub>	-	-	-
3	≤ 500 kW <sub>el</sub>	-	≤ 500 kW <sub>th</sub>	100 kW <sub>th</sub>	-	-	-
4	≤ 250 kW <sub>el</sub>	-	≤ 300 kW <sub>th</sub>	100 kW <sub>th</sub>	-	-	-
5	≤ 500 kW <sub>el</sub>	-	≤ 500 kW <sub>th</sub>	-	500 kW <sub>th</sub>	-	-
6	≤ 1,5 MW <sub>el</sub>	-	≤ 500 kW <sub>th</sub>	-	≤ 1,75 MW <sub>th</sub>	-	-
7	≤ 1,5 MW <sub>el</sub>	-	≤ 500 kW <sub>th</sub>	-	≤ 1,5 MW <sub>th</sub>	-	-
8	≤ 1,5 MW <sub>el</sub>	-	≤ 500 kW <sub>th</sub>	-	500 kW <sub>th</sub>	-	-
9	≤ 1,5 MW <sub>el</sub>	1,0 MW <sub>el</sub>	≤ 500 kW <sub>th</sub>	-	≤ 2,0 MW <sub>th</sub>	5-10 MW <sub>th</sub>	10-15 MW <sub>th</sub>
10	≤ 1,5 MW <sub>el</sub>	-	≤ 500 kW <sub>th</sub>	-	≤ 2,25 MW <sub>th</sub>	-	-

BGA: Biogasanlage; HHS: Holzhackschnitzel; HKW: Heizkraftwerk; ORC: organic rankine cycle

5.7.1.2 Biogener Anteil am Endenergieverbrauch

In der kommunalen Herangehensweise nach dem Projekt KomInteg wurde die Zuordnung der Endenergiebedarfe nach (PROGNOS/EWI/GWS, 2014) vorgenommen. Die Bedarfe wurden dabei mit den regionalen Biomasseangeboten verschnitten. Im Ergebnis stehen die in Kapitel 5.7.1.1 beschriebenen Technologieansätze.

In Abbildung 5-50 werden die biogenen Anteile am Endenergieverbrauch der Meilensteinszenarien mit der Basis zur kommunalen Modellierung verglichen. Deutlich wird, dass die Kraftstoffszenarien – naturgemäß – am stärksten abweichen. Die biogene Wärme- und Strombereitstellung hat per Definition im Kraftstoffszenario eine zu vernachlässigende Bedeutung. Sie müsste daher im Hinblick auf notwendige regionale Infrastrukturen durch andere Optionen dargestellt werden. In den Strom- Wärmeszenarien dagegen wird gegenüber der KomInteg-Basis überproportional viel Strom durch Bioenergie bereitgestellt. Dadurch kann z. B. der Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugungen sehr gut abgebildet werden. Der Verkehr muss hier jedoch komplett durch andere Energieträger dargestellt werden. Im Wärmebereich liegen beide Meilensteine-Szenarien unter den Ansätzen von (PROGNOS/EWI/GWS, 2014) für die Bioenergie. Somit wird deutlich, dass insbesondere für den Wärmemarkt neben der biogenen Bereitstellung weitere Versorgungsmöglichkeiten entwickelt werden müssen.

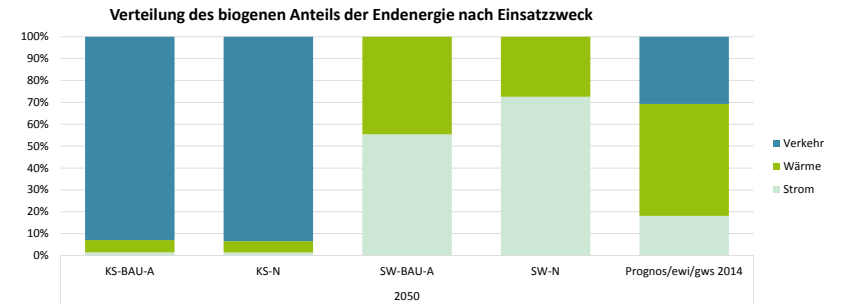


Abbildung 5-50: Vergleich der Szenarien mit der Endenergiebereitstellung aus PROGNOS/EWI/GWS, 2014

5.7.2 Regionale Auswirkungen auf den Strom- und Wärmemarkt

Die regionalen Auswirkungen im Strom- und Wärmemarkt können durch die in (PROGNOS/EWI/GWS, 2014) hinterlegten Verbräuche für jede Kommune erarbeitet werden. Mit den dortigen Hintergrunddaten und Entwicklungen wurden daher die Anteile der biogenen Endenergiebereitstellung für die einzelnen kommunalen Cluster im KomInteg-Projekt berechnet. Es wurden dabei für die einzelnen Cluster die mittleren Strom- und Wärmeverbräuche in PJ/a ausgewiesen. Diese sind in Abbildung 5-51 dargestellt. Cluster 9 hat die höchsten Verbräuche, hier ist insbesondere die Wirtschaft als Großverbraucher zu nennen. Dagegen ist in Cluster 4 eher ein proportional hoher Wärmebedarf im Haushaltsbereich auffallend. Durch diese Verteilung ist es möglich, die Technologien der einzelnen Szenarien optimal auf die Wärmeverbräuche in den Kommunen zu verteilen.

Die Aufteilung der verschiedenen Heizungsarten in den Wohngebäuden (Abb. 5-52) innerhalb der Cluster erlaubt eine überschlägige Bewertung, wo Nah- bzw. Fernwärmenetze derzeit v. a. vorhanden sind und wie der Ausbau in den jeweiligen Cluster möglich ist.

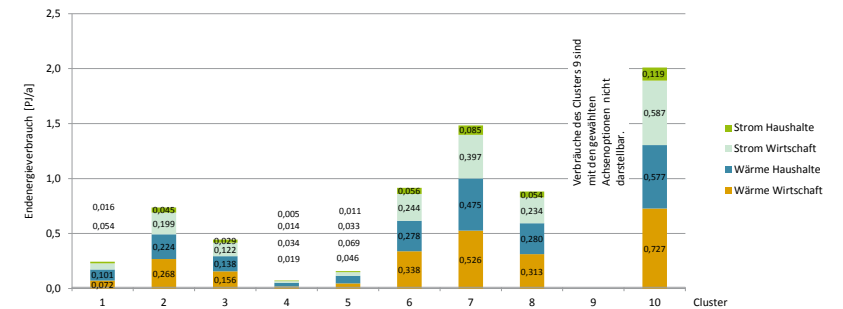


Abbildung 5-51: Darstellung des mittleren Strom- und Wärmeverbrauchs in den Clustern, 2010

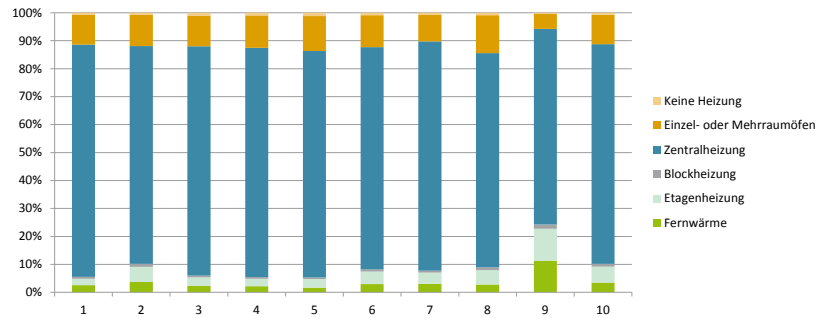


Abbildung 5-52: Durchschnittliche Verteilung der Heizungsart in den Wohngebäuden der Cluster, Basisjahr 2010

### 5.7.2.1 Das KS-BAU-Szenario

Ein – politisch gewünschter – Ausbau der nationalen KWK-Anteile auf 25 %<sup>17</sup> bis 2020 kann auf Grund des Szenarien-bedingten Rückgangs der KWK ab 2015 durch Bioenergie nicht mehr unterstützt werden. Der starke Rückgang von Biogas-KWK und Festbrennstoff-KWK würde bedeuten, dass die bestehenden Fernwärme- und Nahwärmenetze nicht mehr mit regenerativer Wärme aus Biomasse bedient werden könnten und daher alternative (regenerative) Wärmebereitstellungsoptionen implementiert werden müssten.

Tabelle 5-19 führt die im Szenario „Kraftstoff-BAU“ modellierten Bioenergieanlagen zur Strombereitstellung bis 2050 auf. Im Jahr 2050 sind gemäß der Szenarienannahmen in den Kraftstoffszenarien nur noch Güllekleinanlagen und Anlagen zur Bioabfallvergärung zur gekoppelten Strom- / Wärme-Bereitstellung vorhanden. Im Holzbereich sind keine stromerzeugende Anlagen mehr hinterlegt. Im reinen Wärmebereich sind mit abnehmender Tendenz noch Kleinfeuerungsanlagen aufgeführt (vgl. Tabelle 5-20).

Die verbleibenden Bioenergie-Technologien zur Strom- / Wärmeerzeugung sind im Kontext der regionalen Möglichkeiten gut implementierbar. Die Bioabfallvergärungsanlagen sind mit 2,39 PJ Wärmebereitstellung in 2050 so dimensioniert, dass sie die Wärme sehr gut in bestehende Fernwärmenetze einspeisen können. Die Güllekleinanlagen können auf Grund der Kleinskaligkeit ebenfalls sehr gut in regionale Systeme integriert werden. Insgesamt ist durch das Szenario eine flächige Strom- / Wärmeerzeugung durch Bioenergie nicht mehr vorhanden. Auf ca. 25 der Bundesfläche findet keine Viehhaltung statt (z. B. Kommunen des Clusters 3 und 5) und Bioabfallvergärungsanlagen sind ökonomisch und Potenzialseitig lediglich über größere Kommunalverbände darstellbar.

<sup>17</sup> „Deutschlands Zukunft gestalten“ Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, 18. Legislaturperiode, Stand: 14.12.2013: S.41.

Tabelle 5-19: Bioenergieanlagen zur Strombereitstellung bis 2050 im Szenario KS-BAU

Anlagenart (BENSIM)	Einheit	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Güllekleinanlage	PJ/a	0,2	1,3	1,7	2,1	2,5	2,7	2,9	3,2	3,3
Biogas-KWK	PJ/a	56,0	91,4	89,8	82,4	32,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Bioabfallvergärung	PJ/a	3,0	4,8	5,7	6,7	7,6	8,5	9,5	10,5	11,4
Festbrennstoffe-KWK	PJ/a	38,8	43,3	40,2	17,9	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Flüssige Brennstoffe	PJ/a	4,9	1,3	1,3	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Klärgas	PJ/a	4,3	5,0	5,0	5,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Deponiegas	PJ/a	2,4	2,0	2,0	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Biogener Anteil des Abfalls	PJ/a	14,1	12,3	9,6	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 5-20: Bioenergieanlagen zur Wärmebereitstellung bis 2050 im Szenario KS-BAU

Anlagenart (BENSIM)	Einheit	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Güllekleinanlage	PJ/a	0,1	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2
Bioabfallvergärung	PJ/a	0,6	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
Holzfeuerung (Haushalte)	PJ/a	267,9	268,1	268,1	196,6	142,6	99,0	90,0	68,4	50,0
Heizwerke	PJ/a	63,0	59,0	35,4	11,8	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Biogas-KWK	PJ/a	28,8	38,4	37,8	34,7	13,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Festbrennstoffe-KWK	PJ/a	18,8	25,9	24,1	10,7	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0



Es ist zudem anzunehmen, dass der Rückgang der biogenen KWK – ohne die Implementierung alternativer technischer Systeme (z. B. Speicher, Power-to-heat, Power-to-gas-to power, etc.) – Folgen für die Netzstabilität haben wird, weil die Vielzahl der kleineren existierenden Bioenergieanlagen im Strombereich durch die Erbringung von Systemdienstleistungen stabilisierend auf die Netze wirken.

Die Szenarien-bedingt bis 2030 auslaufenden Sektoren der Feststoff-KWK sowie des biogenen Anteils des Abfalls sind in ihrer Prägung – im Kontext derzeitiger technischer Möglichkeiten – gegenläufig zu den aktuellen Zielsetzungen im Bereich der Bioökonomie und der Kaskadennutzung. Ein (gewünschtes) Anwachsen stofflicher Nutzungsanteile im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe führt – trotz potenzieller Stoffstromverlagerungen im Bereich der getrennt erfassten / erfassbaren Bioabfälle – zu tendenziell höheren biogenen Gesamt-Anteilen im Abfallsektor. Wenn diese Abfälle bzw. Althölzer – wie im Szenario beschrieben – nicht mehr energetisch verwertet werden, bedarf es alternativer technischer Konversionsverfahren, welche diese Stoffe z. B. als Basisrohstoff für die Chemie verwenden. In diesem Zusammenhang sind allerdings die Heterogenität möglicher Produkte der Bioökonomie (composite) sowie die – derzeit bereits zu beobachtende - potenzielle Schadstoffakkumulation bei Kaskadenprozessen (z. B. Altholz in der Spanplatte<sup>18</sup>) zu berücksichtigen, welche gegebenenfalls einer stofflichen Konversion im Wege stehen.

Das im Rahmen der Szenarienannahmen unterstellte Auslaufen der energetischen Verwertung des Klärgases würde bei einem tatsächlichen Eintreten eine starke Einschränkung für die bestehenden Kläranlagen bedeuten, die auf eine anaerobe Schlammstabilisierung sowie auf die Klärgasnutzung im Sinne einer „CO<sub>2</sub> freien Kläranlage“ bzw. „energieautarken Kläranlage“ setzen. Derzeit ist eher ein Ausbau der anaeroben Abwasserbehandlung sowie der anaeroben Schlammstabilisierung in Verbindung mit einer entsprechenden Gasnutzung festzustellen. Auch der Klärschlamm selbst, ist letztendlich als biogener Anteil des Abfalls zu verstehen. Das hieraus zu gewinnende Klärgas kann über entsprechende Konversionsverfahren sowohl dem Strom- / Wärme- als auch dem Treibstoffsektor zugeführt werden. Bei Umsetzung des im KS-BAU beschriebenen Szenarien-Ansatzes wären daher in der Summe für den oben skizzierten Reststoff-Sektor neue technische Entsorgungsalternativen zu entwickeln, welche ggf. wiederum ein Korrektiv für die ökonomischen Prämissen des Szenarios liefern könnten (vgl. Kapitel 5.7.3.2).

Der Rückgang des Einsatzes von Holz im Haushalts-Wärmebereich auf 50 PJ bedeutet gerade in den ländlichen KomInteg-Clustern (Cluster 1-5, knapp 50 % der Fläche Deutschlands), die gemäß Definition des Szenarios z. B. zudem keine biogenen (KWK-basierten) Wärmenetze mehr betreiben können, eine Einschränkung der Biomasse-basierten Wärmebereitstellung. In diesem Kontext sind daher – korrespondierend mit der sukzessive sich verbessernden Dämmung von Gebäuden – alternative regenerative Wärmebereitstellungsmöglichkeiten z. B. im Sinne der Solarthermie oder der Umweltwärme zu implementieren.

### 5.7.2.2 Das SW-BAU-Szenario

Das SW-BAU-Szenario zeichnet sich im Strombereich dadurch aus, dass der Anteil an Pflanzenöl-BHKW > 500 an der Endenergie mit gut 360 PJ/a sehr hoch ist. Daneben ergeben sich aus der BENSIM-Modellierung auch langfristig kleinere flexible Biogasanlagen, Bioabfallvergärungsanlagen sowie kleine Gülleanlagen (siehe Tabelle 5-21).

<sup>18</sup> Kaskadenprozesse sind für die Altholzklassen 1 und 2 gut darstellbar. Wahrscheinlich ist jedoch, dass die Altholzklassen 3 und 4 weiterhin in die Verbrennung gehen, da für diese Hölzer auf Grund der chemischen Belastung (z. B. mit Formaldehyd) aus heutiger Sicht kein anderer Markt absehbar ist.

Tabelle 5-21: Bioenergieanlagen zur Strombereitstellung bis 2050 im Szenario SW-BAU

Anlagenart (BENSIM)	Einheit	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Güllekleinanlage	PJ/a	0,2	1,3	1,7	2,1	2,5	2,7	2,9	3,2	3,3
Bioabfallvergärung	PJ/a	3,0	4,8	5,7	6,7	7,6	8,5	9,5	10,5	11,4
Festbrennstoffe-KWK	PJ/a	38,8	43,3	40,2	17,9	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Biogas-KWK	PJ/a	56,0	91,4	89,8	82,4	32,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Flüssige Brennstoffe	PJ/a	4,9	1,3	1,3	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Klärgas	PJ/a	4,3	5,0	5,0	5,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Deponiegas	PJ/a	2,4	2,0	2,0	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Biogener Anteil des Abfalls	PJ/a	14,1	12,3	9,6	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KWK ORC < 1 MW <sub>el</sub> (0,25 kW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	2,4	2,7	2,4	2,0	1,6	0,7	0,0	0,0
KWK < 1 MW <sub>el</sub> (6 MW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	11,0	25,1	25,1	25,1	25,1	14,2	0,0	0,0
KWK (Pöl) < 0,5 MW <sub>el</sub> (2 MW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	1,4	17,6	77,7	190,5	264,8	308,3	362,2	361,2
Biogas flex < 150 kW (500 kW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	18,4	77,5	115,8	116,1	116,1	97,6	68,5	89,3
KWK Biomethan (2 MW <sub>el</sub> )	PJ/a	1,8	17,6	20,1	17,3	14,5	11,7	5,3	0,0	0,0
Vergasung klein (29 kW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	1,1	1,3	1,1	0,9	0,7	0,3	0,0	0,0
Vergasung mittel (10 MW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	0,7	0,8	0,7	0,6	0,5	0,2	0,0	0,0

Die kleinskaligen Pflanzenöl-BHKW sind aus regionaler Sicht sehr gut in alle kommunalen Cluster zu integrieren. Zum einen ist in allen Clustern ein genügender Wärmeabsatz für KWK-Anwendungen vorhanden, zum anderen kann Pflanzenöl aufgrund der Energiedichte in alle Kommunen transportiert werden. Im Gegensatz zu Biogas und auch Energieholz ist Pflanzenöl also „räumlich flexibel“. Auch aus Sicht des Stromsystems sind kleine Pflanzen-

öl-BHKW durch die Fähigkeit des schnellen Kaltstartes gut zum Ausgleich der fluktuierenden Energieträger darstellbar.

Die Biogasanlagen sind in einer Größenordnung modelliert, die es erlaubt, z. B. mit Mikro-gasnetzen neue Nahwärmenetze im KWK-Betrieb zu bedienen. Bestehende Netze könnten im Gegensatz zum Kraftstoffszenario weiterhin betrieben werden. Auch passen die gewählten Biogasanlagen in alle kommunalen Landwirtschaftscluster des KomInteg-Ansatzes. Die Biomethan-KWK-Anlagen sollen gemäß BENSIM bis 2040 auslaufen zu Gunsten flexibler Vor-Ort Verstromungsanlagen. Nachdem die Begünstigungen für Biomethan im EEG 2014 für neue Anlagen abgeschafft wurden, fehlen gegenwärtig Rahmenbedingungen für den Ausbau. Aus regionaler Sicht ist Biomethan nicht unbedingt erforderlich, um die bestehenden regionalen Potenziale abzuschöpfen und die Bedarfe an Wärmeenergie darzustellen.

Tabelle 5-22: Bioenergieanlagen zur Wärmebereitstellung bis 2050 im Szenario SW-BAU

Anlagenart (BENSIM)	Einheit	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Güllekleinanlage	PJ/a	0,1	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2
Bioabfallvergärung	PJ/a	0,6	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
Holzfeuerung (Haushal.)	PJ/a	267,9	268,1	268,1	196,6	142,6	99,0	90,0	68,4	50,0
Heizwerke	PJ/a	63,0	59,0	35,4	11,8	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Festbrennstoffe-KWK	PJ/a	18,8	25,9	24,1	10,7	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Biogas-KWK	PJ/a	28,8	38,4	37,8	34,7	13,7	0,0	0,0	0,0	0,0
KWK ORC < 1 MW <sub>el</sub> (0,25 kW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	10,6	11,8	9,8	8,0	6,2	2,7	0,0	0,0
KWK > 1 MW <sub>el</sub> (6 MW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	11,0	25,1	25,1	25,1	25,1	14,2	0,0	0,0
KWK (Pöi) > 0,5 MW <sub>el</sub> (2 kW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	1,2	14,8	65,3	160,0	222,4	259,0	304,2	303,4
Biogas flex > 150 kW (500 kW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	7,2	28,1	38,8	35,8	32,6	24,8	15,6	17,9
KWK Biomethan (2 MW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	16,2	17,3	13,8	10,7	8,0	3,3	0,0	0,0
Vergasung klein (29 kW <sub>el</sub> )	PJ/a	0,0	1,9	2,0	1,6	1,2	0,9	0,4	0,0	0,0

Im Hinblick auf das modellierte Auslaufen in den Sektoren ‚Feststoff-KWK‘ ‚biogener Anteil des Abfalls‘ und ‚Klärgas‘ ist unter Einbeziehung der Aspekte der Kaskadennutzung, der Bioökonomie sowie der Klärschlammstabilisierung / Abwasserbehandlung auf die gleichen Sachverhalte hinzuweisen, wie sie bereits in Abschnitt 5.7.2.1 beschrieben wurden.

Die Einhaltung der KWK-Ziele der Bundesregierung wird durch dieses Szenario und hier insbesondere durch die vielen kleinskaligen Technologien unter Nutzung von Biomasse unterstützt.

Aus Sicht der regenerativen Wärmebereitstellung (vgl. Tabelle 5-22) stimmt v. a. die netzgebundene Wärme in diesem Szenario gut mit den im KomInteg-Projekt hergeleiteten Cluster-spezifischen Ansätzen überein. Da die Pflanzenöl-BHKW auf Grund der Transportwürdigkeit von Pflanzenöl auch in walddreichen Kommunen eingesetzt werden können, ist mit diesem Szenario flächendeckend eine Biomasse-basierte regenerative Wärmeversorgung möglich, obwohl im Gegensatz zum regionalen Ansatz aus KomInteg die Holzheizwerke an Bedeutung verlieren. Der modellierte Rückgang im Bereich der Einzelfeuerungen gleicht demjenigen im KS-BAU-Szenario. Auf die dortigen Ausführungen (siehe Abschnitt 5.7.2.1) wird daher verwiesen.

### 5.7.3 Regionale Anpassungsbedarfe

#### 5.7.3.1 Die Strom- und Wärmeerzeugung

**Strom:** Bei Eintritt des Strom- / Wärme-Szenarios würde der Bioenergie eine große Rolle in der Erzeugung von Residualenergie zukommen. Bei 4.000 Stunden Laufzeit pro Jahr könnten rund 32 GW installierte elektrische Leistung flexibel eingesetzt werden. Dies würde bei einer in Deutschland derzeit max. in Spitzen benötigten Leistung von 88 GW<sub>el</sub><sup>19</sup> bedeuten, dass die Residualenergie zu einem bedeutenden Teil durch Bioenergie dargestellt werden kann. Gerade der dezentrale Ansatz mit kleinen Biogasanlagen und kleineren Pflanzenölanlagen erfordert dabei keine Anpassungen in der regionalen Infrastruktur. Die Wärmemengen könnten in Nahwärmenetzen vermarktet werden. Ganz anders sieht es bei Eintritt des Kraftstoffszenarios aus. Hier könnte die anteilige Darstellung der erforderlichen Residualenergie nicht mehr durch Bioenergie stattfinden. Das Auslaufen größerer Bioenergieeinheiten im Strommarkt hätte damit auch Folgen für die Netzstabilität, bzw. erfordert eine zügige Implementierung alternativer technischer Systeme. Die beiden Extrema zeigen, dass Bioenergie eine langfristige regulatorische Einbettung und sichere Rahmenbedingungen im Kontext alternativer regenerativer Optionen braucht. Gerade im Strommarkt bietet Bioenergie für die Darstellung der Residualenergie ein nennenswertes Potenzial.

**Wärmenetze:** Wärmenetze werden oft auf 25 Jahre abgeschrieben. Dementsprechend müssen sich diese Netze über einen langen Zeitraum hinweg die Energieträger sichern, bzw. hinreichend flexibel geplant werden. Sie sind ausgerichtet auf hochkalorische Wärme, so dass z. B. bei Eintritt des Kraftstoffszenarios eine Alternative z. B. unter Nutzung solarthermischer Wärme nicht oder nur in Verbindung mit hohen Investitionskosten realisiert werden kann. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass Landwirte und Kommunen teilweise selbst mit im Invest und Betrieb der Anlagen stehen, wäre es für die Wertschöpfung in der Region von Nachteil, wenn die biogene KWK so abnimmt, dass eine Refinanzierung der

<sup>19</sup> Vgl. entsoe, Load and consumption data. Datenbank aus [www.entsoe.eu](http://www.entsoe.eu) i. V. m. Load and Consumption Data: Specificities of member countries, herunterzuladen ebenfalls unter [www.entsoe.eu](http://www.entsoe.eu). Am 01.12.2010 wurde in Deutschland der Maximalwert von 79,9 GW erreicht. Dieser muss noch mit einem Faktor von 1,099 multipliziert werden.

Investition in den einschlägigen Abschreibungszeiträumen nicht mehr möglich ist. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund zu sehen, dass es bundesweit schon knapp 200 Bioenergieerdförderer gibt und sich schätzungsweise 400 Kommunen – teilweise initiiert durch (integrierte) Klimaschutzkonzepte und Landes-Bioenergieberatungen - aktiv mit dem Thema biogene Nahwärme auseinandersetzen. Insbesondere im Cluster 1-5 (kleinere, ländlich geprägte Kommunen) bedeutet dies, dass die zurzeit von der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) und verschiedenen Bundesländern geförderten Wärmenetze und Bioenergieerdförderstrukturen ihre Kunden nicht mehr mit Wärme bedienen könnten und ggf. auf andere Energieträger ausweichen müssten. Bei Eintritt des Strom-Wärme-Szenarios dagegen wären die Wärmenetze durch die vielen kleinskaligen Einspeisungen gesichert. Sie könnten sogar ausgebaut werden.

Der Rückgang der Holzkleinf Feuerungsanlagen erfolgt in beiden Ansätzen so moderat, dass dieser durch eine Verbesserung der Gebäudehülle und ergänzende alternative Maßnahmen kompensiert werden kann, sofern hier ambitionierte Maßnahmen ergriffen werden. Der unterstellte Rückgang des Holzverbrauches in Holzheizwerken würde vor dem Hintergrund des Ausbaus der Holzwärme in Kommunen bei gleichzeitig hohem Anteil von Kommunalwald bedeuten, dass für Holz eine sehr hochwertige Alternativverwendung vorhanden ist. Ansonsten werden die Kommunen ohne rechtliche Begrenzungen des Energieholzverbrauches nicht ihre Anlagen mit einer Laufzeit von mindestens 20 Jahren (von heute an gerechnet bis 2035) aufgeben.

Der Rückgang der holzenergetischen Nutzung würde jedoch direkte Folgen für die Wertschöpfungskette der Bereitstellung haben. Biomassehöfe und Lohnunternehmer spezialisieren sich zurzeit auf die Bereitstellung von Biomasse und Dienstleistungen des Contractings von Bioenergieanlagen. Für diese Wertschöpfungsstufen zeigen die Ergebnisse, dass es wichtig ist, sich in den Dienstleistungen weiter zu diversifizieren. Beispielsweise könnten Biomassehöfe neben der energetischen Schiene auch die Bereitstellung von Hölzern für die Holzwerkstoffindustrie, die Mobilisierung von Holz aus dem Privatwald oder die Mitbeförderung von Kommunalwäldern als neues Aufgabenfeld ansehen.

Beim Aufbau von Wärmenetzen sollte der Rohstoffsicherung Priorität eingeräumt werden. Zusätzlich sollte in der Planung die zukünftige Integration von KWK-Anlagen in Nahwärmenetze mitgedacht werden, die durch das derzeitige EEG finanziell nicht darstellbar ist.



Abbildung 5-53: Endenergieverbrauch biogener Festbrennstoffe im Wärmebereich von 1990 - 2011; erstellt nach Zahlen der AGEE (2011). Quelle: IZES et al., 2014.

### 5.7.3.2 Der Abfallsektor

Die Szenarien stellen Extremsituationen dar, aus denen für einzelne Bereiche auch im Abfallsektor Herausforderungen abgeleitet werden können. Sollten die aus einer politischen Sicht gewünschten, aber über die BENSIM-Modellierung nicht abgebildeten Effekte der Bioökonomie sowie der Kaskadenprozesse greifen, sind im Hinblick auf eine finale Einbindung effizienter energetischer Biomasse-Nutzungsprozesse angepasste Infrastrukturen zur weitestgehend sortenreinen Erfassung und Nutzung entsprechender Biomasse-Sortimente einzurichten. Dies bezieht sich sowohl auf die einzurichtenden Erfassungssysteme im Zusammenhang mit effektiven Mechanismen zur Qualitätskontrolle, als auch auf Maßnahmen zur Effizienzsteigerung im Bereich energetischer Abfall-Verwertungssysteme.

### 5.7.3.3 Die Forst- und Holzwirtschaft

Durch den Ausbau der Holzenergie nahm v. a. in den Jahren 2004 - 2009 der Holzerlös als wichtige Einkommensbasis kleiner Kommunen zu. Durch den Szenarien-bedingten Wegfall einer Holzvermarktung im Energiesektor sind - ohne alternative Vermarktungsmöglichkeiten - wieder schlechtere Deckungsbeiträge insbesondere für den dezentral organisierten Kommunalwald zu erwarten. Dies müsste durch eine Zunahme des Holzverkaufs an die Industrie (Holzwerkstoffindustrie oder Chemieindustrie) aufgefangen werden. In diesem neuen Industriezweig müsste sich bis 2035 ein hochpreisiger neuer Markt von etwa 30 Mio. fm (rund 15 Mio. t<sub>atro</sub>, WERN et al., 2014) etablieren, um das heute genutzte Energieholz zu kompensieren. Die in Deutschland bereitgestellten Hölzer werden angebotsseitig in den nächsten Jahren durch die Verbesserung der Einschlagssituation im Privat- und Kommunalwald zunehmen. Die Forstverwaltungen sind gut beraten, sich neben der Energie weitere Märkte zu sichern und zu erschließen, wie beide Szenarien zeigen.

Betriebe der Holzindustrie sind zudem auf Restholz als Energiequelle angewiesen. Der Endenergieverbrauch der Industrie hat dabei für den Bereich der biogenen Festbrennstoffe seit 10 Jahren kontinuierlich zugenommen (vgl. Abb. 5-53). Der Stand von 2011 (rund 18.000 GWh bzw. rund 6,5 PJ) ist in beiden Szenarien hinsichtlich einer industriellen (Eigen-)Versorgung ab dem Jahr 2030 nicht mehr abbildbar, sodass hier Alternativen in der Energieerzeugung sowie Effizienzpotenziale im Umgang mit Holz und Energie erschlossen werden müssten.

Für die Versorgung mit Holz aus der Forstwirtschaft ist bei jetzigen und zukünftigen Projekten auf die Sicherung der Rohstoffe zu achten. Privatwaldbesitzer und Kommunalwaldbesitzer haben direkten Zugriff auf den Rohstoff, genauso wie Straßenmeistereien oder Landschaftspflegereine. Aus Sicht der Energieholzbereitsteller sollten mit diesen Akteuren langfristige Kooperationsverträge abgeschlossen werden, um die derzeitige Versorgungssituation zu sichern. Dies gilt insbesondere auch für die Biomassehöfe.

### 5.7.3.4 Die Landwirtschaft

Für den Bereich der Landwirtschaft sind wenige Anpassungsbedarfe zu konstatieren, weil die Landwirtschaft die modellierten Rohstoffbedarfe leicht bereitstellen kann. Lediglich die mehrjährigen Kulturen wie Hölzer im Kurzumtrieb und Miscanthus haben im Kraftstoffszenario das Nachsehen. Hier sollten ebenfalls frühzeitige Abnahmeverträge erfolgen.

### 5.7.4 Überblick über die Anpassungsbedarfe aus regionaler Sicht

Konkreten regionalen Anpassungsbedarf ergibt sich v. a. für das Szenario KS-BAU im Bereich Strom und Wärme. Aber auch im Szenario SW-BAU ergibt sich im Wärmebereich Handlungsbedarf. Zur Flankierung der Szenarios müssten folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Weitere Förderung von Speichern als Option neben der flexiblen Stromerzeugung mit Biomasse
- Vorsichtige und regional angepasste Förderung von Bioenergiehöfen und Nahwärmenetzen sowie Biomassehöfen zur Vermeidung von Lock-in Investitionen
- Massiver Ausbau der Nutzung von industrieller Abwärme zur Versorgung bestehender Fernwärmesystemen mit Wärme / Prüfung neuer Fernwärmenetze auf Basis von industrieller Abwärme
- Anstreben möglichst guter Rohstoffsicherungen der Holzheizwerke z. B. durch Kooperationen mit dem Waldbesitz
- Nochmals verschärfte Anforderungen an die Grenzwerte der 1. BImSchV für Festbrennstoffe prüfen
- Erarbeiten von Lösungen zur Verwendung von A III und A IV Hölzern
- Förderkampagne zur Umstellung bestehender Nahwärmenetze auf niederkalorische Wärme
- Massiver Ausbau der Förderung zur Hausdämmung
- Verstärkte Berücksichtigung hoher Energieeffizienz im Rahmen von Quartierskonzepten, Überprüfung der Möglichkeiten des Rückbaus von ineffizienten Quartieren
- Alternative Nutzungen des Holzes müssen v. a. den ländlichen Kommunen angeboten werden, um die kommunalen Haushalte nicht zu belasten. Deswegen: Ausbau der Nutzung von Holz als Werkstoff und als Basischemikalie

## 5.8 Internationale Auswirkungen und Rückkopplungen

### 5.8.1 Globale nachhaltige Bioenergiepotenziale

Bis 2050 ist global von einem (moderaten) Anstieg des Primärenergieverbrauches auszugehen, selbst wenn erhebliche Anstrengungen zur Steigerung der Energieeffizienz angenommen werden (GEA, 2012; IEA, 2012). Die globalen Bioenergiepotenziale liegen bei etwa 100 – 300 EJ (CHUM et al., 2011) und könnten je nach tatsächlicher Verfügbarkeit und Erschließung etwa 10 % bis 40 % des globalen Primärenergiebedarfs in 2050 decken. Allerdings ist davon auszugehen, dass die obere Grenze nur bei erheblichen Anstrengungen zur Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge und moderater Nachfrageentwicklung für

den Konsum tierischer Nahrungsmittel erschließbar wäre, während bei möglichen negativen Effekten für landwirtschaftliche Erträge aufgrund des Klimawandels eher die untere Grenze verfügbar ist.

Da die Nachfrage nach Bioenergeträgern nicht nur für moderne Formen wie Kraftstoffe und Strom steigt, sondern auch die traditionelle Nutzung von Biomasse für Kochen und Wärme vor allem in Entwicklungsländern, sind die für den internationalen Handel ggf. verfügbaren nachhaltigen Bioenergiepotenziale vor allem in Brasilien, Kanada, USA und den USA zu finden, während Länder wie China und Südafrika zu Nettoimporteuren werden können (IINAS und CENBIO, 2014).

Gleichzeitig ist zu beachten, dass in einem globalen Klimaschutzszenario zur Erreichung des 2°C-Ziels mit starker Nachhaltigkeit auch Länder wie Kanada, Russland und die USA die Bioenergie zur endogenen Substitution fossiler Energieträger einsetzen werden und damit künftig Exportpotenziale nur dann realisiert werden, wenn dies ökonomisch attraktiver als die nationale Nutzung ist.

Eine wesentliche Rolle wird die Biomasse bei der künftigen Bereitstellung von flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen vor allem im Bereich der Luft- und Schifffahrt spielen, da hier andere Alternativen aus heutiger Sicht bis 2050 nur in geringem Umfang zur Verfügung stehen (FRITSCHKE et al., 2012).

Aufgrund der Flächenbedarfe für die 1. Generation von Biokraftstoffen wird die Nachfragesteigerung insbesondere bei FT-Diesel und Ethanol der 2. Generation sowie Biomethan gesehen, die eine Nutzung biogener Abfall- und Reststoffe sowie fester Biomasse aus mehrjährigen Pflanzen erlauben (FRITSCHKE et al., 2012; IEA, 2011).

Aus heutiger Sicht wird der globale Handel mit Bioenergie (fest insb. als Pellets, flüssig als Kraftstoffe) sich somit auf wenige Länder beschränken, deren Exportpotenzial bei steigenden Anstrengungen zum Klimaschutz sinken wird.

### 5.8.2 Mögliche nachhaltige Importpotenziale für Bioenergie

Im Hinblick auf die sozialen Aspekte der Nachhaltigkeit ist die Frage der „gerechten Verteilung“ von Bedeutung: Wird bis 2050 von einem global verfügbaren Bioenergiepotenzial von 200 EJ/a ausgegangen und eine Weltbevölkerung von 9 Milliarden Menschen angenommen so ergibt dies bei globaler Gleichverteilung einen „Pro-Kopf-Anspruch“ von rund 20 GJ an primärer Bioenergie. Bei einer deutschen Bevölkerung von rd. 75 Mio. im Jahr 2050 bestünde damit ein theoretischer „Anspruch“ auf ca. 1.500 PJ an Bioenergie, der sowohl **endogene wie auch importierte** Energieträger umfassen würde.

Diese theoretische Betrachtung muss durch Aspekte der ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit ergänzt werden, und in sozialer Hinsicht sind potenzielle Einnahmen für Entwicklungsländer aus Bioenergieexporten relevant, wenn die Biomassebereitstellung kostengünstiger als im Importland erfolgen kann. Dies gilt umso mehr, als die natürlichen Bedingungen für die Kultivierung von Biomasse regional sehr unterschiedlich sind: die tropischen und subtropischen Regionen zeigen ein hohes Produktionspotenzial, während in den Gemäßigten Breiten und borealen Gebieten die landbasierte Biomasseerzeugung sich pro Hektar deutlich geringer darstellt.



Parallel ist zu beachten, dass in Ländern wie Brasilien, Kanada, Russland und USA sowie in den ost- und westafrikanischen Ländern erhebliche Potenziale für **andere Erneuerbare** sowie zur Energieeffizienz bestehen, deren Nutzung je nach Szenario auch unter Einhaltung globaler Klimaschutzziele zu Exportoptionen für Bioenergie führt.

Aus heutiger Sicht gilt daher folgende Abschätzung für 2030 bis 2050 im Nachhaltig-Szenario<sup>20</sup>:

Bis 2030 besteht ein gesamtes nachhaltiges Importpotenzial von ca. 160 PJ an festen und 50 PJ an flüssigen Bioenergieträgern, das bis 2050 auf ca. 400 PJ an festen und 100 PJ an flüssigen Bioenergieträgern ansteigt. Hinzu kämen bis 2030 ca. 10 PJ und bis 2050 ca. 100 PJ an Biomethan aus Nicht-EU-Staaten in Mittel- und Osteuropa.

Diese Potenziale wurden für die EU-Märkte abgeleitet, in denen Deutschland aufgrund der hohen energiewirtschaftlichen Bedeutung eine dominante Rolle spielt. Es wird vereinfachend unterstellt, dass Deutschland rund 60 % der biogenen Importpotenziale (bei Biomethan: 100 %) beanspruchen kann, da die skandinavischen Länder sowie Frankreich, Polen und Tschechien über eigene hohe endogene Potenziale verfügen (EEA, 2013; IMPERIAL COLLEGE, 2012).

Damit stünde für Deutschland bis 2030 ein gesamtes nachhaltiges Importpotenzial von ca. 100 PJ an festen und 30 PJ an flüssigen Bioenergieträgern, das bis 2050 auf ca. 240 PJ an festen und 60 PJ an flüssigen Bioenergieträgern ansteigt. Hinzu kämen bis 2030 ca. 10 PJ und bis 2050 ca. 100 PJ an Biomethan aus Nicht-EU-Staaten in Mittel- und Osteuropa.

Tabelle 5-23: Deutsche Importpotenziale für nachhaltig bereitgestellte Bioenergieträger. Quelle: Analysen von IINAS (unveröffentlicht).

Angaben in PJ	2030			2050		
	Pellets	1G Kraftstoffe	Biomethan	Pellets	1G Kraftstoffe	Biomethan
Nordamerika	100			200		
Russland	50			100		
Ukraine + Belarus			10			100
Brasilien	10	50		50	50	
Afrika (u. a. MZ)				50	50	
<b>Summe</b>	<b>160</b>	<b>50</b>	<b>10</b>	<b>400</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
Anteilsfaktor DE-Importe	60 %	60 %	100 %	60 %	60 %	100 %
<b>d. h. Importanteil für DE</b>	<b>96</b>	<b>30</b>	<b>10</b>	<b>240</b>	<b>60</b>	<b>100</b>

20 Das hier abgeleitete Mengengerüst bezieht sich auf die Exportmöglichkeiten nach Europa, da hier ein hohes Preisniveau für Biomasse angenommen wird. Weitere Exportpotenziale bieten die wachsenden asiatischen Märkte, für die aber auch Exporteure in Australien und Neuseeland sowie z. B. Thailand in Frage kommen. Japan wird aus heutiger Sicht keine nennenswerten Mengen an Biomasse importieren (vgl. IINAS & CENBIO, 2014).

### 5.8.3 Politische Rahmenbedingungen und internationale Ziele sowie Nachhaltigkeitskriterien für Bioenergie

Eine fundamentale Voraussetzung für die künftig global verfügbare Biomasse ist die Nachhaltigkeit ihrer Bereitstellung. Diese normative Setzung wird durch eine Vielzahl von Studien unterstützt (CORNELISSEN et al., 2012; DAUBER et al., 2012; GEA 2012; IEA, 2012, 2012; IEA/OECD, 2012). Daher ist davon auszugehen, dass für den internationalen Handel mit Bioenergieträgern mittelfristig verbindliche Nachhaltigkeitsanforderungen gestellt werden, die mindestens die Aspekte THG-Bilanz (Reduktion gegenüber Fossilen), Biodiversitätsschutz sowie soziale Fragen (Arbeitsschutz, Landrechte) betreffen. Entsprechende freiwillige Konzepte liegen mit den GBEP-Indikatoren (GBEP, 2011) sowie den „Voluntary Guidelines on the Responsible Governance of Tenure of Land, Fisheries and Forests“ (CFS, 2012) bereits vor, und globale verbindliche Anforderungen wurden bereits für Biokraftstoffe entwickelt (FRANKE et al. 2013).

Für die EU wird eine Ausdehnung der Anforderungen der RED auf feste Bioenergie angenommen (vgl. dazu näher FRITSCHÉ et al. 2012, 2014; FRITSCHÉ & IRIARTE, 2014), womit eine „Globalisierung“ der Anforderungen auch für den Import von festen Bioenergieträgern und Biomethan erreicht wird. Bei der für Bioenergie zu fordernden Reduktion von THG-Emissionen gegenüber fossilen Energien sind bei Anbaubiomasse die Effekte durch direkte und indirekte Landnutzungsänderungen (LUC) sowie bei Forstbiomasse auch die C-Bilanz („Carbon debt“) einzubeziehen und auch Fragen der Ressourceneffizienz zu beachten, wie dies in der jüngsten Potenzialstudie für die EU erfolgte (EEA, 2013).

Aufgrund der steigenden Nutzung von Biomasse auch für die stoffliche Nutzung sowie in „gekoppelten“ Systemen wie Bioraffinerien werden zudem globalisierte Nachhaltigkeitsanforderungen für die gesamte Bioökonomie (alle Biomasse ohne Ernährung / Textil) angenommen, um negative Verdrängungseffekte zu vermeiden (FRITSCHÉ & IRIARTE, 2014).

Diese Frage der Nachhaltigkeit von Biomasse – sowohl für Importe wie auch über die Landnutzungskopplungen bei der Nutzung endogener Potenziale in Deutschland – ist daher ein zentraler Meilenstein und sollte mit Blick auf das Jahr 2030 geklärt sein.

### 5.8.4 Verwendung internationaler Energiedaten

Für die globale Modellierung mit MAGNET durch die Verbundpartner sind konsistente Daten für die Entwicklung der internationalen Energiemärkte für Bioenergieträger (insbesondere Biokraftstoffe) erforderlich. Hierzu wurde auf Grundlage einer Kooperation mit der IEA ausführliche Kennwerte aus (IEA, 2014) ermittelt und für die Modellierung mit MAGNET disaggregiert (vgl. Anhang A 4.2). Ergänzend wurden für die Modellierung mit LandSHIFT auch die Anteile von 2. Generation-Kraftstoffen aus Energiegräsern und Kurzumtriebsplantagen ermittelt und regional disaggregiert. Weiterhin wurden für die Modellierung mit LandSHIFT die Daten für regionalisierte Erträge von Lignozellulose-Rohstoffen für Kraftstoffe der 2. Generation sowie die jeweilige Konversionseffizienz ermittelt.

### 5.8.5 Bilanzierung Versorgungssicherheit

Neben den im Verbundvorhaben untersuchten Nachhaltigkeitsaspekten wie THG-Emissionen, Kosten und Effekte auf Biodiversität und Ernährungssicherung stellt auch die Versorgungssicherheit von Energiesystemen eine wichtige Frage zur Bewertung dar.



Mit Blick auf die Bioenergie hat die GBEP, in der auch Deutschland Partner ist, im Jahr 2011 eine Liste mit 24 Indikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von nationalen Bioenergiepolitiken vorgelegt – und darin ist der GBEP-Indikator 22 (Energy Diversity) ist eine vergleichsweise einfache Möglichkeit, den Aspekt "Versorgungssicherheit" näherungsweise zu quantifizieren (GLOBAL BIOENERGY PARTNERSHIP, GBEP 2011). Hierzu dient der sog. Herfindahl Index, der über die Summe der Quadrate der Anteile von Energieträgern am Primärenergiebedarf bestimmt wird und auch von der IEA verwendet wird.

Ausgehend von Daten aus BENSIM und Ergebnissen der Ökobilanzierung von IFEU wurde von IINAS ein Excel-Tool entwickelt, das Daten zur biogenen Endenergiebereitstellung in die gesamte Primärenergiebilanz Deutschlands integriert und dann den Herfindahl Index berechnet.

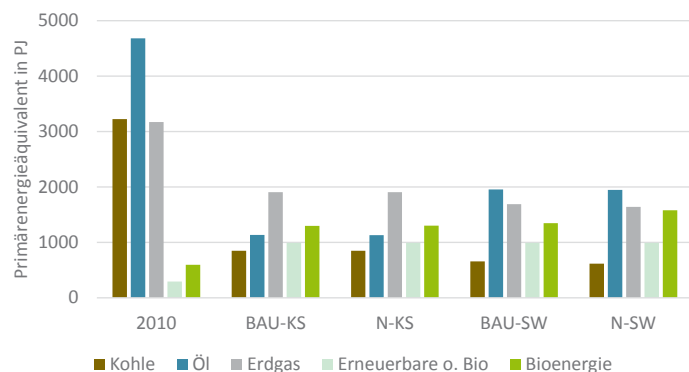


Abbildung 5-54: Disaggregierter Primärenergiebedarf in Deutschland im Jahr 2010 und in den vier Szenarien 2030

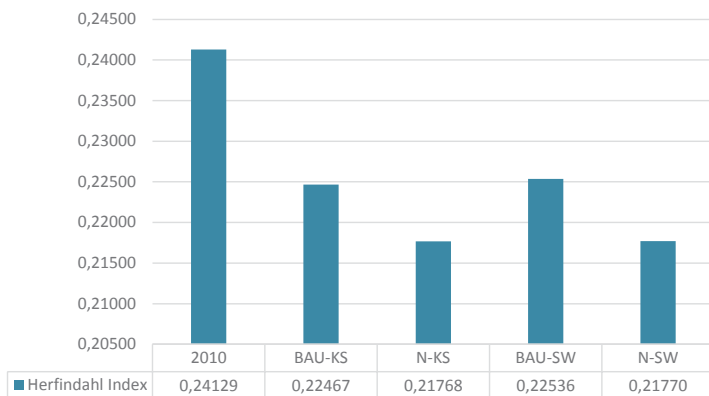


Abbildung 5-55: Herfindahl-Index für das Jahr 2010 und die vier Szenarien 2030

Das Mengengerüst der Primärenergiebilanzen zeigt Abbildung 5-54. Die Gegenüberstellung zeigt, dass alle Szenarien zu sehr deutlichen Reduktionen beim Primärenergiebedarf für Erdöl und Kohle sowie Erdgas führen, während der Beitrag der nicht-biogenen Erneuerbaren Energien und der Bioenergie signifikant ansteigt.

Die Szenarien business-as-usual (BAU) und Nachhaltig (N), jeweils für Kraftstoffe (KS) und Strom / Wärme (SW), zeigen aber sehr unterschiedliche Effekte auf den fossilen Energieträgermix und damit auf Versorgungssicherheit. Die KS-Szenarien erfordern deutlich weniger Erdöl (aber Biomasse-Importe), während in den SW-Szenarien weniger Kohle und Erdgas, dafür aber mehr Erdöl benötigt wird.

Die Abbildung 5-55 zeigt den aus den Primärenergiebilanzen abgeleiteten Herfindahl-Index für das Jahr 2010 und die Meilensteine-Szenarien. Deutlich sichtbar ist, dass die wesentlichen Unterschiede der Energie-Diversität zwischen den BAU- und N-Szenarien bestehen (jeweils ca. 3 %-Punkte), während die Unterschiede zwischen den N-Szenarien für KS und SW extrem gering sind. Gegenüber 2010 können die 2030-Szenarien die Energiediversität um ca. 7 % (BAU) bzw. 10 % (N-Szenarien) verbessern. Damit stellt Bioenergie eine signifikante Möglichkeit dar, die Versorgungssicherheit in Deutschland zu erhöhen.

Offen ist jedoch, wie Importe von Bioenergieträgern zu bewerten sind – in den KS-Szenarien nehmen diese deutlich zu. Hierzu ist der Herfindahl-Index keine aussagefähige Kenngröße, sondern es müssten weitere Indikatoren wie z. B. Herkunftsländer (geopolitische Einschätzung) und Handelsrouten (Verletzlichkeit) einbezogen werden, was aufgrund des Aufwands im Vorhaben nicht möglich war.

Für künftige Arbeiten ist zu beachten, dass „realistische“ Szenarien mögliche Importe fester Bioenergieträger zur Mitverbrennung sowie von Biomethan berücksichtigen müssten, womit sich weitere Fragen zur Stabilität der Exportländer (Kanada, USA) bzw. der Versorgungswege (Pipelines) ergäben.

## 5.8.6 Rückwirkungen der Szenarien auf das deutsche Energiesystem

### 5.8.6.1 Die Rolle von Biomethan als Kraftstoff

Die Szenario-Ergebnisse aus BENSIM unterstellen eine extrem stark steigende Rolle von Biomethan in den Kraftstoff-Szenarien, was einen sehr deutlich steigenden Anteil von Gasfahrzeugen impliziert. Die hierfür erforderliche Betankungs-Infrastruktur müsste ab 2020 erheblich ausgebaut werden – dies ist generell möglich, aber sehr ambitioniert.

Studien von Seiten der Energiewirtschaft (BRITISH PETROLEUM, 2014; SHELL, 2013, 2014) sowie eine Studie der Deutschen Energie-Agentur (dena 2010) und die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (BMVBS, 2013a, 2013b) sehen für Deutschland bis 2030 deutlich geringere Anteile von Gasfahrzeugen, während die renewibility-Studien unter Einbeziehung der Nachfrageseite kein nennenswertes Potenzial für Biomethan im Verkehrssektor ergaben (ÖKO-INSTITUT & DLR, 2009a, 2009b; UBA, 2013).

Aus heutiger Sicht sind die vorliegenden Extrem-Szenarien für den Verkehrssektor zwar kein tragfähiges und robustes Mengengerüst, zeigen aber die Notwendigkeit auf, Biomethan insbesondere gegenüber Kraftstoffen der 2. Generation weiter zu untersuchen und ggf. die Kraftstoffstrategie der Bundesregierung entsprechend fortzuschreiben.

### 5.8.6.2 Mitverbrennung von Biomasse

Eine Sonderrolle bei der biogenen Strombereitstellung nimmt die mögliche Mitverbrennung fester Bioenergieträger (insbesondere Pellets) in bestehenden Kohlekraftwerken bis 2030 ein. Diese Technologie ist vergleichsweise preiswert und kurzfristig einsetzbar (IEA-ETSAP & IRENA, 2013; VOGEL et al., 2011), wurde jedoch in BENSIM nicht als Option einbezogen, da sie nicht als „fortschrittlich“ und längerfristig tragfähig gilt.<sup>21</sup>

Dies ist insoweit für die Projektfragestellung gerechtfertigt, als die Mitverbrennung in großen Kohlekraftwerken sich weniger auf lokal und regional verfügbare Biomasse stützt als auf international gehandelte und standardisierte Brennstoffe wie Pellets aus Holz und – längerfristig – torrefiziertes biogenes Material.

Damit tritt auch bei einem Ausbau der Mitverbrennung in Deutschland keine nennenswerte Nutzungskonkurrenz um endogene Ressourcen auf, und auch die verfügbaren nachhaltigen Importpotenziale (vgl. Kapitel 5.8.2) sind mittelfristig vergleichsweise groß.

Im Hinblick auf das Strom-Wärme-Nachhaltig-Szenario (SW-N) bleibt jedoch festzuhalten, dass bei den dort unterstellten CO<sub>2</sub>-Preisen die Mitverbrennung in Deutschland sehr attraktiv würde – und entsprechende Strommengen deutlich günstiger bereitstellen würde als die in den BENSIM-Szenarien angenommenen biogenen Stromerzeugungstechnologien.

Die Erfahrungen in den Niederlanden und Großbritannien belegen, dass bei entsprechenden Anreizen eine sehr schnelle Umsetzung von Mitverbrennungspotenzialen erfolgt, und auch die großen Stromversorger in Deutschland hatten von 2007-2009 umfangreiche Pläne zur Mitverbrennung in ihren Steinkohlekraftwerken, die jedoch nach dem Verfall der CO<sub>2</sub>-Preise im Rahmen des europäischen Emissionshandelssystems (ETS) über Pilotprojekte hinaus nicht realisiert wurden.

Die auch von der Bundesregierung angestrebte Reformierung des ETS mit dem Ziel, wieder deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise zu erreichen, ist jedoch ein wesentlicher Baustein für die Erreichung der deutschen und europäischen CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele. Die Mitverbrennung von Pellets in Kohlekraftwerken kann daher als „Übergangs“-Option relevant werden mit Auswirkung u. a. auf Importe, vor allem aus Kanada und den USA (FRITSCHKE et al., 2014). Die entsprechenden Nachhaltigkeitsfragen vor dem Hintergrund und Mengengerüste sollten daher als ein Meilenstein bis 2030 geklärt sein.

<sup>21</sup> Die Mitverbrennung ergäbe nur Sinn, wenn sie in bestehenden Kohlekraftwerken erfolgt – ein nennenswerter Neubau von Kohlekraftwerken ist in der BMU-Leitstudie nicht vorgesehen. Da die Kapazitäten an Braun- und Steinkohle-Kraftwerken (ohne KWK) bis 2050 in der Leitstudie extrem rückläufig sind, ist die Mitverbrennung zumindest langfristig keine nachhaltige Option.

## 6 Schlussfolgerungen

Die Szenarienergebnisse zeigen potenzielle Entwicklungspfade auf, die sich unter den angenommenen Rahmenbedingungen als ökonomisch vorteilhaft erweisen. Die Szenariannahmen sind Extremannahmen (z. B. vollständiger Einsatz des verfügbaren Biomassepotenzials überwiegend für Kraftstoffe oder für Strom / Wärme) und dienen in dieser Studie dazu, möglichst unterschiedliche, dennoch in realen Größenordnungen liegende, Inputgrößen für die Modelle zu generieren und den Simulationsergebnissen eine gewisse Bandbreite an Entwicklungen und damit Interpretationsspielraum zu geben. Die Szenarienergebnisse sind daher vor allem relativ, also im Vergleich zueinander, zu interpretieren. Sie sind ein notwendiges Werkzeug für die Ableitung von Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen aber keine Handlungsempfehlung an sich. Nachfolgend werden die Ergebnisse in der Gesamtschau interpretiert und darauf aufbauend Schlussfolgerungen, Meilensteine und Handlungsempfehlungen abgeleitet.

### Bioenergieträger auf Basis von Agrarrohstoffen bleiben in allen Szenarien ökonomisch vorteilhaft.

Die Ergebnisse zeigen, dass die künftige Nutzung von Biomasse vor allem durch die Nachfrage nach Nahrungs- und Futtermitteln geprägt ist. Eine nationale Bioenergiestrategie wird die internationalen Agrarrohstoffmärkte selbst bei hohen Importanteilen in den Mengen- und Preiseffekten nicht nennenswert beeinflussen. Dies gilt jedoch nur, solange andere Länder sich in ihren Bioenergiestrategien im Korridor der angenommenen internationalen Erwartungen entwickeln. Im Detail ergeben die Analysen mit dem Technologiemodell BENSIM, dass unter den erwarteten Preissteigerungen für Agrarprodukte<sup>22</sup> vor allem Pflanzenöl / Biodiesel gefolgt von Biogas / Biomethan die relativ vorteilhaften Energieträger für Konversionsanlagen<sup>23</sup> in Deutschland darstellen. Über die Modellergebnisse hinaus lassen sich die beiden technischen Systeme wie folgt charakterisieren:

Die Bereitstellung von **Pflanzenöl und Biodiesel** ist generell wie folgt gekennzeichnet:

- Der Rohstoff wird in hohem Maße importiert.
- Die Konversionstechnologie zur Herstellung und Nutzung des Pflanzenöls / Biodiesel ist Stand der Technik mit vergleichsweise wenig Innovationspotenzial.
- Die Konversionstechnologie zur Stromerzeugung ist bereits heute sehr gut für die flexible Strombereitstellung geeignet.

<sup>22</sup> Ergebnisse aus MAGNET für Weizen, Grobgetreide, Ölsaaten und Zuckerrohr / -rübe. Andere Rohstoffpreisentwicklungen wurden auf Basis von Expertenwissen abgeschätzt. Preisentwicklungen von Rest- und Abfallstoffen wurden im Modellverbund nicht näher untersucht.

<sup>23</sup> Im nationalen Kontext wurde eine Zunahme (etwa Verdreifachung) von Güllekleinanlagen und Bioabfallvergärungsanlagen mit einem steigenden Endenergiebeitrag, jedoch auf verhältnismäßig niedrigem Niveau, angenommen. Aufgrund vergleichsweise hoher Bereitstellungskosten ist hierfür eine stabile, politische Flankierung notwendig. Weitere Rest- und Abfallstoffe (insb. Gülle, aber auch Co-Substrate) sind teilweise in den modellierten Konzepten (z. B. Gülle bei Biogas- / Biomethananlagen) enthalten.

- Die Flächenenerträge sind – abgesehen von Palmöl – relativ moderat, jedoch wird der Bioenergieträger in der Regel im Verbund mit Futtermittel (Presskuchen / Extraktionsschrot) und Glycerin (i. d. R. Pharmaglycerin) hergestellt, was preisstabilisierende Wirkung haben und z. B. vor dem Hintergrund Glycerin-basierter Nutzungspfade eine wichtige Übergangstechnologie darstellen kann. Die preisstabilisierende Wirkung kann Risiken von Rohstoffpreisschwankungen minimieren.

Bei **Biogas / Biomethan** hingegen stellt sich die Bereitstellung wie folgt dar:

- Der Rohstoff (Biogassubstrat) wird wegen der geringen Energiedichte in hohem Maße inländisch erzeugt und führt aufgrund der Transportunwürdigkeit des Substrats im Umkreis der Biogasanlagen zu einer langjährigen Flächenbindung. Internationaler Biogas- und Biomethanhandel z. B. über das Gasnetz könnte mittelfristig zusätzlich interessant werden (THRÄN et al., 2014).
- Die Konversionstechnologie verfügt kurzfristig über Innovationspotenzial in Richtung „Flexible Strombereitstellung“ sowie mittelfristig zur Gewinnung neuer Zwischenprodukte für die stofflich-energetische Nutzung, deren Erforschung teilweise noch in den Anfängen steckt.
- Die energetischen Flächenenerträge sind deutlich höher, allerdings auf Kosten höherer Umweltwirkungen im Bereich Nährstoffeintrag und teilweise auch bei Versauerung und Feinstaubbelastung.
- Der Einsatz als Kraftstoff ist durch verschiedene Hemmnisse geprägt und wird voraussichtlich nur für ausgewählte Verkehrssektoren relevant.

Dass die Rohstoffbasis der in den Strom- / Wärme- bzw. Kraftstoffszenarien dominierenden Technologien jeweils gleich ist (Maissilage für Biogas / Biomethan bzw. Pflanzenöl für die direkte Verwendung oder als Basis für Biodiesel), bedeutet zweierlei: zum einen ergibt sich trotz der noch nicht eindeutig geklärten Frage, welche Nutzungsoptionen (Strom / Wärme oder Kraftstoffe) insgesamt vorteilhaft ist, eine relativ robuste Rohstoffbasis. Andererseits ergeben sich auch Konkurrenzsituationen, da alle dominanten Nutzungsoptionen die gleiche Rohstoffbasis beanspruchen.

#### **Abgestimmte internationale Landnutzungspolitik ist Voraussetzung für eine nachhaltige Bioenergiepolitik in Deutschland.**

Für die Bewertung der Rohstoffbasis ergeben sich insbesondere Unterschiede zwischen einer global verankerten nachhaltigen Landnutzungspolitik und dem Beibehalten der aktuellen Anforderungen. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem ab dem Jahr 2020 angesetzten Ausschluss globaler Landnutzungsänderungen in Schutzgebieten und anderen sensiblen Gebieten die Effekte auf die Biologische Vielfalt und die Bodenqualität – insbesondere im globalen Kontext – deutlich geringer sind. Die Risiken für Biologische Vielfalt und Boden werden bei heimischer Biomasseproduktion im Vergleich zu Importen zwar als geringer eingeschätzt, jedoch könnten die indirekten Effekte, die aus der Verdrängung anderer Ackerkulturen durch Biogassubstrate resultieren, nur grob abgeschätzt werden (z. B. unter

der vereinfachten Annahme, dass nur Weizen verdrängt wird) und könnten in der Realität anders ausfallen. Bei einem weiteren Ausbau der Bioenergie aus Energiepflanzen können Treibhausgasemissionen aus direkten und indirekten Landnutzungsänderungen in der gleichen Größenordnung liegen wie die durch den Anbau, Bereitstellung und Nutzung von Bioenergieträgern bedingten Emissionen bzw. können diese übersteigen und beeinflussen das Gesamtergebnis signifikant. Zwar fallen auch hier bei einem ab 2020 global angesetzten Ausschluss von Landnutzungsänderungen in Wäldern, Torfmoorflächen und anderen sensiblen Gebieten die Treibhausgasemissionen nach 2020 geringer aus, allerdings ist der Effekt erst ab 2040 sichtbar, da die hohen Emissionen der Vorjahre (jeweils über 20 Jahre abgeschrieben) noch lange nachwirken.

Im Umkehrschluss heißt das: solange keine internationalen Standards zum Flächenschutz verfügbar sind, sollte die Inanspruchnahme neuer Flächen deutlich moderater ausgestaltet werden, als in den Extremszenarien modelliert. Weiterhin sind Technologien, die auf heimischen Rohstoffen basieren, aus „weichen“ Gründen (Risiken für Biologische Vielfalt und Boden, Handhabbarkeit) zu bevorzugen. Beim Ausbau dieser Technologien ist insbesondere auf indirekte Effekte zu achten, die im Rahmen dieses Vorhabens nur grob abgeschätzt werden konnten. Parallel sollten Nachhaltigkeitsstandards für flüssige Bioenergieträger, die in den letzten Jahren etabliert wurden, im internationalen Kontext weiter erprobt und in geeigneter Weise auf andere Biomassesektoren ausgeweitet werden. Als erster Schritt sollten hier die Nachhaltigkeitsstandards auch verbindlich auf gasförmige und feste Bioenergieträger ausgeweitet und Definitionen einer guten fachlichen Praxis / Nachhaltigkeitsanforderungen in der Forstwirtschaft sowie für Wälder mit großer biologischer Vielfalt erarbeitet werden.

#### **Aus den Extremszenarien lassen sich Elemente für eine Bioenergiestrategie ableiten.**

Wärmeerzeugung aus Holz stellt derzeit in Deutschland, Europa und weltweit die wichtigste Bioenergiequelle dar. Ziel der vier Extremszenarien war die Pfadüberprüfung hin zu hochwertigeren Technologiepfaden. Die anhand der Preiserwartungen ermittelten Szenarien ergeben deutlich, dass ohne sektorale Vorgaben die betrachteten Technologiepfade zur Nutzung von heimischem oder importiertem Holz als Strom oder als Kraftstoff erst in der Mittelfristperspektive einen (eher kleineren) Stellenwert erreichen können; dann jedoch nicht als Einsatzstoff für Flüssigkraftstoffe, sondern im Bereich kleinerer oder mittlerer Vergasungstechnologien. Wärmebereitstellung aus holzbasierten Rohstoffen könnte damit deutlich länger einen relevanten Stellenwert erhalten. Die errechneten Szenarien sind damit mit der aktuellen und erwarteten Rohstoffverfügbarkeit (z. B. MAJER et al., 2013; MANTAU 2012; THRÄN et al., 2011) nur eingeschränkt kompatibel.

#### **Als wichtige Elemente für eine Bioenergiestrategie werden identifiziert:**

- Für den weiteren Ausbau der Reststoffnutzung bestehen noch Potenziale im land- und forstwirtschaftlichen Bereich. Unter den bisher noch nicht marktfähigen Kraftstoffen könnte die Bereitstellung von Ethanol aus (heimischem) Stroh mittelfristig den Markteintritt erreichen. Allerdings schneidet diese Nutzung im Vergleich zu einer möglichen Strom- und Wärmeergewinnung aus Stroh aus Umweltschutzsicht schlechter ab (KELLER et al. 2014).

- Zusätzliche Nachfrage nach Bioenergie aus Energiepflanzen führt zu direkten und indirekten Landnutzungsänderungen, welche wiederum Kohlenstoffbestandsänderungen zur Folge haben, aus denen Treibhausgasemissionen resultieren. Die Ermittlung dieser Effekte ist komplex und eine detaillierte Analyse derselben geht weit über den Rahmen dieser Untersuchung hinaus. Jedoch konnte auch hier gezeigt werden, dass – in Abhängigkeit der Methode – die Gesamt-Treibhausgasreduktion durch Bioenergieeinsatz (gegenüber dem Einsatz fossiler Energieträger) aufgrund von Landnutzungsänderungen teilweise nur gering bis nicht vorliegend sein kann. Eine künftige Bioenergiestrategie bedarf einer robusten Berechnung und Verfolgung dieser Effekte – nicht nur für Bioenergie, sondern auch für andere Biomasse-Nutzungsformen. Das Monitoring von Landnutzung, Landnutzungsänderungen und den damit verbundenen Kohlenstoffhaushalten und Treibhausgaswirkungen ist eine wichtige Voraussetzung – nicht nur für die Bioenergiepolitik, sondern auch für die Weiterentwicklung der Bioökonomie insgesamt. Solange diese nicht gegeben ist, sollte die Bioenergienutzung vor allem qualitativ verbessert und im Bereich der Energiepflanzen nur sehr moderat ausgebaut werden. Diese Schlussfolgerung ergibt sich auch aus den ermittelten anderen Umweltwirkungen wie Feinstaubbelastung, Versauerung und Nährstoffeintrag, welche durch Bioenergieeinsatz teilweise steigen. Durch geeignete Rahmenvorgaben – idealerweise für die Biomassennutzung als Ganzes<sup>24</sup> – sollte daher sichergestellt werden, dass der Umbau des Energiesystems nicht zu einer Erhöhung von Umweltlasten führt. Neben der Erreichung der Klimaschutzziele sollte insbesondere auch die Erreichung der gesteckten Zielvorgaben im Bereich Wasser-, Boden- und Luftreinhaltung (z. B. Wasserrahmenrichtlinie [WRRL, 2000/60/EG, 2000] oder Richtlinie über nationale Emissionshöchst-mengen für bestimmte Luftschadstoffe [NEC, 2001/81/EG, 2001]) sowie der nachhaltigen Ressourcennutzung (z. B. Kreislaufwirtschaft) sichergestellt werden.
- Deutschland sollte eine effiziente inländische Bioenergieproduktion – ob im Kraftstoffsektor mit Biomethan oder im Strom- und Wärmebereich mit Biogas – einer Importstrategie von teilweise weniger effizienten Biokraftstoffen vorziehen, da hierdurch weltweit mit geringeren Risiken für die Biologische Vielfalt und Boden zu rechnen ist. Die indirekten Effekte, die aus der Verdrängung anderer Ackerkulturen durch Biogassubstrate resultieren, konnten jedoch nur grob abgeschätzt werden (z. B. unter der Annahme, dass nur Weizen verdrängt wird) und könnten in der Realität evtl. deutlich höher ausfallen. Dies sollte bei einer Strategieentwicklung berücksichtigt werden.
- Die Wärmebereitstellung auf der Basis von Holz stellt auch mittel- bis langfristig eine robuste Bioenergieoption dar. Sie sollte unter Beachtung regionaler Bereitstellungsstrukturen, Emissionsanforderungen und Nutzerpräferenzen schrittweise weiterentwickelt werden. Durch die Markteinführung von Ver-

<sup>24</sup> Der Energiepflanzenanbau unterscheidet sich nicht systemimmanent vom Anbau anderer landwirtschaftlicher Kulturen für Nahrungs- und Futtermittel.

- gasungstechnologien sollte Deutschland die holzbasierte Wärmeversorgung hin zu einer kombinierten Strom- und Wärmeversorgung (kleinere und mittlere Einheiten) entwickeln.
- Temporär kann – bei hohen CO<sub>2</sub>-Preisen - eine marktgetriebene Nachfrage nach (vorwiegend Import-)Holz zur Mitverbrennung in Kohlekraftwerken entstehen (IEA-ETSAP & IRENA 2013; VOGEL et al. 2011). Vor dem Hintergrund der höheren Risiken bei importierten Rohstoffen, der zeitlichen Begrenztheit des Einsatzes (unter der Annahme, dass Kohlekraftwerke mittelfristig eine stark rückläufige Bedeutung bei der Strombereitstellung haben) und des andererseits im relevanten Zeitraum aber sehr großen Mengennachfragepotenzials ist die Mitverbrennung von Holz in Kohlekraftwerken ein Bereich, der frühzeitig einer klaren Strategie hinsichtlich angestrebter Mengen und Importanteile bedarf. Nachhaltigkeitsanforderungen an Festbrennstoffe können hier Leitplanken für den Einsatz bei hohen CO<sub>2</sub>-Preisen bilden.
  - Deutschland sollte eine Post-EEG-Strategie für Biogas- und Biomethananlagen entwickeln. Notwendig ist hierzu eine detaillierte Analyse des Anlagenbestands bezüglich des Vorhandenseins sinnvoller Wärmesenken für den KWK-Betrieb bzw. der infrastrukturellen Möglichkeiten zur Umrüstung von Biogas- zu Biomethananlagen (z. B. Nähe zum bestehenden Erdgasnetz) sowie einer sektoralen Analyse, in welchen Mobilitätsbereichen Biomethan künftig genutzt werden soll.
  - Eine Bioenergiestrategie muss eng mit der Landwirtschaft abgestimmt sein. Dies umfasst den künftigen Stellenwert der Produktion und des Einsatzes von Energiepflanzen, aber auch den sektoralen Einsatz von Pflanzenöl / Biodiesel / Biomethan als Kraftstoff.
  - Biodiesel ist ein günstiger, flüssiger Bioenergieträger, der jedoch vergleichsweise wenig Innovationspotenzial aufweist. Hier sollten die vorhandenen Produktionskapazitäten nicht weiter erhöht werden – jedoch auch kurzfristig nicht reduziert, weil die Kraftstoffbereitstellung wichtige Nebenprodukte liefert (Futtermittel und Glycerin) und die Frage des Umfangs und der Notwendigkeit von flüssigen Bioenergieträgern für eine nachhaltige Energiewende noch nicht geklärt ist (siehe nächster Punkt).
  - Ein offener Punkt bleibt: die gezielte Entwicklung hochwertiger, flüssiger Bioenergieträger für ausgewählte Anwendungsfelder (z. B. Flugkraftstoff). Dies ist vom Langfristziel her zu entwickeln. Für BTL-Kraftstoffe bedarf es daher einer konsequenten Unterstützung, sowohl durch F&E-Maßnahmen als auch durch Markteinführungsinstrumente, weil solche Kraftstoffe in allen Szenarien deutlich teurer sind als die Alternativen. Für den Verkehrsbereich sind jedoch neben dem Biokraftstoffangebot weitere Aspekte bei der Umstellung hin zu erneuerbaren Energien zu beachten.

Neben den vorwiegend auf die nationale Bioenergiepolitik ausgerichteten Schlussfolgerungen ergeben sich zwei weitere Bereiche auf internationaler Ebene:

- Implementierung ambitionierter nachhaltiger Landnutzungspolitiken
- Überprüfung der internationalen Mengenerwartungen an FT-Kraftstoffen hinsichtlich der angenommenen Einflussgrößen (z. B. Investitionsaufwendungen, Rohstoffpreise, erreichbare Treibhausgasemissionen)

Basierend auf diesen Schlussfolgerungen können die vier Extremszenarien, die dazu dienen, eine gewisse Bandbreite an Entwicklungen und damit Interpretationsspielraum darzustellen, synoptisch interpretiert werden. Abbildung 6-1 fasst dieses für die Bioenergieentwicklung in indikativen Trends für Deutschland bis 2050 zusammen. Sie basiert sowohl auf den Modellierungsergebnissen (Extremszenarien) und ihrer umfänglichen Interpretation, als auch den qualitativ betrachteten Entwicklungen und weiteren aktuellen Studien.

**Potenzialerschließung:** Bis 2030 sollte der Beitrag der Bioenergie an der Energieversorgung, zur Versorgungssicherheit und zur Erreichung der THG-Emissionsminderungsziele auf dem heutigen Niveau (ca. 700 PJ/a Endenergie) stabilisiert sein und danach in Abhängigkeit von Art und Umfang künftiger Landnutzungspolitiken gegebenenfalls moderat steigen. Die gezielte Erschließung von landwirtschaftlichen Reststoffen (z. B. Strohpotenziale für die Ethanolherstellung) und biogenen, kommunalen Abfällen ist insbesondere im regionalen Zusammenhang beziehungsweise der Kreislaufwirtschaft zu realisieren. Durch weitere Effizienzsteigerungen wird der Primärenergieeinsatz an Biomasse relativ zum Energieoutput gesenkt und die Einhaltung der als nachhaltig verfügbar geltenden Potenziale (NITSCH et al., 2012), sowie Potenzialabschätzung in diesem Bericht) auch bei moderater Steigerung der Endenergiebereitstellung aus Biomasse sichergestellt.

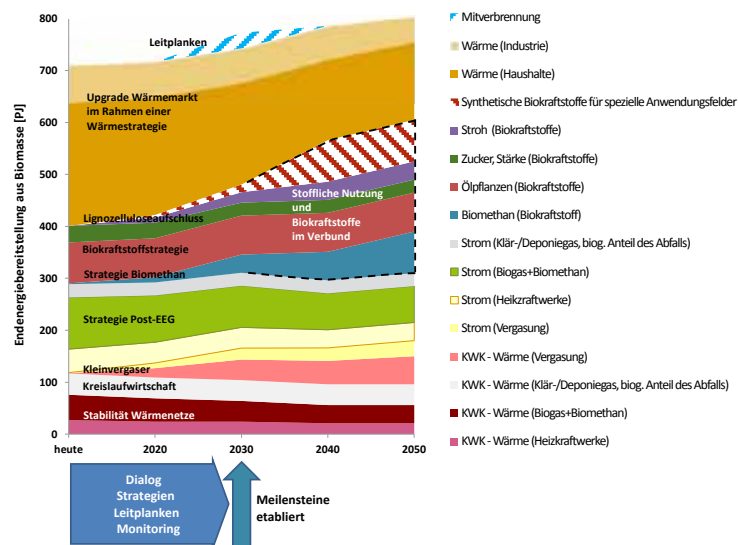


Abbildung 6-1: Indikative Trends der Bioenergie bis zum Jahr 2050 als Synthese des Vorhabens „Meilensteine 2030“

**Nutzungsoptionen:** Die Nutzung von Biomasse zur Energiebereitstellung verändert sich in den verschiedenen Sektoren in unterschiedlichem Maße. Die reine Wärmebereitstellung, insbesondere durch Einzelraumfeuerungen und Wärmenetze, aber auch seitens der Industrie, wird einen relevanten Stellenwert beibehalten. Dies ergibt sich einerseits aus der sehr moderaten Nachfrage nach Holz für innovative Technologien, den gut etablierten regionalen und lokalen Rohstoffversorgungsstrukturen und andererseits aus den bereits getätigten Investitionen in Nahwärmesysteme. Gleichzeitig besteht auch in diesem Bereich die Notwendigkeit der Veränderung, hin zu Effizienzsteigerungen und Emissionsreduktionen. Vergasungstechnologien und ggf. weitere kleine Systeme für die gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung können die notwendigen Innovationen im System liefern. Neben dem Engagement der Entscheidungsträger auf kommunaler Ebene erfordert die biogene Wärmebereitstellung die Unterstützung innerhalb einer nationalen Wärmestrategie.

Klare Signale sind für die Weiterentwicklung der Technologien und Konzepte zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung notwendig, die bisher über das EEG angereizt und realisiert wurden. Hier haben die Untersuchungen gezeigt, dass neben Altholz-basierten Heizkraftwerken insbesondere bedarfsgerecht betriebene Biogasanlagen einen Beitrag für die Stromversorgung leisten können. Für die Realisierung dieser Optionen bedarf es aber einer klaren „Post-EEG“-Strategie, ansonsten wird der bestehende Anlagenpark absehbar deutlich reduziert und die möglichen Systembeiträge bleiben ungenutzt. Parallel bietet ein teilweiser Umbau bestehender Biogas-Vor-Ort-Verstromungsanlagen hin zu Biomethanaufbereitungsanlagen die Möglichkeit einer sehr flexiblen Nutzung sowohl in der Strombereitstellung (mit verpflichtender Nutzung in KWK oder hocheffizienten GuD-Kraftwerken) als auch in der Nutzung als Kraftstoff. Vor diesem Hintergrund sollte Biomethan strategisch (weiter)-entwickelt werden.

Darüber hinaus besteht – u. a. auch wegen des möglichen Einsatzes von Biomethan im Verkehrssektor – die Notwendigkeit einer differenzierten Biokraftstoffstrategie. Diese sollte ebenso eine Stabilität in der Bereitstellung von Biokraftstoffen auf Basis landwirtschaftlicher Rohstoffe berücksichtigen, um angemessen den bestehenden regionalen bzw. dezentralen Strukturen und Synergien zur Futtermittelbereitstellung gerecht zu werden. In der Biokraftstoffstrategie nach 2030 sollten zum einen die dezidierte Nachfrage nach Biokraftstoffen in ausgewählten Anwendungsfeldern (z. B. Flugkraftstoffe, Landwirtschaft), zum anderen die Möglichkeit der Bereitstellung von Biokraftstoffen in gekoppelten Systemen mit der stofflichen Nutzung über die Vorteilhaftigkeit der Kraftstoffoptionen entscheiden. Eine solche Kraftstoffstrategie benötigt aber auf jeden Fall dauerhafte und verlässliche Rahmenbedingungen, um auf dem Markt implementierbar zu sein.

Zusätzlich dürfte es ab 2030 zwischen den Bereichen Strom, Wärme und Kraftstoff, aber auch im Zusammenspiel mit anderen Erneuerbaren Energien zu stärkeren Verschiebungen kommen, die jedoch die hier identifizierten Elemente in ihrer relativen Vorteilhaftigkeit nicht grundsätzlich verändern dürften. Die Option der Mitverbrennung von Holz in Kohlekraftwerken kann bei steigenden CO<sub>2</sub>-Zertifikatpreisen zu einem kurzzeitig ansteigenden Holzverbrauch führen, wenngleich aufgrund niedriger Zertifikatpreise das Risiko hierfür derzeit als gering eingeschätzt wird.

Aus dieser Synopse leiten sich die nachfolgend beschriebenen zehn Meilensteine ab.



## 7 Meilensteine 2030 – Handlungsempfehlungen

Die Bioenergiestrategie wird in den verschiedenen Feldern unterschiedlich schnell umgesetzt. Zehn wichtige Meilensteine, die bis zum Jahr 2030 erreicht sein müssen, sind nachfolgend genannt:

### Meilenstein 1: Nachhaltige Landnutzung ist Voraussetzung.

Voraussetzung für eine nachhaltige Biomassenutzung in 2030 ist die schnelle Definition und Implementierung ambitionierter internationaler Ziele für den Schutz von sensiblen Flächen wie Primärwälder, Torfmoor, Feuchtgebiete, Wälder und Grünland mit großer biologischer Vielfalt, z. B. in einer globalen Schutzgebietskulisse in Anlehnung an die Beschlüsse der Convention on Biological Diversity (CBD). Auf nationaler Ebene erscheint ein wirksamer Schutz von Dauergrünland als sinnvoll. Diese Schutzbestrebungen verändern den Produktionsumfang für landwirtschaftliche Produkte, gehen mit einer Nutzungsintensivierung auf genutzten Flächen einher und weit über die Bioenergienutzung hinaus. Deutschland sollte daher zeitnah international Initiativen ergreifen bzw. bestehende deutlich stärken, die sowohl die nachhaltige Landnutzung als auch Aspekte der zu erwartenden Nutzungsintensivierung umfasst. Instrumente zum Schutz von sensiblen Flächen, die für Biokraftstoffe teilweise implementiert sind, sind auf ihre Übertragbarkeit zu überprüfen.

### Meilenstein 2: Monitoring von Landnutzung, Kohlenstoffinventaren und Treibhausgasemissionen ist im Rahmen der Bioökonomie etabliert.

Hierdurch können die Entwicklung der Treibhausgasemissionen aus Landnutzungsänderungen und ihre Effekte auf die avisierten Ziele im Energiesystem regelmäßig überprüft und die Strategie angepasst werden.

### Meilenstein 3: Entwicklungsstrategie für Biogas / Biomethan (Post-EEG-Strategie) ist implementiert.

Für die bestehenden Biogas- und Biomethananlagen wurde anhand der Anlagencharakteristika eine dezidierte Nutzungsstrategie entwickelt. Diese muss eng mit der Landwirtschaft abgestimmt sein, die zunehmende Nutzung als Kraftstoff berücksichtigen und auf dem aktuellen Anlagenbestand aufbauen. Die nähere Spezifizierung von Biomethan als Kraftstoff ist dafür eine wichtige Voraussetzung (siehe Meilenstein 7). Nach heutigem Kenntnisstand ist bei einer Nutzung von Biomethan als Kraftstoff weniger der weitere Zubau von Biogasanlagen zu verfolgen als vielmehr der zielgerichtete Umbau. Dazu sind die Möglichkeiten der einzelnen Anlagen genauer zu betrachten und für den jeweiligen Einzelfall abzuschätzen,

für welche Anlagen oder Anlagenverbünde eine zusätzliche Aufbereitungsstufe sinnvoll darstellbar ist, wo Flexibilisierung einen längerfristigen Mehrwert liefern kann bzw. wo eine Umrüstung nicht sinnvoll erscheint. Für eine flexible Strombereitstellung auf Basis von Biogas-BHKW ist die Umrüstung bestehender Alt-Anlagen (Flexibilisierung) bis 2030 bereits weitgehend erfolgt.

### Meilenstein 4: Wärmebereitstellung aus Biomasse beinhaltet zunehmend innovative Konzepte („Up-grade Wärmenutzung“) und ist im Rahmen einer Wärmestrategie berücksichtigt.

Die Wärmebereitstellung aus Biomasse stellt eine robuste Nutzungsoption dar. Sie bedarf aber der stetigen Weiterentwicklung im Sinne der künftigen Bedarfsstrukturen (geringerer spezifischer Wärmebedarf, Kombination mit anderen Erneuerbaren, höherer Komfortanspruch), Emissionsanforderungen und einer Erweiterung hin zu Kraft-Wärme-Kälte-gekoppelten Systemen (siehe auch Meilenstein 5).

Deutschland braucht in diesem Zusammenhang eine Wärmestrategie, die Bioenergie in Form von Wärmenetzen und KWK-Anlagen mit der Abwärmenutzung aus der Industrie und der Anstrengung hinsichtlich der Energieeinsparung vereint. Mit Hilfe von Instrumenten zur Raumplanung und zur Stadtentwicklungsplanung (Bauleitplanung) ist in ganz Deutschland ein Wärmekataster unter Berücksichtigung demographischer Effekte zu erstellen. Darin sollten Schwerpunkte für den Bau von hinsichtlich der Energieträger flexiblen, regenerativen Wärmenetzen definiert werden.

### Meilenstein 5: Vergasungstechnologien sind verfügbar.

Durch Markteinführungsprogramme und gezielte Forschung ist der Übergang von der reinen Wärme- zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung (siehe Meilenstein 4) zu unterstützen. Diese Technologien können ein sehr hohes Exportpotenzial aufweisen. Dies gilt bei entsprechender Nachfrage grundsätzlich auch für Bio-SNG.

### Meilenstein 6: Leitplanken für die Mitverbrennung von Holz sind gesetzt.

Bei höheren CO<sub>2</sub>-Preisen würden größere Mengen Holz aus wirtschaftlichen Gründen in Kohlekraftwerken mitverbrannt werden. Um auf diese Nutzungsoption bezüglich deren Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit steuernd Einfluss nehmen zu können, sind hier entsprechend frühzeitig Rahmenbedingungen zu schaffen. Hierzu gehört die Einführung und Umsetzung adäquater Nachhaltigkeitsstandards für Festbrennstoffe auf nationaler Ebene. Langfristig sinkt die Bedeutung der Mitverbrennung bei sinkendem Kohlestromanteil.

### Meilenstein 7: Differenzierte Biokraftstoffstrategie ist implementiert.

Im Verkehrssektor wird es Teilbereiche geben, in denen die Biokraftstoffnutzung langfristig einen effizienten Beitrag zum Klimaschutz leistet. Diese zu identifizieren und mit robusten Langfriststrategien, auch mit Blick auf den systematischen Einsatz nachhaltiger Rohstoffe und insbesondere Reststoffe zu untersetzen ist notwendig, da sich die sogenannten neuen Technologien (z. B. auf Basis von Lignozellulose) absehbar nicht ohne langfristige und gezielte Unterstützung am Markt etablieren können. Eckpfeiler für eine Biokraftstoffstrategie sind (i) eine klare Zielhierarchie, was mit dem Einsatz von Biokraftstoffen erreicht werden soll, (ii) die darauf aufbauende Identifikation von prioritären Einsatzbereichen, (iii) die technisch-ökonomische-ökologische Analyse von Möglichkeiten der gekoppelten Produktion von Biokraftstoffen und anderen biobasierten Produkten, (iv) die Einbettung in eine übergeordnete Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie und die Etablierung eines entsprechenden regulatorischen Umfeldes.

### Meilenstein 8: Lignozelluloseaufschluss von Stroh ist im Markt etabliert und hinsichtlich der Nutzungsoptionen priorisiert.

Lignozelluloseaufschluss bietet vielfältige Nutzungsoptionen von Stroh und anderen Reststoffen. Hierzu ist die Flankierung entsprechender F&E-Aktivitäten notwendig. Der Einsatz von Stroh im Rahmen künftiger Kraftstoffstrategien ist anhand detaillierter Analysen bewertet. Die Bereitstellung sollte auf der deutschen und europäischen Rohstoffbasis basieren. Eine inländische Produktion sowie Importe von Ethanol aus Reststoffen bedürfen umfassender Leitplanken für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit.

### Meilenstein 9: Umgang mit Abfällen innerhalb der Kreislaufwirtschaft ist geklärt.

Die Erschließung und bestmögliche Nutzung bzw. Verwertung von kommunalen Abfällen (insb. Bioabfall, Altholz, Klärschlamm) bedarf im Sinne der Kreislaufwirtschaft der weiteren Unterstützung und gesetzgeberischer Lenkung. Mit Blick auf effiziente energetische Abfall-Verwertungssysteme unter besonderer Berücksichtigung der Bioökonomie und Kaskadenprozesse sind angepasste Infrastrukturen zur weitestgehend sortenreinen Erfassung und Nutzung entsprechender Biomasse-Sortimente einzurichten.

### Meilenstein 10: Bioenergie im Verbund etablieren.

Die Nutzung von Bioenergie stellt einen Baustein für den Übergang in eine zunehmend auf erneuerbaren Ressourcen basierenden Wirtschaft dar. Um diese große Aufgabe erfolgreich zu realisieren, werden Verbundkonzepte immer wichtiger. Dazu zählt zum einen die enge Verzahnung mit der Landwirtschaft, zum anderen die Weiterentwicklung von gekoppelten stofflichen und energetischen Konzepten, sowohl im Bereich der Holznutzung als auch bei Agrarprodukten und deren Verarbeitung und Nutzung, aber auch die Notwendigkeit eines umfassend schonenden Umgangs mit den begrenzten Ressourcen. Es wird auch empfohlen, dass ein hohes Engagement von Seiten der Politik, u. a. in Deutschland, ergriffen werden sollte, um den globalen Hunger zu bekämpfen und hierzu auch positive Fallbeispiele für Bioenergie und Ernährungssicherung zu implementieren. Schließlich ist die zunehmende Verbindung von stofflicher und energetischer Nutzung ein wichtiges Element, insbesondere um zu einer effizienten Reststoffnutzung zu kommen. Dieser Prozess ist jedoch fortlaufend und kann bis 2030 nur einen Zwischenstand erreichen.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Die 4 Szenarien (KS-BAU, KS-N, SW-BAU, SW-N) im Projekt „Meilensteine 2030“	13
Abbildung 1-2: Indikative Trends der Bioenergie bis zum Jahr 2050 als Synthese des Vorhabens „Meilensteine 2030“	30
Abbildung 2-1: Nutzung und kurzfristig erwartete Potenziale zur Bioenergiebereitstellung in Deutschland	35
Abbildung 3-1: Übersicht über die Modelle (durchgezogene Rahmenlinien) und Module zur Folgenabschätzung (gestrichelte Rahmenlinien) sowie deren Schnittstellen im Projektverbund „Meilensteine 2030“	38
Abbildung 4-1: Die 4 Szenarien im Projekt „Meilensteine 2030“ (KS-BAU, KS-N, SW-BAU, SW-N)	44
Abbildung 4-2: Unterstellte Entwicklung des Primärenergieeinsatzes an Biomasse der Bestandsanlagen (PE-Einsatz Bestand) und des für die Modellierung verbleibenden, maximalen Biomasseangebotes in Deutschland	44
Abbildung 5-1: Entwicklung des Anlageparks im Szenario KS-BAU	46
Abbildung 5-2: Entwicklung des Anlageparks im Szenario KS-N	47
Abbildung 5-3: Entwicklung des Anlageparks im Szenario SW-BAU	48
Abbildung 5-4: Entwicklung des Anlageparks im Szenario SW-N	49
Abbildung 5-5: Darstellung der in BENSIM modellierten Basisszenarien und des KS-BAU-B-Szenarios für den Kraftstoffsektor	51
Abbildung 5-6: Darstellung der in BENSIM modellierten Basisszenarien für den Strom- / Wärme-Sektor	51
Abbildung 5-7: Einfluss der Volllaststunden (VLH) auf die Strom- / Wärme-Szenarien	52
Abbildung 5-8: Einfluss von konstanten Holzpreisen auf die Kraftstoffszenarien	53
Abbildung 5-9: Einfluss von konstanten Holzpreisen auf die Strom- / Wärme-Szenarien	54
Abbildung 5-10: Entwicklung des weltweiten BIP bis 2050	57
Abbildung 5-11: Entwicklung der Weltmarktpreise für Rohöl, Gas und Kohle	58
Abbildung 5-12: Globale Nachfragemenge an 1. Generation Biokraftstoff in PJ	58
Abbildung 5-13: Weltweite Produktion in Mio. Tonnen im KS-BAU-Szenario für ausgewählte Kulturen	60
Abbildung 5-14: Durchschnittliche reale Preisentwicklung weltweit im KS-BAU-Szenario für ausgewählte Agrarprodukte als Index mit 2007=1	60
Abbildung 5-15: Globaler Konsum von Ölsaaten (Millionen Tonnen) nach Endverwendung im Szenario KS-BAU	61
Abbildung 5-16: Produktion in Deutschland in Mio. Tonnen im KS-BAU-Szenario für ausgewählte Kulturen	62
Abbildung 5-17: Reale Preisentwicklung in Deutschland für ausgewählter Agrarprodukte	62
Abbildung 5-18: Konsum von Ölsaaten (Millionen Tonnen) in Deutschland nach Endverwendung	63
Abbildung 5-19: Pflanzenölimporte nach Deutschland in Mrd. US\$ zu konstanten Preisen 2007	63

Abbildung 5-20: Herkunft von Ölsaaten (für Biodiesel)	64
Abbildung 5-21: Prozentuale Änderung in 2050 der Produktion von bestimmten Agrarrohstoffen in Deutschland (links) und weltweit (rechts) zwischen den Szenarien und dem KS-BAU-Szenario	65
Abbildung 5-22: Prozentuale Änderung in 2050 der Preise von bestimmten Agrarrohstoffen in Deutschland (links) und weltweit (rechts) zwischen den Szenarien und dem KS-BAU-Szenario	65
Abbildung 5-23: Prozentuale Produktionsänderungen in 2050 der Szenarien im Vergleich zum KS-BAU Szenario für ausgewählte Produkte und Regionen	67
Abbildung 5-24: Globale Ackerfläche (inkl. Biokraftstoffen) in Mrd. ha für die vier Szenarien	69
Abbildung 5-25: Globale Landnutzung im Jahr 2050 für das KS-BAU-Szenario	70
Abbildung 5-26: Globale Landnutzung im Jahr 2050 für das KS-N-Szenario	71
Abbildung 5-27: Landnutzung in Deutschland für das KS-BAU-Szenario (links, oben) und das KS-N- (rechts, oben) sowie das SW-BAU-Szenario (links, unten) und das SW-N-Szenario (rechts, unten) für das Jahr 2050	73
Abbildung 5-28: Prozentuale Flächenänderungen in 2050 der Sensitivitätsszenarien aus MAGNET (Kap. 5.2.4) im Vergleich zum KS-BAU-Szenario für ausgewählte Produkte und Regionen	76
Abbildung 5-29: Umweltwirkungen der fossilen und biogenen Energiebereitstellung (ohne Landnutzungsänderungen) sowie Endenergie aus fossilen und biogenen Energieträgern in den 4 Szenarien 2010, 2030 und 2050	80
Abbildung 5-30: Umweltwirkungen der Energiebereitstellung bei normierter Endenergie	82
Abbildung 5-31: Treibhauseffekt, Versauerung und Feinstaubbelastung bei normierter Endenergie	86
Abbildung 5-32: Flächenbelegung durch Bioenergieträger sowie deren Treibhauseffekt aus Bereitstellung, Nutzung und Flächennutzungsänderungen in den zwei Biokraftstoffszenarien bei normierter Endenergie	90
Abbildung 5-33: Umweltwirkungen in den beiden BAU-B-Szenarien bei ausgeglichener Endenergie (Summen aus biogener und fossiler Endenergie identisch) im Vergleich zu den BAU-Szenarien 2010, 2030 und 2050	92
Abbildung 5-34: Umweltwirkungen bei Bilanzierung mit dem residualen fossilen Mix (jeweils linker Balken der Balkenpaare) gegenüber der Bilanzierung mit dem Grenzmix (rechter Balken) bei ausgeglichener Endenergie	94
Abbildung 5-35: Globale Flächennutzung von Flächen mit niedrigem, mittlerem und hohem Risiko für die Biologische Vielfalt durch Feldfrüchte, die für Biokraftstoffe genutzt werden können (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N).	100
Abbildung 5-36: Annahme OHNE-RED – Nutzung von Flächen mit niedrigem, mittlerem und hohem Risiko für die Biologische Vielfalt (global und Deutschland) für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N)	102
Abbildung 5-37: Analyse möglicher Verdrängungseffekte ins Ausland durch die Flächenbelegung für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N).	103

Abbildung 5-38: MIT-RED – Nutzung von Flächen mit niedrigem, mittlerem und hohem Risiko für die Biologische Vielfalt (global und Deutschland) für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N)	104
Abbildung 5-39: Annahme OHNE-RED – Verteilung der Länder, in denen ehemals genutztem Grünland für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland genutzt werden (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N).	105
Abbildung 5-40: Annahme OHNE-RED – Verteilung der Länder, in denen in sensiblen Gebieten (ungenutztes Grünland, Wald, Torfmoor, Primärwald, Schutzgebiet) für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland genutzt werden.	106
Abbildung 5-41: Globale Flächennutzung von Flächen mit guter, mittlerer und schlechter Eignung für eine landwirtschaftliche Nutzung durch Feldfrüchte, die für Biokraftstoffe genutzt werden können (nur Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N).	107
Abbildung 5-42: Nutzung von Flächen mit guter, mittlerer und schlechter Eignung für eine landwirtschaftliche Nutzung (global und Deutschland) für die Rohstoffproduktion zur Herstellung von Biokraftstoffen in Deutschland (Kraftstoff-Szenarien KS-BAU und KS-N).	108
Abbildung 5-43: Entwicklung der „fehlenden Kalorien“ für Länder GHI 10 von 2010 bis 2050	115
Abbildung 5-44: Fehlende Kalorien in Hungerländern (Gesamt)	115
Abbildung 5-45: Entwicklung der fehlenden Menge an Nahrung zur Bedarfsdeckung in den Hungerländern (GHI 10) im Szenario KS-BAU (in PJ)	117
Abbildung 5-46: Anteil der global fehlenden Nahrung in Hungerländer an der Bioenergiemengen in „reichen“ Ländern im Szenario KS-BAU (in Prozent)	117
Abbildung 5-47: Verteilung der global fehlenden Nahrung in Hungerländern auf die 20 Prozent reichsten Ländern anteilig zu ihrem Bioenergienutzung	118
Abbildung 5-48: Sensitivität BIP-Schwellenwert für Deutschland und Entwicklung der Reduzierung bei der Bioenergienachfrage (in PJ)	120
Abbildung 5-49: Vereinfachte Darstellung der Schwerpunkte der Cluster anhand der Bioenergiepotenziale	123
Abbildung 5-50: Vergleich der Szenarien mit der Endenergiebereitstellung	125
Abbildung 5-51: Darstellung des mittleren Strom- und Wärmeverbrauchs in den Clustern	125
Abbildung 5-52: Durchschnittliche Verteilung der Heizungsart in den Wohngebäuden der Cluster	126
Abbildung 5-53: Endenergieverbrauch biogener Festbrennstoffe im Wärmebereich von 1990 – 2011	132
Abbildung 5-54: Disaggregierter Primärenergiebedarf in Deutschland im Jahr 2010 und in den vier Szenarien 2050	138
Abbildung 5-55: Herfindahl-Index für das Jahr 2010 und die vier Szenarien 2050	138
Abbildung 6-1: Indikative Trends der Bioenergie bis zum Jahr 2050 als Synthese des Vorhabens „Meilensteine 2030“	146

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: 20 Konversionspfade im Vorhaben „Meilensteine 2030“	12
Tabelle 1-2: Übersicht über die Modellergebnisse im Zeitverlauf	24
Tabelle 3-1: 20 Konversionspfade im Vorhaben „Meilensteine 2030“	39
Tabelle 5-1: Maximale frei verfügbare Agrarfläche in Deutschland in Mio. ha für die 4 Szenarien	59
Tabelle 5-2: Deutsche Nachfrage nach erster Generation Biokraftstoffen in PJ.	59
Tabelle 5-3: Durchschnittliche jährliche Ertragssteigerungen für bestimmte Ackerkulturen in Deutschland und global in Prozent zwischen 2010-2050 für alle Szenarien	66
Tabelle 5-4: Prozentuale Preisänderungen in 2050 der Szenarien im Vergleich zum KS-BAU-Szenario für ausgewählte Produkte, Boden und Regionen.	67
Tabelle 5-5: Globale Flächennutzung für das KS-BAU-Szenario in Mrd. ha	71
Tabelle 5-6: Globale Flächennutzung für das SW-BAU-Szenario in Mrd. ha	71
Tabelle 5-7: Globale Flächennutzung für das KS-N-Szenario in Mrd. ha	71
Tabelle 5-8: Globale Flächennutzung für das SW-N-Szenario in Mrd. ha	71
Tabelle 5-9: Flächennutzung in Millionen ha in Deutschland für das KS-BAU-Szenario	74
Tabelle 5-10: Flächennutzung in Millionen ha in Deutschland für das KS-N-Szenario	74
Tabelle 5-11: Flächennutzung in Millionen ha in Deutschland für das SW-BAU-Szenario	74
Tabelle 5-12: Flächennutzung in Millionen ha in Deutschland für das SW-N-Szenario	74
Tabelle 5-13: Entwicklung der gesamten Endenergie, der nicht-biogenen erneuerbaren sowie der biogenen und fossilen Energieträger (ET) in Petajoule (PJ) pro Jahr	79
Tabelle 5-14: Bewertungsskala GHI	113
Tabelle 5-15: Länder / Länderaggregate mit GHI > 10 von 2010 bis 2050 (KS-BAU).	114
Tabelle 5-16: Länder mit hohem BIP / Kopf (obere 20 %; KS-BAU)	116
Tabelle 5-17: Eckdaten zu den Clustern	122
Tabelle 5-18: Kommunal adaptierte Technologien mit maximalen Leistungswerten	124
Tabelle 5-19: Bioenergieanlagen zur Strombereitstellung bis 2050 im Szenario KS-BAU	127
Tabelle 5-20: Bioenergieanlagen zur Wärmebereitstellung bis 2050 im Szenario KS-BAU	127
Tabelle 5-21: Bioenergieanlagen zur Strombereitstellung bis 2050 im Szenario SW-BAU	129
Tabelle 5-22: Bioenergieanlagen zur Wärmebereitstellung bis 2050 im Szenario SW-BAU	130
Tabelle 5-23: Deutsche Importpotenziale für nachhaltig bereitgestellte Bioenergeträger	136

## Literatur- und Referenzverzeichnis

2001/81/EG (2001): Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchstmenge für bestimmte Luftschadstoffe. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft. L309/22. 27.11.2001.

2009/28/EG (2009): Richtlinie 2009/28/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG.

AGEE-Stat (Hrsg.) (2013): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland.

Alcamo, J.; Schaldach, R.; Koch, J.; Koelking, C.; Lapola, D.; Priess, J. (2011): Evaluation of an integrated land use change model including a scenario analysis of land use change for continental Africa. In: Environmental Modelling & Software. Bd. 26 (Nr. 8). S. 1017–1027. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.03.002. ISSN 1364-8152.

Barzantny, K.; Achner, S.; Vomberg, S. (2009): Klimaschutz: Plan B 2050 Energiekonzept für Deutschland (Langfassung). Greenpeace e.V./Eutech Energie und Management GmbH.

Baur, F. (2010): Effiziente Nutzung von Biomasse – Reststoffe, Nutzungskonkurrenzen und Kaskadennutzung. Institut für ZukunftsEnergieSysteme/ForschungsVerbund Erneuerbare Energien, Saarbrücken.

Bezama, A.; Hildebrandt, J. (2014): Auswertung/Diskussion für Kaskadennutzung: Entwurfsskizze für „Meilensteine 2030“ (unveröffentlicht).

BioÖkonomierat, F.T.B. (BÖR) (2012): Nachhaltige Nutzung von Bioenergie Empfehlungen des BioÖkonomieRats. Berlin.

BMELV (Hrsg.) (2014): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2013. Landwirtschaftsvlg Münster. Münster, Westf. ISBN 9783784353258 3784353258.

BMU (Hrsg.) (2009): Leitszenario 2009 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland. BMU. Berlin.

BMVBS (Hrsg.) (2010): Globale und regionale Verteilung von Biomassepotenzialen. Status-quo und Möglichkeiten der Präzisierung. BMVBS.

BMVBS (Hrsg.) (2013a): Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

BMVBS (Hrsg.) (2013b): Fachdialog zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) - Dokumentation.

Bondeau, A.; Smith, P.C.; Zaehle, S.; Schaphoff, S.; Lucht, W.; Cramer, W.; Gerten, D.; Lotze-Campen, H.; Mueller, C.; Reichstein, M.; Smith, B. (2007): Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. In: Global Change Biology. Bd. 13 (Nr. 3). S. 679–706. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01305.x. ISSN 1354-1013.

British Petroleum (2014): BP Energy Outlook 2035.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Referat Bioökonomie (2010): Nationale Forschungsstrategie Bioökonomie 2030 Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft. Berlin.

C.A.R.M.E.N. e.V. (2014): C.A.R.M.E.N. - Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln - der Energieholz-Index. Abgerufen am 04.03.2014 von <http://www.carmen-ev.de/infotehke/preisindizes/hackschnitzel/jahresmittelwerte/226-preisentwicklung-bei-waldhackschnitzeln-der-energieholz-index>

CFS (2012): Voluntary Guidelines on the Responsible Governance of Tenure of Land, Fisheries and Forests in the Context of National Food Security. Rome.

Chum, H.; Faaij, A.; Moreira, J.; Berndes, G.; Dhamija, P.; Dong, H.; Gabrielle, B.; Goss Eng, A.; Wolfgang Lucht; Mapako, M.; Maser Cerutti, O.; McIntyre, T.; Minowa, T.; Pingoud, K. (2011): Bioenergy. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge/ New York.

Cornelissen, S.; Koper, M.; Deng, Y.Y. (2012): The role of bioenergy in a fully sustainable global energy system. In: Biomass and Bioenergy. Bd. 41. S. 21–33. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.12.049. ISSN 0961-9534.

Dauber, J.; Brown, C.; Fernando, A.L.; Finnan, J.; Krasuska, E.; Ponitka, J.; Styles, D.; Thrän, D.; Van Groenigen, K.J.; Zah, R. (2012): Bioenergy from “surplus” land: environmental and socio-economic implications. In: BIORISK – Biodiversity and Ecosystem Risk Assessment. Bd. 7. S. 5–50. doi: 10.3897/biorisk.7.3036. ISSN 1313-2652, 1313-2644.

dena (2010): Erdgas und Biomethan im künftigen Kraftstoffmix. Deutsche Energie-Agentur GmbH.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2006): DIN EN ISO 14040 (Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen) & DIN EN ISO 14044 (Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen). Beuth. Berlin.

Eastman, J.R.; Jin, W.; Kyem, P.A.K.; Toledano, J. (1995): Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Bd. 61 (Nr. 5). S. 539–547.

EEA (2013): EU bioenergy potential from a resource efficiency perspective. EEA Report Nr. 6/2013. European Environment Agency. Copenhagen.

Europäische Kommission (2010): Mitteilung der Kommission zur praktischen Umsetzung des EU-Nachhaltigkeitskonzepts für Biokraftstoffe und flüssige Biobrennstoffe sowie zu den Berechnungsregeln für Biokraftstoffe. Amtsblatt der Europäischen Union. C160/8. 19.6.2010.

Europäische Kommission (2012): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (von der Kommission vorgelegt). KOM(2008) 30 endgültig - SEK(2008) 57 - SEK(2008) 85, Brüssel.

Europäisches Komitee für Normung (2013): Nachhaltigkeitskriterien für die Herstellung von Biokraftstoffen und flüssigen Biobrennstoffen für Energieanwendungen - Grundsätze, Kriterien, Indikatoren und Prüfer - Teil 4: Berechnungsmethoden der Treibhausgasemissionsbilanz unter Verwendung einer Ökobilanz. EN 16214-4:2013.

European Commission (Hrsg.) (2013): EU Energy, transport and GHG emissions trends to 2050. ISBN 978-92-79-33728-4.

FAO (2008): Food Security Information for Action - Practical Guides. An Introduction to the Basic Concepts of Food Security.

FAO (2013): FAOSTAT Datenbank.

Franke, B.; Reinhard, G.; Malavelle, G.; Faji, A.; Fritsche, U. (2013): Global Assessment Guidelines for Sustainable Liquid Biofuels Production in Developing Countries; GEF Targeted Research Project executed by UNEP/FAO/UNIDO. Heidelberg, Utrecht, Darmstadt.

Ecoinvent (2010): ecoinvent data v2.2 – Ökoinventare für Energiesysteme, ESU-services, Uster (Schweiz).

Fritsche, U.; Fehrenbach, H.; Köppen, S. (2012): Nach Super E10: Welche Rolle für Biokraftstoffe? - Fakten, Trends und Perspektiven. Shell Deutschland Oil. Darmstadt, Heidelberg, Hamburg.

Fritsche, U.; Gress, H.W.; Iriarte, L. (2014): Possibilities of sustainable woody bioenergy trade and impacts on developing countries - summary report; IINAS - International Institute for Sustainability Analysis and Strategy. Darmstadt, Madrid.



- Fritsche, U.; Iriarte, L.; de Jong, J.; van Thuijl, E.; Lammers, E.; Agostini, A.; Scarlat, N. (2012): Outcome paper: Sustainability Criteria and Indicators for Solid Bioenergy from Forests based on the Joint Workshops on Extending the RED Sustainability Requirements to Solid Bioenergy. Darmstadt.
- Fritsche, U.; Iriarte, L. (2014): Sustainability Criteria and Indicators for the Bio-Based Economy in Europe: State of Discussion and Way Forward. In: *Energies*. Bd. 7 (Nr. 11). S. 6825–6836. doi: 10.3390/en7116825.
- Fritsche, U.; Iriarte, L.; de Jong, J.; Agostini, A.; Scarlat, N. (2014): Extending the EU Renewable Energy Directive sustainability criteria to solid bioenergy from forests. In: *Natural Resources Forum*. Bd. 38 (Nr. 2). S. 129–140. doi: 10.1111/1477-8947.12042. ISSN 1477-8947.
- Gärtner, S.; Cornelius, C.; Müller-Lindenlauf, M. (2014): Ansätze zu den Entwicklungen in der Landwirtschaft. Erläuterung der Ökobilanzdaten für die Bereitstellung von Biomasse bis zum Jahr 2050. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH.
- Gärtner, S.; Hienz, G.; Keller, H.; Müller-Lindenlauf, M. (2013): Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz – Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich. IFEU. Heidelberg.
- GBEP (2011): The Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy. Global Bioenergy Partnership (GBEP), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome.
- GEA (2012): Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future. Cambridge, New York, Laxenburg.
- Geneletti, D. (2004): A GIS-based decision support system to identify nature conservation priorities in an alpine valley. In: *Land Use Policy*. Bd. 21 (Nr. 2). doi: 10.1016/j.landusepol.2003.09.005. ISSN 0264-8377.
- Gömann, H.; Witte, T. de; Peter, G.; Tietz, A. (2013): Auswirkungen der Biogaserzeugung auf die Landwirtschaft. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig. ISBN 978-3-86576-115-6.
- Von Grebmer, K.; Headey, D.; Béné, C.; Haddad, L.; Olofinbiyi, T.; Wiesmann, D.; Fritschel, H.; Yin, S.; Yohannes, Y.; Foley, C.; von Oppeln, C.; Iseli, B. (2013): Global Hunger Index 2013. Welthungerhilfe, International Food Policy Research Institute and Concern Worldwide. Bonn, Washington, Dublin. ISBN 978-089629-951-1.
- Von Grebmer, K.; Saltzman, A.; Birol, E.; Wiesmann, D.; Prasai, N.; Yin, S.; Yohannes, Y.; Menon, P.; Thompson, J.; Sonntag, A. (2014): Welthunger Index: Herausforderung verborgener Hunger. Welthungerhilfe, International Food Policy Research Institute and Concern Worldwide. Bonn, Washington, Dublin.
- Groom, M.J.; Meffe, G.K.; Carroll, C.R. (2006): *Principles of Conservation Biology*. 3 edition. Sinauer Associates. Sunderland, Mass. ISBN 9780878935185.
- Gruber, P.; Hauser, M. (2011): Nachhaltige Ernährungssicherung bei sich verändernden klimatischen Bedingungen. Grundlagenpapier für strategische Überlegungen. Deutsche Welthungerhilfe.
- Grübler, A. (1998): *Technology and global change*. Cambridge University Press. Cambridge (England); New York, N.Y. ISBN 0521591090.
- Hamelinck, C. (2013): Biofuels and Food Security. Risks and Opportunities. *Ecofys by Order of ePure*.
- Hanson, C. (2013): Food Security, Inclusive Growth, Sustainability, and the Post 2015 Development Agenda. Background Paper submission to the Bali High Level Panel Meeting. World Resources Institute.
- HLPE (2013): Biofuels and Food Security. A zero-draft consultation paper.
- IEA-ETSAP; IRENA (2013): Biomass Co-firing - Technology Brief; IEA-ETSAP and IRENA Technology Brief E21.
- IEA (Hrsg.) (2011): Technology Roadmap - Biofuels for Transport. International Energy Agency. Paris.

- IEA (Hrsg.) (2012): *Energy Technology Perspectives 2012 - Pathways to a Clean Energy System*. International Energy Agency. Paris.
- IEA (Hrsg.) (2012): *Technology Roadmap: Bioenergy for Heat and Power*. International Energy Agency. Paris.
- IEA (Hrsg.) (2013): *Production costs of alternative transportation fuels: Influence of Crude Oil Price and Technology Maturity*.
- IEA (Hrsg.) (2014): *Aktuelle Daten zum WEO 2014* (unveröffentlicht). International Energy Agency.
- IEA (Hrsg.) (2014): *Energy Technology Perspectives 2014 - Harnessing Electricity's Potential (ETP 2014)*. International Energy Agency. ISBN 978-92-64-20800-1.
- IEA/OECD (Hrsg.) (2012): *World Energy Outlook 2012*. International Energy Agency. Paris. ISBN 978 92 64 18084 0.
- IFEU (2014a): eigene Berechnungen, Ableitungen und Expertenschätzungen.
- IFEU (2014b): Ständige Aktualisierungen in der Datenbank der UMBERTO-Software für Ökobilanzierung.
- IINAS (2014): Datenzusammenstellung zu Biokraftstoffen auf Basis der IEA Energy Technology Perspectives 2014 für das Vorhaben „Meilensteine 2030“. Darmstadt.
- IINAS; CENBIO (2014): Possibilities of sustainable wood production, increase in sustainably produced wood energy and the impact on developing and emerging countries.
- Imperial College (2012): *BiomassFutures*; IEE project carried out by Alterra, CRES, ECN, IC, ICCS, IEEP, IIASA, Oeko-Institut.
- Institute of Environmental Sciences (2004): *CML's impact assessment methods and characterisation factors*. Department of Industrial Ecology, Leiden.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): *Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge; New York. ISBN 9780521880091.
- International Monetary Fund (2014): *IMF Primary Commodity Prices - Montly Data*. Abgerufen am 04.03.2014 von <http://www.imf.org/external/np/res/commmod/index.aspx>
- IZES; Fraunhofer UMSICHT; Wuppertal Institut (2014): Nachhaltige Integration von Bioenergiesystemen im Kontext einer kommunalen Entscheidungsfindung. Zwischenbericht (Unveröffentlicht). Saarbrücken.
- Keller, H.; Gärtner, S.; Müller-Lindenlauf, M.; Reinhardt, G.; Rettenmaier, N.; Schorb, A.; Bischoff, S. (2014): *Environmental assessment of SUPRABIO biorefineries*. IFEU and IUS. Heidelberg.
- Kirchner, A.; Matthes, F.C. (2009): *Modell Deutschland, Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken*. WWF, Prognos AG, Öko-Institut e.V. Basel, Berlin.
- Kitzler, A.-S. (2013): *Kaskadennutzung von Biopolymeren – Grundlegende Untersuchung zur Entsorgung von Biopolymeren*. Hannover/Rostock.
- Klöppfer, W.; Renner, I. (1995): *Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien*. In: *Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen*. Umweltbundesamt. Berlin.
- Knörr, W.; Heidt, C.; Schacht, A. (2012): Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichtserstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011).
- Koalitionsvertrag (2013): *Deutschlands Zukunft gestalten - Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD*.
- Kost, C.; Mayer, J.N.; Thomsen, J.; Hatmann, N.; Senkpiel, C.; Phillips, S.; Nold, S.; Lude, S.; Schlegel, T. (2013): *Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien*. Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme.

Lapola, D.M.; Schaldach, R.; Alcamo, J.; Bondeau, A.; Koch, J.; Koelking, C.; Priess, J.A. (2010): Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Bd. 107 (Nr. 8). S. 3388–3393. doi: 10.1073/pnas.0907318107. ISSN 0027-8424.

De Leeuw, F.A.A.M. (2002): A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution. In: Environmental Science & Policy. Bd. 5 (Nr. 2). S. 135–145.

Majer, S.; Stecher, K.; Adler, P.; Thrän, D.; Müller-Langer, F. (2013): Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen. Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima.

Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40

Mantau, U. (2012): Holzrohstoffbilanz Deutschland - Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung von 1987 bis 2015. Info Informationssysteme für Rohstoffe und Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich: Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Hamburg.

Narayanan, B.; Aguiar, A.; McDougall, R. (2012): Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 8 Data Base. Center for Global Trade Analysis. Purdue University.

Nitsch, J. (2008): Leitstudie 2008 - Weiterentwicklung der Ausbastrategie Erneuerbare Energien. BMU, DLR. Berlin.

Nitsch, J.; Pregger, T.; Naegler, T.; Heide, D.; Gerhardt, N.; Sterner, M.; Trost, T.; Wenzel, B.; Luca de Tena, D.; Trieb, F.; Scholz, Y.; Nienhaus, K.; von Oehsen, A.; Schwinn, R. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht BMU - FKZ O3MAP146.

Nitsch, J.; Pregger, T.; Naegler, T.; Heide, D.; de Tena, D.L.; Trieb, F.; Scholz, Y.; Nienhaus, K.; Gerhardt, N.; Sterner, M.; Trost, T.; Oehsen, A.; Schwinn, R.; Pape, C.; Hahn, H.; Wickert, M.; Wenzel, B. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - Schlussbericht. DLR, IWES, IFNE.

Nitsch, J.; Pregger, T.; Scholz, Y.; Naegler, T.; Sterner, M.; Gerhardt, N.; von Oehsen, A.; Pape, C.; Saint-Drenan, Y.-M.; Wenzel, B. (2010): Leitstudie 2010 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. BMU, DLR, IWES, IfnE.

Nova (2012): Press Release Nova Institute: Bio-based polymers - Production capacity will triple from 3.5 million tonnes in 2011 to nearly 12 million tonnes in 2020. nova-Institute GmbH.

OECD/IEA (Hrsg.) (2010): Energy technology perspectives 2010. Scenarios & Strategies to 2050.

Öko-Institut (2011): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme GEMIS. Öko-Institut. Darmstadt.

Öko-Institut; DLR (2009a): RENEWABILITY - Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030; Endbericht an das BMU (FKZ O327546). Nr. Teil 1: Methodik und Datenbasis.

Öko-Institut; DLR (2009b): RENEWABILITY - Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030; Endbericht an das BMU (FKZ O327546). Nr. Teil 2: Szenario-Prozess und Szenarioergebnisse; in Kooperation mit IFEU, DBFZ und Professur für Verkehrsströmungslehre der TU Dresden.

Prognos/ewj/gws (Hrsg.) (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose. Endbericht Nr. Projekt Nr. 57/12. Basel/Köln/Osnabrück.

Sachverständigenrat für Umweltfragen (2011): Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung - Sondergutachten. Sachverständigenrat für Umweltfragen. Berlin.

Schaldach, R.; Alcamo, J.; Koch, J.; Koelking, C.; Lapola, D.M.; Schuengel, J.; Priess, J.A. (2011): An integrated approach to modelling land-use change on continental and global scales. In: Environmental Modelling & Software. Bd. 26 (Nr. 8). S. 1041–1051. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.02.013. ISSN 1364-8152.

Scheftelowitz, M.; Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Hillebrand, K.; Naumann, K.; Ziegler, D.; Witt, J.; Beil, M.; Beyrich, W. (2014): Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben Ila Biomasse) - Zwischenbericht Juni 2014. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH.

Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C. (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Prognos AG, EWI, GWS. Köln.

Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C. (2011): Energieszenarien 2011. Prognos AG, EWI, GWS. Köln.

Searchinger, T.; Hanson, C.; Ranganathan, J.; Lipiski, B.; Waite, R.; Winterbottom, R.; Dinshaw, A.; Heimlich, R. (2013): The great balancing act - Creating a Sustainable Food Future, Installment One. Working paper. World Resources Institute.

Shell (Hrsg.) (2013): Erdgas - eine Brückentechnologie für die Mobilität der Zukunft?

Shell (Hrsg.) (2014): Shell PKW-Szenarien bis 2040 - Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität.

Thrän, D.; Billig, E.; T. Persson; Boehm, M.T.; Daniel-Gromke, J.; Ponitka, J.; Seiffert, M.; Baldwin, J.; Kranzl, L.; Schipfer, F.; Matzenberger, J.; Devriendt, N.; Dumont, M.; Dahl, J.; Bochmann, G. (2014): Biomethane - status and factors affecting market development and trade. IEA Task 40 and Task 37 Joint Study. ISBN 978-1-910154-10-6.

Thrän, D.; Edel, M.; Pfeifer, J. (2011): Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der Biomassenutzung. DBFZ. Leipzig.

Thrän, D.; Pfeiffer, D.; Brosowski, A.; Fischer, E.; Herrmann, A.; Majer, S.; Oehmichen, K.; Schmiersahl, R.; Schröder, T.; Stecher, K.; Stinner, W.; Zeller, V.; Zeymer, M.; Ciroth, A.; Zschunke, T.; Fritsche, U.R.; Henning, K.; Gödeke, K. (2013): Methodenhandbuch Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte. Leipzig DBFZ. ISBN 2192-1806.

Thrän, D.; Seidenberger, T.; Zeddies, J.; Offermann, R. (2010): Global biomass potentials - Resources, drivers and scenario results. In: Energy for Sustainable Development. Bd. 14 (Nr. 3). S. 200–205. doi: 10.1016/j.esd.2010.07.004. ISSN 0973-0826.

Toews, T.; Kuhlmann, F. (2009): Ökonomische Bewertung des Anbaus und der Nutzung von Energiepflanzen - Endbericht (Projekt-Nr. 22002505). Gießen.

UBA (Hrsg.) (2013): Weiterentwicklung des Analyseinstruments Renewability RENEWABILITY II - Szenario für einen anspruchsvollen Klimaschutzbeitrag des Verkehrs.

United Nations (2013): World Population Prospects: The 2010 Revision, Demographic Profiles. Revised edition. United Nations. New York. ISBN 9789211514964.

USDA ERS (2013): USDA ERS - International Macroeconomic Data Set. Abgerufen am 24.09.2013 von <http://www.ers.usda.gov/data-products/international-macroeconomic-data-set.aspx#26198>

Vogel, C.; Herr, M.; Edel, M.; Seidl, H. (2011): Die Mitverbrennung holzartiger Biomasse in Kohlekraftwerken. - Ein Beitrag zur Energiewende und zum Klimaschutz? Deutsche Energie Agentur (dena). Berlin.

Wern, B.; Gärtner, S.; Baur, F. (2013): Holzkaskadennutzung - Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergieerzeugung aus Holz. In: Effizient, umweltverträglich, dezentral. Neue Konzepte für die Nutzung von biogenen Festbrennstoffen. DBFZ. Leipzig.

Wern, B.; Kay, S.; Vogler, C.; Baur, F.; Gärtner, S.; Hienz, G.; Keller, H.; Müller-Lindenlauf, M.; Stockmann, F.; Wenzelides; Hagemann; Schulte (2014): Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergieerzeugung aus Holz nachhaltige und energieeffiziente Strategieentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Holzkaskadennutzung. Abschlussbericht. IZES/ifeu/Internationales Institut für Wald und Holz NRW.

Woltjer, G.; Kuiper, M.; Kavallari, A.; van Meijl, H.; Powell, J.; Rutten, M.; Shutes, L.; Tabeau, A. (2014): The MAGNET Model - Module description. LEI Wageningen UR. Wageningen.

World Food Summit (1996): Declaration on World Food Security. In: Rome.

Wright, T.P. (1936): Factors Affecting the Cost of Airplanes. In: Journal of the Aeronautical Sciences. Bd. 3 (Nr. 4). S. 122–126.

Zeller, V.; Thrän, D.; Zeymer, Martin; Bürzle, B.; Adler, P.; Ponitka, J.; Postel, J.; Müller-Langer, F.; Rönsch, S.; Gröngroft, A.; Kirsten, C.; Weller, N.; Schenker, M.; Wedwitschka, H.; Wagner, B.; Deumelandt, P.; Reinicke, F.; Vetter, A.; Weiser, C.; Henneberg, K.; Wiegmann, K. (2012): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung. ISBN 2190-7943.

Zeller, V.; Weiser, C.; Hennenberg, K.; Reinicke, F.; Schaubach, K.; Thrän, D.; Vetter, A.; Wagner, B. (2011): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung. Nr. 2.

Zukunftsstiftung Landwirtschaft (Hrsg.) (2013): Wege aus der Hungerkrise. Die Erkenntnisse und Folgen des Weltagrарberichts: Vorschläge für eine Landwirtschaft von morgen.

## Anhang

Der vorliegende Anhang enthält Ergänzungen und weiterführende Informationen im Rahmen des Vorhabens „Meilensteine 2030“ zu folgenden Aspekten:

- Exkurse (Stromspeichertechnologien, stoffliche Nutzungen, BioÖkonomie und Kaskadennutzung)
- Weiterführende Ergebnisse
- Modell- und Modulbeschreibung
- Modelle und Module: Schnittstellen und Datenfluss
- Optimierungsbedarf / Herausforderungen / Grenzen
- Hintergrunddaten und -annahmen

## A 1 Exkurse

### A.1.1 Stromspeichertechnologien

In einem zunehmend von fluktuierenden, erneuerbaren Energien geprägten Strom- und Energiesystem werden Ausgleichsmaßnahmen notwendig. So können neben unter anderem Netzausbaumaßnahmen, Lastmanagement und flexibler Erzeugung auch verschiedene Speicher dazu beitragen, die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Neben Stromspeichern können auch Gasspeicher und Wärmespeicher einen entsprechenden Beitrag leisten, werden jedoch hier nicht näher betrachtet werden.

Es gibt verschiedene Stromspeichertechnologien, welche sich für die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete eignen. Unter anderem werden Stromspeichersysteme mit hohem Speichervolumen benötigt, um den erneuerbaren, volatilen Strom aus Wind und Sonne in Spitzenzeiten abzufangen, zu speichern und ihn auf kurz-, mittel- oder langfristiger Sicht im Bedarfsfall wieder abzugeben. Es gibt generell eine Vielzahl an Möglichkeiten elektrische Energie zu speichern, doch zur langfristigen Speicherung muss eine Umwandlung der Energie erfolgen. Es werden drei Arten von Speicherungen unterschieden: mechanische Energie (Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Schwungrad), elektrochemische Energie (Wasserstoff (Power-to-Gas), Batterien) und elektrische Energie (supraleitende Spulen, Doppelschichtkondensatoren)

Der heutige Stand der Technik bietet bisher jedoch nur eingeschränkt die Möglichkeit, diesen Bedarf an Stromspeichern wirtschaftlich sowie technisch optimal zu decken. Durch unterschiedliche Kostenstrukturen, Betriebsarten und Kostendegressionsmöglichkeiten von Stromspeichertechnologien und zum Beispiel bedarfsgerechter, biogener Strombereitstellung ist es schwierig vorherzusehen, wann und in welchem Umfang Stromspeichertechnologien in größerem Umfang zum Einsatz kommen.

Für die Großspeichersysteme Pumpspeicher, Druckluftspeicher und auch Wasserstoffspeicher (Power-to-gas), welche ihre Anwendung in langfristigen (Wochenspeicher) bzw. mittelfristigen Speichern (Stundenspeicher) finden, sind in Abbildung A-1 exemplarisch einige Trends der Kostenentwicklung dargestellt. Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke (Compressed Air Energy Storage Systems [CAES]) werden im Laufe der Entwicklung langsam die Pumpspeicherkraftwerke ablösen, da sie wesentlich geringere Stromgestehungskosten aufweisen und die Umwelt nicht so stark belasten. Gegenwärtig fehlt die Wirtschaftlichkeit von PtG aufgrund der hohen Systemkosten, der hohen Strombezugskosten und Fragen der Anlagenlaufzeiten und des intermittierenden Betriebs. Die Kosten der Power-to-Gas-Anlagen werden im Vergleich weiterhin sehr hoch sein, doch da sie ihren Nutzen nicht im Load-Leveling versprechen, sondern im mittel- bis langfristigen Speichern von elektrischer Energie, werden auch sie im Jahr 2050 ebenfalls in den deutschen Kraftwerkpark integriert sein.

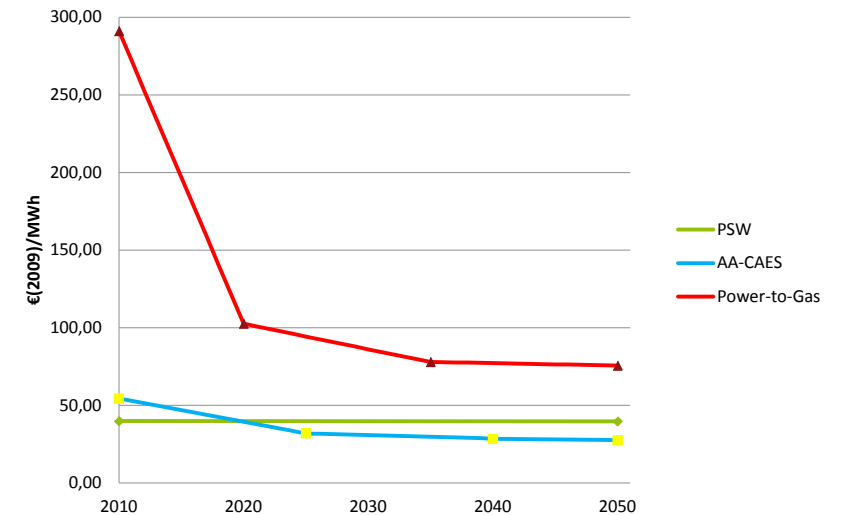


Abbildung A-1: Kostenvergleich der drei Speichertechnologien im Jahr 2050  
(Quelle: Öko-Institut, eigene Berechnung)

Die Option Power-to-Gas (PtG) könnte – eine entsprechende Kostenreduktion vorausgesetzt – ein zukünftig systemrelevanter Baustein insbesondere zwischen Strom- und Gasinfrastruktur (Speicherung, Mobilität, Wärme, rohstoffliche Nutzung, Rückverstromung) sein. Eine Option einer Nutzung besteht in Kombination mit Biogasanlagen mit biotechnischer Methanisierung. Die Speicherdauer (zeitlicher Ausgleich) und Speicherkapazität sind nahezu unbegrenzt und damit als Saisonaler- bzw. Langzeitspeicher geeignet, zusammen mit der vorhandenen Infrastruktur ist auch ein räumlicher Ausgleich vorhanden. Je nach Gestehungskosten und Überschüssen im Bereich Strom, ergeben sich potenziell über die Kopplung per PtG auch Preisauswirkungen im Bereich Gasversorgung. Dies kann z. B. dämpfend auf Preissteigerungen von Kraftstoffen wirken und damit auch stark auf die Nutzungspfade der Biomassenutzung einwirken. Zu beachten ist auch, dass eine Nutzung von PtG-Produkten nicht notwendig in der Stromversorgung, Kraftstoffpfade (PtL) sind ebenfalls denkbar, erfolgen muss. Hinsichtlich der Speicherbarkeit und der Nutzung haben PtG und Biomassenutzung auch im Verkehrsbereich ähnliche Systemeigenschaften.

### A.1.2 Exkurs stoffliche Nutzungen, Bioökonomie und Kaskadennutzung

Die Bioökonomie umfasst die Produktion von Dienstleistungen und Gütern auf der Basis biologischer Ressourcen in allen Wirtschaftssektoren (BioÖKONOMIERAT, 2012). Darunter ist grundsätzlich die gesamte Produktionspalette der weißen, grünen und roten Biotechnologie, d.h. die Produktion von Fein- und Grundchemikalien, von optimierten Nutzpflanzen

und von Medikamenten zu verstehen. Vom Bundesministerium für Bildung und Forschung wurde 2010 die nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 aufgestellt. Die Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 zielt auf die multidisziplinäre und interdisziplinäre Fortentwicklung biotechnologischer Verfahren mit Hilfe von Methoden aus der Physik, der Chemie, der Biologie, der Informatik, der Mathematik, den Ingenieurwissenschaften, den Umweltwissenschaften und den Agrar- und Ernährungswissenschaften. Die interdisziplinäre Herangehensweise der Wissenschaft beinhaltet dabei die Erforschung aller Ebenen biologischer Systeme von der Gen- über die Zell- und Organismus- bis zur Ökosystemebene. Als Vorteil der biotechnologischen Verfahren sind insbesondere die sanften Prozessbedingungen bei Temperaturen unter 100 °C und atmosphärischem Druck hervorzuheben. Statt mit metallischen Katalysatoren werden die stofflichen Umwandlungsprozesse größtenteils mit Hilfe von enzymatischen Prozessen, d. h. über Biokatalysatoren erreicht. Als Produktionssysteme werden in der BioÖkonomie dabei die bio-chemischen Umwandlungsprozesse von pflanzlichen Zellen, Enzymen und Mikroorganismen statt chemischer Reaktionen bei hohem Druck und hohen Temperaturen genutzt (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Referat Bioökonomie 2010).

Eine wirtschaftlich zukunftsfähige und ökologisch vorteilhafte Entwicklung innovativer biotechnologischer Produktionssysteme im Rahmen einer BioÖkonomie kann dabei jedoch nicht losgelöst von bereits bestehenden Nutzungen von Biomasse im Energiesektor und z. B. in der Zellstoffindustrie und Holzwerkstoffindustrie vorangetrieben werden.

Insbesondere sich verschärfende Nutzungskonkurrenzen wie die Flächenkonkurrenz z. B. zwischen Naturschutzfunktion und intensiver Landwirtschaft und die Ressourcenkonkurrenz zwischen werkstofflicher, stofflicher und energetischer Nutzung machen es in Zukunft nötig, eine integrierte Strategie der Biomassenutzung anzustreben. Dabei ist insbesondere die Kaskadennutzung ein vielversprechendes Instrument, eine Mehrfachnutzung in einer gestaffelten Wertschöpfungskette umzusetzen (BAUR, 2010).

Die ökologische Vorteilhaftigkeit einzelner Nutzungspfade für Produkte aus nachwachsenden Rohstoffe hängt dabei entscheidend von Substituierungseffekten wie dem Sequestrierungspotenzial, dem Emissionreduktionspotenzial und dem ökologischen Fußabdruck gegenüber substituierten Referenzprodukten und Dienstleistungen ab. Die Funktion der stofflichen Nutzung als temporärer Kohlenstoffspeicher und die zeitliche Abfolge in der Freisetzung klimarelevanter Gase sind dabei in Bezug zu den gewählten Referenzsysteme in seiner Umweltwirkung einzuordnen (GÄRTNER et al., 2013).

Wie Bilanzen zu den Klimaschutzpotenzialen der Abfallwirtschaft<sup>26</sup> zeigen, spielt bei der Verwertung von Altholz das stoffliche Recycling in Deutschland kaum eine Rolle. Altholz wird seit der Einführung des EEG fast ausschließlich energetisch verwertet, obwohl es zahlreiche, interessante Ansätze zum hochwertigen Holzrecycling gibt.

<sup>26</sup> Öko-Institut mit IFEU: „Klimabilanzen der Abfallwirtschaft - am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz“, UFOPLAN Projekt, 2010

Ein weiterer wesentlicher Bereich der stofflichen Biomassenutzung sind die Biopolymere, wie beispielsweise

- Polylactid (PLA), überwiegend auf Basis von Maisstärke,
- thermoplastische Polyester wie Polyhydroxybutyrat (PHB) und
- Polyhydroxyvalerat (PHV) auf Basis von Zucker und Stärke.

Besonders hohe Steigerungsraten werden für sogenannte „Drop-in“ Biopolymere prognostiziert (NOVA, 2012), wie biobasiertes Polyethylenterephthalat (PET), Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP). Diese sollen von den petrochemisch hergestellten Kunststoffen nicht zu unterscheiden sein und können wie diese verarbeitet und recycelt werden.

Während die Kaskadennutzung in der werkstofflichen Holznutzung bereits weitestgehend etabliert ist, ist sie in der stofflichen Holzverwertung und im Recycling bzw. der energetischen Nutzung von Biopolymeren nach dem Ende des ersten Lebenszyklus noch in der Pionierphase (GÄRTNER et al., 2013; KITZLER, 2013). Ähnlich wie bei fossilbasierten Kunststoffen hängt die Eignung von Biopolymeren für die Kaskadennutzung maßgeblich von deren biologischer Abbaubarkeit im Kompostierungs- und Biogasprozess und deren sortenreiner Erfassung im Recycling ab (KITZLER, 2013).

Ein wesentlicher Aspekt sind neben den Anbaubedingungen auch die Regionen, in denen der Pflanzenbau und überwiegend auch die Biokunststoffproduktion angesiedelt sind oder in Zukunft sein werden. Schon heute liegt der Anteil Asiens an der Biopolymerproduktion bei über 50 %, mit steigender Tendenz (NOVA, 2012). Die Anteile Europas und Nordamerikas gehen dagegen zurück, d.h. wie schon bei den bisherigen Bilanzen zu PLA, das überwiegend in den USA hergestellt wurde, werden Transporte auch in Zukunft eine große Rolle spielen.

Ein wesentliches Merkmal, das die Umweltauswirkungen der Biokunststoffe unterscheidet, ist deren Rezyklierbarkeit. „Drop-in“ Biopolymere weisen gerade hier einen wesentlichen Vorteil auf, da sie in bestehende, gut funktionierende Recyclingkreisläufe integriert werden können. Am Beispiel von PLA wird dagegen intensiv diskutiert, wie hoch der PLA-Anteil an den Recyclingfraktionen von PE, PP und PET sein dürfen, ohne dass die Qualität dieser Rezyklate zu stark beeinträchtigt wird. Recyclingverfahren auch für PLA werden getestet. Neben der Rezyklierbarkeit der Materialien ist insbesondere auch die Erfass- und Sortierbarkeit der daraus hergestellten Produkte ausschlaggebend.



## A 2 Weiterführende Ergebnisse

### A.2.1 Anhang zum Kapitel Ökobilanzielle Bewertung

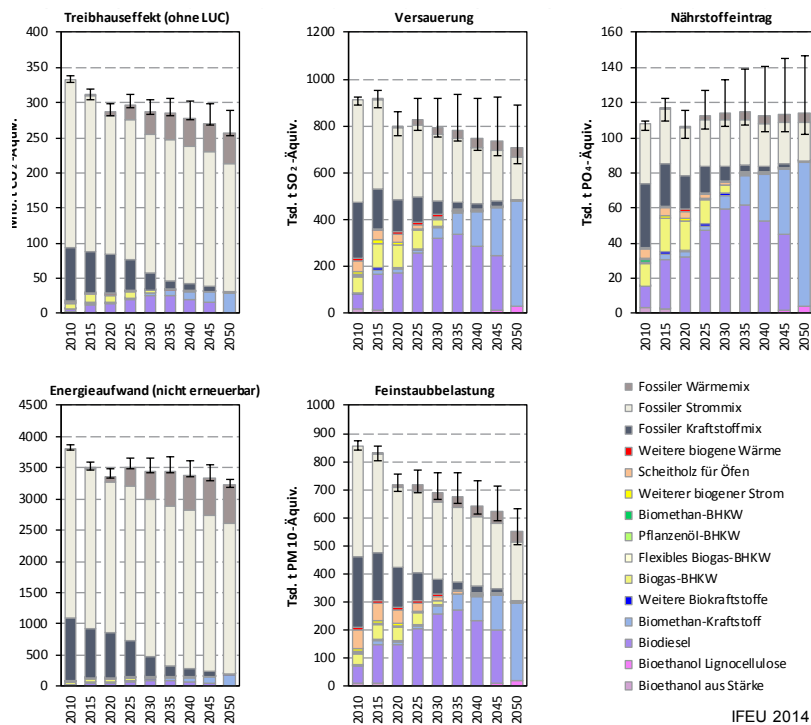


Abbildung A-2: Umweltwirkungen der Energiebereitstellung bei normierter Endenergie (Summen aus biogener und fossiler Endenergie identisch): Differenzierung nach Technologien und Jahren für das KS-N-Szenario (analog zu Abbildung 5-30).

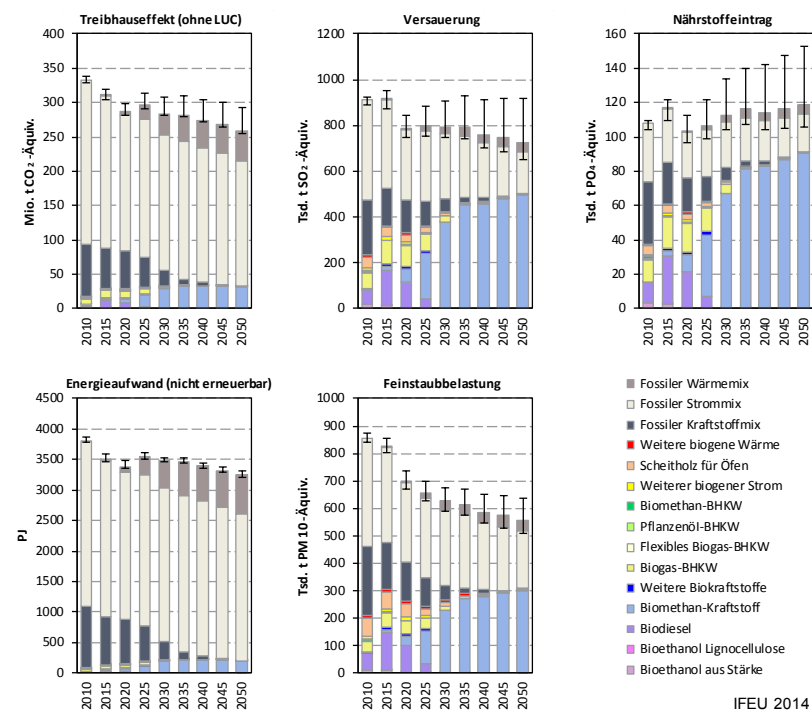


Abbildung A-3: Umweltwirkungen der Energiebereitstellung bei normierter Endenergie (Summen aus biogener und fossiler Endenergie identisch): Differenzierung nach Technologien und Jahren für das KS-BAU-B-Szenario (analog zu Abbildung 5-30).

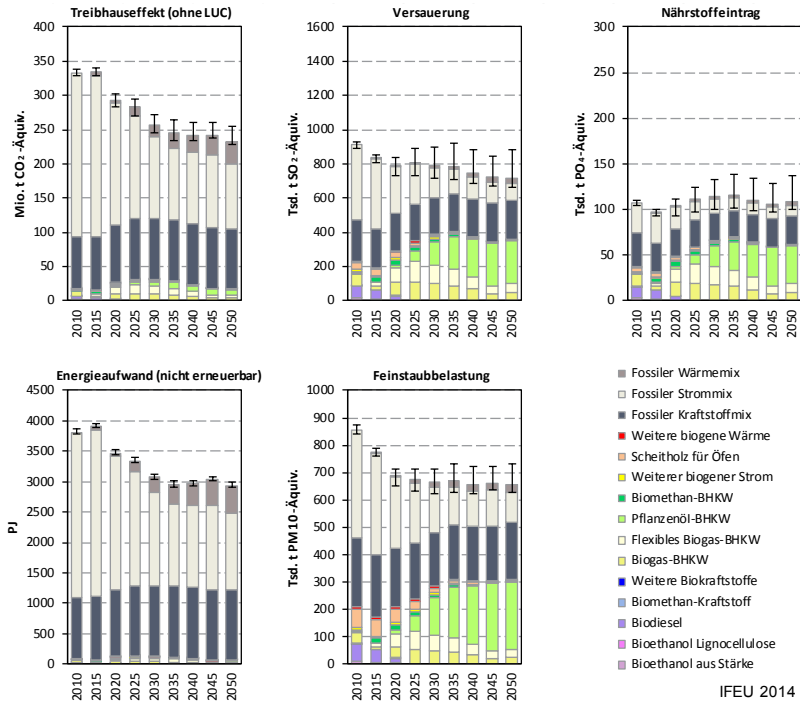


Abbildung A-4: Umweltwirkungen der Energiebereitstellung bei normierter Endenergie (Summen aus biogener und fossiler Endenergie identisch): Differenzierung nach Technologien und Jahren für das SW-BAU-Szenario (analog zu Abbildung 5-30).

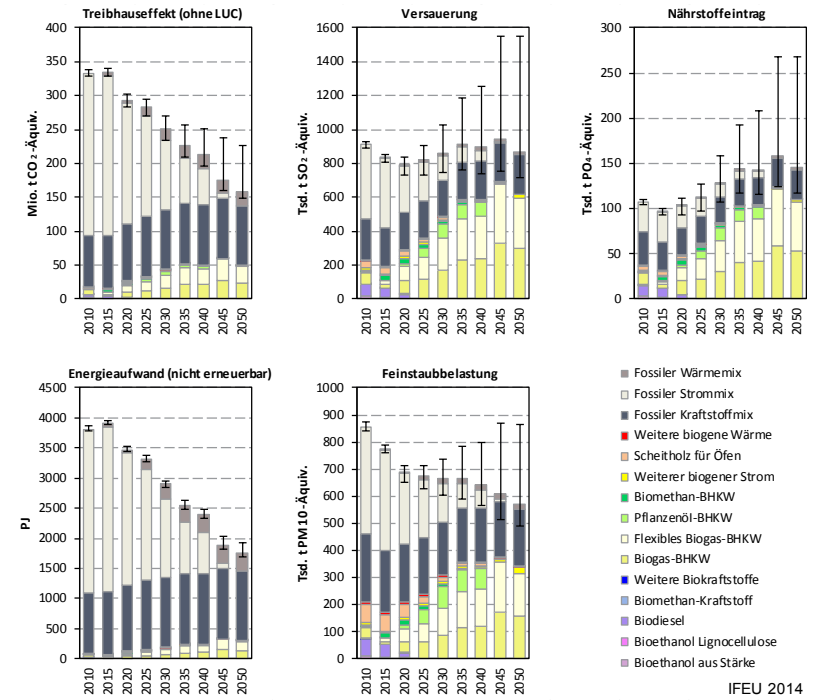


Abbildung A-5: Umweltwirkungen der Energiebereitstellung bei normierter Endenergie (Summen aus biogener und fossiler Endenergie identisch): Differenzierung nach Technologien und Jahren für das SW-N-Szenario (analog zu Abbildung 5-30).

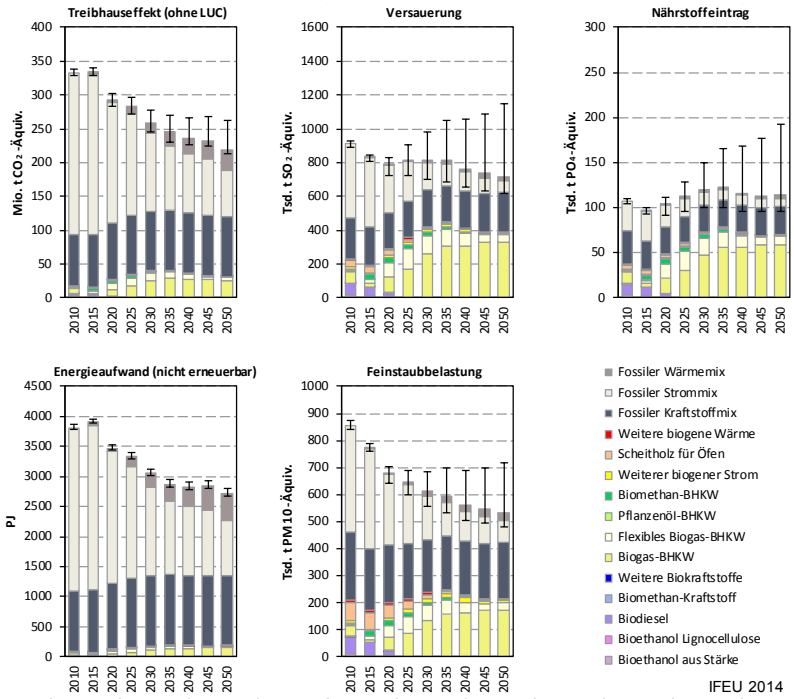


Abbildung A-6: Umweltwirkungen der Energiebereitstellung bei normierter Endenergie (Summen aus biogener und fossiler Endenergie identisch): Differenzierung nach Technologien und Jahren für das SW-BAU-B-Szenario (analog zu Abbildung 5-30).

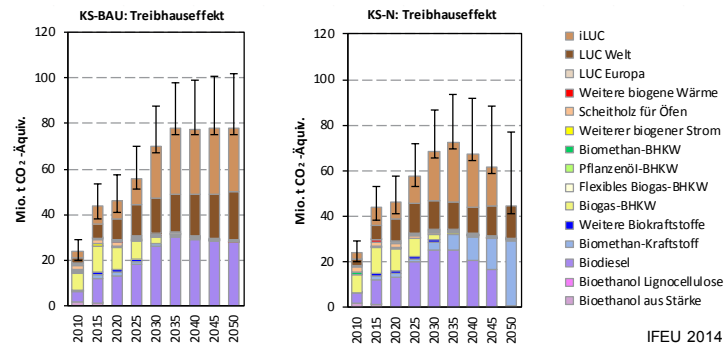


Abbildung A-7: Treibhauseffekt der Bienergieträger durch Bereitstellung und Nutzung sowie direkte (LUC) und indirekte (iLUC) Flächennutzungsänderungen in den zwei Biokraftstoffsznarien (nur Bienergieträger)

## A.2.2 Anhang zum Kapitel „Ernährungssicherung“

Tabelle A-1: Szenarienergebnisse im Überblick für GHI 10, Quelle: Eigene Berechnung

KS BAU		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bioenergie total (ohne 2.G)	PJ	2.387	3.361	4.191	5.075	5.970	6.963	7.624	8.290	8.788
Bioenergie 20 % reiche Länder (ohne 2. G)	PJ	1.392	1.829	2.150	2.474	2.861	3.178	3.261	3.322	3.391
Biomasse für Nahrung in Hungerländer	PJ	370	317	308	305	161	168	174	179	163
Anteil Reduktion in reichen Ländern	%	27%	17%	14%	12%	6%	5%	5%	5%	5%
KS N										
Bioenergie total (ohne 2. G)	PJ	2.387	3.680	4.712	5.708	5.390	4.772	4.226	3.789	2.922
Bioenergie 20 % reiche Länder (ohne 2. G)	PJ	1.392	1.945	2.256	2.736	2.316	1.807	1.467	1.100	533
Biomasse für Nahrung in Hungerländer	PJ	370	317	308	305	161	168	174	179	163
Anteil Reduktion in reichen Ländern	%	27%	17%	14%	12%	6%	5%	5%	5%	5%
SW BAU										
Bioenergie total (ohne 2. G)	PJ	2.387	3.237	3.948	4.639	5.318	6.141	6.772	7.410	7.887
Bioenergie 20 % reiche Länder (ohne 2. G)	PJ	1.392	1.705	1.907	2.038	2.210	2.357	2.409	2.441	2.490
Biomasse für Nahrung in Hungerländer	PJ	370	317	308	305	161	168	174	179	163
Anteil Reduktion in reichen Ländern	%	27%	17%	14%	12%	6%	5%	5%	5%	5%
SW N										
Bioenergie total (ohne 2. G)	PJ	2.387	3.556	4.470	5.237	4.762	4.100	3.642	3.406	2.922
Bioenergie 20 % reiche Länder (ohne 2. G)	PJ	1.392	1.821	2.013	2.265	1.688	1.134	884	717	533
Biomasse für Nahrung in Hungerländer	PJ	370	317	308	305	161	168	174	179	163
Anteil Reduktion in reichen Ländern	%	27%	17%	14%	12%	6%	5%	5%	5%	5%

Tabelle A-2: KS-BAU: Reduktion der Biomasse in PJ „reiche“ Länder (GHI 5), Quelle: Eigene Berechnung

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
USA	390	299	289	277	215	201	194	190	142
Deutschland	47	80	73	82	88	95	94	90	67
Frankreich	39	32	30	25	19	16	16	0	0
Großbritannien	18	34	33	29	22	19	19	19	14
Skandinavien & Baltische Staaten	10	14	13	11	9	8	8	7	5
Benelux	10	16	15	13	10	9	9	8	6
Ozeanien	5	7	8	8	7	6	6	6	4
Japan & Korea	4	20	21	21	17	14	14	13	10
Rest EU15	0	0	0	0	0	0	0	5	4

Tabelle A-3: KS-BAU: Bedarf an Nahrung in PJ (GHI 5), Quelle: Eigene Berechnung

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Indien	140	131	122	112	102	92	82	72	0
China	93	81	71	62	0	0	0	0	0
Rest Sub- Sahara-Afrika	71	76	82	89	96	103	110	116	121
Rest Asien	45	44	42	41	39	37	34	32	29
Süd Ost Asien	36	35	33	32	30	28	27	25	22
Pakistan	22	23	24	24	24	23	23	22	21
Mosambik & Äthiopien	22	21	21	21	21	21	20	19	18
Rest Süd und Central Amerika	15	15	15	15	14	14	13	13	0
Nordafrika	13	13	13	12	12	12	11	10	10
Brasilien	10	10	10	9	9	0	0	0	0
Rest West Asien	9	10	10	10	11	11	11	0	0
Tansania	7	8	9	10	11	12	12	13	14
Russland	7	7	6	5	0	0	0	0	0
Rest ehemalige Sowjetunion	7	6	6	6	6	6	6	6	6
Kenia	6	6	7	7	8	8	9	9	9
Mittlerer Osten	5	6	6	5	0	0	0	0	0
Rest Europa	4	4	0	0	0	0	0	0	0
Süd Afrika	3	3	2	2	2	0	0	0	0
Argentinien	2	2	2	2	0	0	0	0	0
Bulgarien & Rumänien	2	2	1	1	1	0	0	0	0
Polen	2	1	0	0	0	0	0	0	0
Bolivien	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Gesamt	522	504	483	467	386	368	359	338	252

Tabelle A-4: KS-BAU: Reduktion der Biomasse in PJ „reiche“ Länder (GHI 10), Quelle: Eigene Berechnung

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
USA	276,3	188,4	184,3	180,8	89,2	91,9	93,9	100,7	91,7
Deutschland	33,2	50,5	46,7	53,7	36,5	43,5	45,4	47,6	43,3
Frankreich	27,4	20,2	19,2	16,6	7,9	7,6	7,8	0,0	0,0
Großbritannien	13,0	21,7	21,1	18,6	9,1	8,8	9,3	9,9	8,9
Skandinavien & Baltische Staaten	6,8	8,9	8,6	7,5	3,6	3,5	3,6	3,8	3,4
Benelux	6,8	10,3	9,8	8,5	4,1	3,9	4,1	4,3	3,9
Ozeanien	3,3	4,5	4,9	5,2	2,9	2,6	2,9	3,1	2,7
Japan & Korea	3,0	12,9	13,1	13,7	7,2	6,4	6,7	7,2	6,4
Rest EU15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	2,6

Tabelle A-5: KS-BAU: Bedarf an Nahrung in PJ (GHI 10), Quelle: Eigene Berechnung

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Indien	140	131	122	112	0	0	0	0	0
Rest Sub Sahara Afrika	71	76	82	89	96	103	110	116	121
Rest Asien	45	44	42	41	0	0	0	0	0
Süd Ost Asien	36	0	0	0	0	0	0	0	0
Pakistan	22	23	24	24	24	23	23	22	0
Mosambik & Äthiopien	22	21	21	21	21	21	20	19	18
Nordafrika	13	0	0	0	0	0	0	0	0
Tansania	7	8	9	10	11	12	12	13	14
Rest ehemalige Sowjetunion	7	6	0	0	0	0	0	0	0
Kenia	6	6	7	7	8	8	9	9	9
Bolivien	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Gesamt	370	317	308	305	161	168	174	179	163

Tabelle A-6: KS-BAU: Reduktion der Biomasse in PJ „reiche“ Länder (GHI 15), Quelle: Eigene Berechnung

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
USA	95	80	36	23	22	18	7	0	0
Deutschland	11	21	9	7	9	8	3	0	0
Frankreich	9	9	4	2	2	1	1	0	0
Großbritannien	4	9	4	2	2	2	1	0	0
Skandinavien & Baltische Staaten	2	4	2	1	1	1	0	0	0
Benelux	2	4	2	1	1	1	0	0	0
Ozeanien	1	2	1	1	1	1	0	0	0
Japan & Korea	1	5	3	2	2	1	0	0	0

Tabelle A-7: KS-BAU: Bedarf an Nahrung in PJ (GHI 15), Quelle: Eigene Berechnung

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Rest Sub Sahara Afrika	71	76	0	0	0	0	0	0	0
Pakistan	22	23	24	0	0	0	0	0	0
Mosambik & Äthiopien	22	21	21	21	21	21	0	0	0
Tansania	7	8	9	10	11	12	12	0	0
Kenia	6	6	7	7	8	0	0	0	0
Gesamt	128	135	61	38	40	32	12	0	0



Tabelle A-8: KS-BAU: Reduktion der Biomasse in PJ „reiche“ Länder (GHI 20), Quelle: Eigene Berechnung

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
USA	22	18	13	0	0	0	0	0	0
Deutschland	3	5	3	0	0	0	0	0	0
Frankreich	2	2	1	0	0	0	0	0	0
Großbritannien	1	2	1	0	0	0	0	0	0
Skandinavien & Baltische Staaten	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Benelux	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Ozeanien	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Japan & Korea	0	1	1	0	0	0	0	0	0

Tabelle A-9: KS-BAU: Bedarf an Nahrung in PJ (GHI 20), Quelle: Eigene Berechnung

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Mosambik & Äthiopien	22	21	21	21	21	21	20	19	18
Tansania	7	8	9	10	11	12	12	13	14
Gesamt	29	30	21						

Tabelle A-10: Länder mit hohem BIP/Kopf (oberen 10% und 30%; KS-BAU), Quelle: Eigene Berechnung

„Reiche“ Länder (10 %)	Reiche“ Länder (30 %)
Benelux	Benelux
Deutschland	Deutschland
Großbritannien	Frankreich
USA	Spanien / Portugal
	Italien
	Großbritannien
	Rest EU 15, Rest EU 12
	Japan, Korea
	Ozeanien
	Skandinavien und Baltische Staaten
	USA
	China

Tabelle A -1: KS-BAU: Reduktion der Biomasse in PJ „reiche“ Länder (GHI 10, BIP 10 %, 20 %, 30 %)

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>BIP 10 %</b>									
USA	310	221	217	211	103	104	107	111	101
Deutschland	37	59	55	63	42	49	52	53	48
Großbritannien	15	25	25	22	10	10	11	11	10
Benelux	8	12	11	10	5	4	5	5	4
<b>BIP 20 %</b>									
USA	276,3	188,4	184,3	180,8	89,2	91,9	93,9	100,7	91,7
Deutschland	33,2	50,5	46,7	53,7	36,5	43,5	45,4	47,6	43,3
Großbritannien	13,0	21,7	21,1	18,6	9,1	8,8	9,3	9,9	8,9
Benelux	6,8	10,3	9,8	8,5	4,1	3,9	4,1	4,3	3,9
Frankreich	27,4	20,2	19,2	16,6	7,9	7,6	7,8	0,0	0,0
Skandinavien & Baltische Staaten	6,8	8,9	8,6	7,5	3,6	3,5	3,6	3,8	3,4
Ozeanien	3,3	4,5	4,9	5,2	2,9	2,6	2,9	3,1	2,7
Japan & Korea	3,0	12,9	13,1	13,7	7,2	6,4	6,7	7,2	6,4
Rest EU15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	2,6
<b>BIP 30 %</b>									
USA	245,0	170,3	167,0	166,0	82,6	85,7	88,8	92,5	66,5
Deutschland	29,4	45,6	42,3	49,3	33,8	40,6	42,9	43,7	31,4
Frankreich	24,3	18,2	17,4	15,2	7,4	7,0	7,4	7,4	5,2
Spanien & Portugal	19,2	10,7	10,2	8,8	4,3	4,0	0,0	0,0	0,0
Italien	15,6	13,7	12,8	10,9	5,1	4,8	4,9	4,9	0,0
Großbritannien	11,5	19,6	19,2	17,1	8,4	8,2	8,8	9,1	6,5
Rest EU15	7,1	6,1	5,9	5,2	2,5	2,5	2,6	2,7	1,9
Skandinavien & Baltische Staaten	6,1	8,0	7,8	6,9	3,3	3,2	3,4	3,5	2,5
Benelux	6,1	9,3	8,9	7,8	3,8	3,7	3,9	4,0	2,8
Ozeanien	3,0	4,0	4,5	4,8	2,7	2,5	2,8	2,8	2,0
Japan & Korea	2,6	11,6	11,9	12,6	6,6	6,0	6,4	6,6	4,7
China	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,9
Rest EU12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	2,2	1,7

## A 3 Methodischer Anhang

### A 3.1 Modell- und Modulbeschreibung

#### A 3.1.1 MAGNET

##### Kurzübersicht

MAGNET (Modular Applied GeNeral Equilibrium Tool) ist ein globales, dynamisch-rekursives allgemeines Gleichgewichtsmodell. Mit einem solchen Modell ist es möglich, die Entwicklung von Rohstoffpreisen und Rohstoffnachfragen im gesamtökonomischen Kontext zu simulieren. MAGNET berücksichtigt eine Vielzahl von Einflussfaktoren (beispielsweise politische Rahmenbedingungen, Bevölkerungsentwicklung und Wirtschaftswachstum).

##### Funktion im Modellverbund

Im Zusammenspiel mit dem Modell LandSHIFT (vgl. A 3.1.2) weist MAGNET die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche und Produktion pro Land und Produkt aus. Die landwirtschaftliche Produktion wird als Nahrungsmittel, Futtermittel oder Biomasse zur Energiegewinnung verwendet. MAGNET dient im Projekt zur Abschätzung der Preisentwicklung sowie der Entwicklung der Nachfrage der für die in BENSIM (vgl. A 3.1.3) betrachteten Konversionsanlagen relevanten, handelbaren Rohstoffe (Weizen, Mais, Zucker, Ölsaaten, Zuckerrüben). Der Handel ist explizit in MAGNET abgebildet, sodass die Rohstoffe nach Herkunftsland unterschieden werden. Holz und Abfall- bzw. Nebenprodukte (z. B. Stroh, Gülle) sind nicht in MAGNET implementiert. Hierfür werden Preisentwicklungen auf Basis von Expertenannahmen abgeleitet. Die Entwicklung der Rohstoffpreise ist relevant für die Berechnungen im Modell BENSIM. Die Entwicklung der landwirtschaftlichen Produktion ist eine relevante Eingangsgröße für das Modell LandSHIFT. Die Herkunft der Rohstoffe zur Bioenergiegewinnung ist für die Einschätzungen zu regionalen Effekten (Siehe A 3.1.7) und der Bewertung flächenbezogener Risiken (Siehe A 3.1.6) relevant.

##### Arbeitsweise

MAGNET bestimmt Gleichgewichtspreise für verschiedene Agrarprodukte. Ein Gleichgewichtspreis ergibt sich, indem Angebots- und Nachfragemengen sich auf allen abgebildeten Märkten (Inland und Weltmarkt) in der Summe entsprechen. Dabei umfasst die Datenbasis des Modells 134 Länder bzw. Regionen. Die Datenbasis wird in Form einer Social Accounting Matrix (SAM) beschrieben. Die SAM bildet, bezogen auf Sektoren und Regionen, alle wirtschaftlichen und finanziellen Transaktionen zwischen Produzenten, weiterverarbeitenden Sektoren, privaten und öffentlichen Haushalten und dem Ausland monetär ab. Die SAM beschreibt die komplette Ökonomie für das Jahr 2007 in Form von Werteangaben (Menge\*Preise) für Produktion, bilateralen Handel, Konsum, vorhandene Produktionsfaktoren (Arbeit, Kapital, Boden und natürliche Ressourcen), Kosten für vorgelagerte Produkte in den unterschiedlichen Sektoren (Beispielsweise Kosten des Biodieselsektors für Pflanzenöl) und Steuern. In GTAP (Global Trade Analysis Project), der Datenbasis für MAGNET,

sind 57 aggregierte Sektoren vorhanden. MAGNET enthält weitere Sektoren, die diese 57 Sektoren weiter disaggregieren. So sind beispielsweise die Biodiesel- und Ethanolsektoren einzeln aufgeführt. Eine Übersicht über die im Projekt berücksichtigten Sektoren und Länder(gruppen) geben Tabelle A-12 und Tabelle A-13.

Tabelle A-12: Produktaggregation MAGNET

pdr	Paddy Rice: rice, husked and unhusked
wht	Wheat: wheat and meslin
corn	Split from „gro“
o_gr	„gro“ without corn
O_CR	other crops (agg.)
soja	Split from „osd“
o_sd	„osd“ without soja
c_b	Cane & Beet: sugar cane and sugar beet
CATT	Livestock: Cattle; pasture as feed (agg.)
oap	Other Animal Products: swine, poultry and other live animals; eggs, in shell (fresh or cooked), natural honey, snails (fresh or preserved) except sea snails; frogs' legs, edible products of animal origin n.e.c., hides, skins and furskins, raw , insect waxes and spermaceti, whether or not refined or coloured
IND	Rest of Industries (agg.)
frs	Forestry: forestry, logging and related service activities
col	Coal: mining and agglomeration of hard coal, lignite and peat
oil	Oil: extraction of crude petroleum and natural gas (part), service activities incidental to oil and gas extraction excluding surveying (part)
gas	Gas: extraction of crude petroleum and natural gas (part), service activities incidental to oil and gas extraction excluding surveying (part)
MEMI	Meat and dairy products (agg.)
omt	Other Meat: pig meat and offal. preserves and preparations of meat, meat offal or blood, flours, meals and pellets of meat or inedible meat offal; greaves
vofo	Vegetable oil for Food use
vobf	Vegetable oil for Biofuel use
pcr	Processed Rice: rice, semi- or wholly milled
sgr	Sugar
O_FO	other food (agg.)
p_c	Petroleum & Coke: coke oven products, refined petroleum products, processing of nuclear fuel
crp	Chemical Rubber Products: basic chemicals, other chemical products, rubber and plastics products
ely	Electricity: production, collection and distribution
SERV	all Services except transportation (agg.)
TRSP	all forms of Transportation (agg.)
biod	Biodieselproduction with by-product
biog	Ethanol production with by-product

Tabelle A-13: Länderaggregation MAGNET

	Land/ Region		
1	Argentina	19	Rest of EU15
2	Benelux	20	Rest of Europe
3	Bolivia	21	Rest of Former Soviet Union
4	Brazil	22	Rest of new European Member States (2004)
5	China+	23	Rest of North America
6	EU2 Bulgaria and Romania	24	Rest of South and Central America
7	France	25	Rest of Sub Saharan Africa
8	Germany	26	Rest of the World
9	India	27	Rest of Western Asia
10	Italy	28	Russian Federation
11	Japan, Korea	29	Scandinavia and Baltics
12	Kenya	30	South Africa
13	Mosambique, Ethiopia	31	Spain and Portugal
14	North Africa	32	Tanzania
15	Oceania	33	Thailand, Philippines, Malaysia, Indonesia
16	Pakistan	34	United Kingdom
17	Poland	35	United States of America
18	Rest of Asia	36	Western Asia Oil Producers (without Iraq)

Projektionen in eine mögliche Zukunft werden durch makroökonomische Annahmen (Entwicklung des Wirtschaftswachstums und der Bevölkerung), Politiken (beispielsweise Biokraftstoffmandate, Zölle, Subventionen und Steuern) und Technologieänderungen getrieben. Zusätzlich sind weitere Schocks im Zeitablauf implementiert, wie z. B. die Verknappung der nutzbaren landwirtschaftlichen Fläche, steigende Weltmarktpreise für bestimmte Produkte, Nachfrageänderungen nach Biokraftstoffen und Politikänderungen. Durch die veränderlichen makroökonomischen Annahmen und technischem Fortschritt über die Zeit ist das Modell dynamisch. MAGNET ist momentan ausgelegt für Projektionen bis 2050 unterteilt in flexible Zeitabschnitte. Für das „Meilensteine“-Projekt verläuft der Projektionszeitraum bis 2050, jeweils in Fünfjahresschritten.

Produktion: Die Produktion ist abhängig von Preisen, Politiken, makroökonomischen Entwicklungen, Substitutionsmöglichkeiten und Technologieentwicklungen. MAGNET kann sowohl ökonomische Politiken exogen in das Modell aufnehmen und dann endogen Angebot, Nachfrage und Preise bestimmen oder die Nachfrage exogen vorgeben und endogen die Größenordnung einer Politik bestimmen, die notwendig ist, um eine gewählte Zielgröße, wie z. B. die Nachfragemenge zu erfüllen. In dem Modell gilt die generelle Annahme, dass ein Sektor ein Gut produziert. Diese Annahme gilt jedoch nicht, wenn bei der Erzeugung oder der Verarbeitung eines Produktes gleichzeitig jeweils Koppelprodukte anfallen (z. B. Erzeugung von Pflanzenöl und Ethanol). Produktionsfaktoren (Arbeit, Kapital, Boden und natürliche Ressourcen) und vorgelagerte Produkte sind Inputs zur Produktion eines Gutes. Vorleistungsgüter der Ethanolherstellung sind z. B. Mais, Weizen, Zuckerrüben und Zuckerrohr, aber auch Energie, Dienstleistungen und weitere Industrieprodukte. Inputs können gegeneinander substituiert werden. Im Substitutionsprozess verändern sich die jeweiligen Kostenanteile einzelner Inputs aufgrund veränderter Preisrelationen. Dabei haben die exo-

genen Substitutionselastizitäten einen entscheidenden Einfluss auf die ‚Leichtigkeit‘ der Substitution eines Inputs durch einen anderen. Konkret heißt dies: steigt der Preis eines Produktionsfaktors, kann er abhängig von der Höhe der Substitutionselastizität durch andere Produktionsfaktoren ersetzt werden. Dies gilt auch für vorgelagerte Produkte. Wird Weizen beispielsweise sehr teuer, kann anstelle von Weizen auch Mais in der Ethanolproduktion eingesetzt werden. Des Weiteren wird jedem Input und jeder Produktion ein „Technologieparameter“ zugeordnet. Dieser legt für jeden Sektor fest, wie viel Input zur Produktion benötigt wird. Beispielsweise erfordert die Biodieselproduktion  $x$  Liter Pflanzenöl,  $x$  h Arbeit,  $x$  Kapital, usw. um 1 Liter Biodiesel herzustellen. Ein Liter Pflanzenöl wird wiederum aus  $x$  kg Soja oder  $x$  kg Ölpflanzen plus  $x$  Produktionsfaktoren gewonnen. Ein kg Soja benötigt dann  $x$  ha Land,  $x$  h Arbeit,  $x$  Kapital,  $x$  Inputfaktoren (z. B. Düngemittel, Saatgut, etc.). Zurzeit hat MAGNET einen „exogenen Technologieparameter“ basierend auf vorhandener Literatur und Expertenwissen. Dieser wird für die Biodiesel und Ethanolproduktion im Rahmen des Projektes mit den Konversionsannahmen in BENSIM (vgl. Kapitel A 3.1.3) abgeglichen.

**Landnutzung in MAGNET:** Boden ist ein wichtiger Produktionsfaktor für die Herstellung von Agrarrohstoffen. Je nach Produktionsmenge und produktspezifischem Ertrag wird Boden durch unterschiedliche Kulturen genutzt. Die tatsächliche Nutzung von Boden für landwirtschaftliche Zwecke hängt auch von der potenziell verfügbaren Fläche (exogen, durch LandSHIFT vorgegeben), den Preisen für Land (Nachfragepreisfunktion) und von Umnutzungskosten (z. B. Forstfläche in Ackerland) ab. Dabei schlägt sich eine steigende Bodennachfrage generell in steigenden Bodenpreisen und damit steigenden Produktionskosten im Ackerbau nieder.

**Nachfrage:** Die Nachfrage ist abhängig von Preisen, Politiken, makroökonomischen Entwicklungen, Substitutionsmöglichkeiten zwischen einzelnen nachgefragten Produkten und Technologieentwicklungen. Beispielsweise ist die Nachfrage nach Biokraftstoffen bei den gegenwärtigen Preisen für fossile Energien rein politikgetrieben und somit ist für die EU der Anteil von Biokraftstoff am Kraftstoffverbrauch exogen festgelegt. Eine erhöhte Biokraftstoffproduktion hat Einfluss auf den Biokraftstoffpreis, die Inputfaktoren (insbesondere Land und agrarische Rohstoffe) sowie auf Substitutionsprodukte (fossile Energieträger). Steigt der Rohölpreis stark an, würde dieser ebenfalls die Produktion von Biokraftstoffen erhöhen, da diese nun am Markt wettbewerbsfähig wären, auch wenn keine entsprechenden Treibstoffmandate vorgeschrieben sind.

**Importe und Exporte:** Sowohl Endprodukte als auch Produkte zur Weiterverarbeitung können aus anderen Ländern importiert und in andere Länder exportiert werden, sofern diese Produkte handelbar sind. Die Frage, ob ein Erzeuger das produzierte Gut auf heimischen oder internationalen Märkten verkauft, wird durch das relative Preisverhältnis zwischen Inlands- und Weltmarktpreis bestimmt. Wie stark sich ändernde Preisrelationen zwischen heimischen und internationalen Märkten auf heimisches und Exportangebot auswirkt, ist durch eine Transformationsfunktion und die dort eingesetzten Armington-Elastizitäten beschrieben. Das gleiche gilt umgekehrt für die Nachfrage von End- oder Vorleistungsprodukten. Verändert sich dieses Preisverhältnis, ändern sich Angebot und Nachfrage auf inländischen und ausländischen Märkten. Eine solche Änderung tritt z. B. bei Änderung von Außenhandelspolitiken ein. So kann ein Importzoll beispielsweise die Nachfrage von

ausländischer Ware vermindern oder sogar im Extremfall komplett verhindern. In MAGNET werden die Produkte nach ihrer Herkunft unterschieden. Dadurch lassen sich bilaterale Handelsbeziehungen abbilden. So kann beispielsweise der europäische Importzoll von Pflanzenöl variieren, je nachdem aus welchem Land importiert wird.

### Annahmen

#### Endogen:

- Vollkommener Wettbewerb. Bilateralen Handel (Importe und Exporte) wird auf der Grundlage der ‚Armington Annahme‘ beschrieben, bei der inländische und ausländische Güter als eingeschränkt substituierbar angenommen werden
- Eingeschränkte Mobilität von Kapital und Arbeit zwischen den Agrarsektoren und den anderen Sektoren; d. h. Strukturwandel (Abwanderung von Arbeitskräften und Kapital aus oder in die Landwirtschaft tritt verzögert ein und bedarf eines deutlichen Gefälles zwischen Löhnen und/oder Kapitalrendite zwischen landwirtschaftlichen und nicht-landwirtschaftlichen Sektoren.
- Angebot = Nachfrage (mit Berücksichtigung von Importen und Exporten) => Gleichgewichtspreisbildung

#### Exogen:

Tabelle A-14: Exogene Annahmen in MAGNET

Variable	Kategorie	Spezifisch für
BIP	Makroökonomische Annahmen	Länderaggregat
Bevölkerung	Makroökonomische Annahmen	Länderaggregat
Land	Makroökonomische Annahmen	Länderaggregat
Kapitalstock	Makroökonomische Annahmen	Länderaggregat
Substitutionselastizitäten	Produktionsfunktion	Produkt- und Länderaggregat
Technologieparameter	Produktionsfunktion	Produkt- und Länderaggregat
Produktionsquoten	Politiken	Produkt- und Länderaggregat
Flächenprämien im Rahmen der EU Agrarpolitik	Politiken	Produkt- und Länderaggregat
Subventionen	Politiken	Produkt- und Länderaggregat
Steuern	Politiken	Produkt- und Länderaggregat
Quoten und Mandate	Politiken	Produkt- und Länderaggregat
Export und Import Zölle	Politiken	Produkt- und Länderaggregat
Import und Export Subventionen	Politiken	Produkt- und Länderaggregat
Import und Export Quoten	Politiken	Produkt- und Länderaggregat
Import und Export Restriktionen	Politiken	Produkt- und Länderaggregat

### Ergebnisse der Berechnungen

MAGNET bestimmt endogen als Ergebnis eines Simulationslaufs prozentuale Veränderungen aller Preise und Mengen für jeden Zeitabschnitt, jedes Land, jeden Faktor, jedes Produkt und jede Aktivität. Absolute Änderungen werden auf der Grundlage der Mengendaten des Basisjahres aus anderen Statistiken, z. B. FAO, IEA abgeleitet.

#### A 3.1.2 LandSHIFT

##### Kurzübersicht

Das globale Landnutzungsmodell LandSHIFT dient zur räumlichen und zeitlichen Simulation von Landnutzungsänderungen bedingt durch den Anbau von Nahrungs- und Energiepflanzen. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in (ALCAMO et al. 2011; SCHALDACH et al. 2011). Das Modell arbeitet auf einem Raster mit der räumlichen Auflösung von 5-Bogenminuten (entspricht ca. 9 x 9 km am Äquator). Jede Rasterzelle besitzt einen dominanten Landnutzungstyp sowie Informationen über ihre naturräumlichen Gegebenheiten (z. B. Topographie, Klima und Bodeneigenschaften) und die bebauten Flächen. Auf Basis dieser Daten errechnet das Modell die wahrscheinlichste Landnutzung für jede Rasterzelle. Modellergebnisse sind globale Rasterkarten, welche in Fünfjahresschritten bis zum Jahr 2050 die Entwicklung der Landnutzung darstellen.

##### Funktion im Modellverbund

Die im Modell MAGNET berechnete Entwicklung der Rohstoffnachfrage wird als Eingangsgröße in LandSHIFT berücksichtigt. Mit dessen Hilfe wird dann ermittelt, in welchen Regionen der Anbau der Feldfrüchte zur Deckung der Rohstoffnachfrage am wahrscheinlichsten ist, und ob durch diesen Anbau Landnutzungsänderungen induziert werden. Über LandSHIFT erfolgt ebenfalls die Berücksichtigung von flächenbezogenen Nachhaltigkeitsanforderungen im Modellverbund (siehe Kapitel A 3.1.6) insofern, als dass die Anwendung der Nachhaltigkeitsanforderungen zu einer Reduktion der für die Biomasseproduktion zur Verfügung stehenden Fläche und / oder zur Reduktion der Flächenerträge führt.

##### Arbeitsweise

Das Modell LandSHIFT besteht aus zwei Modulen. Das Modul „Umwelt“ bildet biophysikalische und hydrologische Prozesse ab. Berücksichtigt werden dabei Bedingungen wie unterschiedliche Bodenqualitäten, Klimabedingungen und Ertragspotenziale. In der für dieses Projekt genutzten Modellversion besteht das Modul „Umwelt“ aus dem dynamischen Vegetationsmodell LPJmL (BONDEAU et al. 2007) zur Simulation von Ernteerträgen verschiedener Feldfrüchte und der Biomasseproduktivität von Grünland. Diese Informationen werden für jede Rasterzelle generiert. Demgegenüber steht das Modul „Landnutzung“. Es simuliert Landnutzungsentscheidungen im Rahmen unterschiedlicher menschlicher Aktivitäten (momentan Landwirtschaft, Weidewirtschaft und Siedlung) und die daraus entstehende räumliche- und zeitliche Dynamik von Landnutzungsänderungen. In jedem Simulationsschritt führt eine Aktivität zwei grundlegende Arbeitsschritte durch. In Arbeitsschritt 1 erfolgt in Form einer multikriteriellen Analyse (MCA) (EASTMAN et al. 1995) eine Standortbewertung für alle Rasterzellen:

$$\psi_k = \underbrace{\sum_{i=1}^n w_i p_{i,k}}_{\text{Eignung}} \times \underbrace{\prod_{j=1}^m c_{j,k}}_{\text{Beschränkungen}}, \text{ mit } \sum_i w_i = 1, \text{ und } p_{i,k}, c_{j,k} \in [0,1]$$

Der Präferenzwert  $\psi$  einer Zelle  $k$  gibt Auskunft über die relative Güte dieser Zelle für eine bestimmte Aktivität. Die Werte liegen zwischen 0 (schlechteste) und 1 (beste). Der Präferenzwert setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Die Eignung ist die gewichtete Summe von Faktoren, die zur Güte einer Zelle beitragen (z. B. naturräumliche Gegebenheiten, mögliche Ernteerträge oder geographische Lagebeziehungen). Diese Faktoren werden zwischen 0 und 1 normiert (GENELETTI 2004). Mit dem Gewichtungsfaktor  $w_i$  wird der Einfluss der einzelnen Faktoren  $p_{i,k}$  am Gesamtwert bestimmt. Die Summe aller  $w_i$  muss 1 ergeben. Über Beschränkungen  $c_j$  können zusätzliche Nebenbedingungen einer Zelle definiert werden, z. B. können über diesen Mechanismus Naturschutzgebiete von einer Nutzung ausgeschlossen werden. Dieser Mechanismus wird u. a. dazu genutzt die in Kapitel A 4.1 dargestellten Nachhaltigkeitsanforderungen an den Anbau von Energiepflanzen abzubilden. Arbeitsschritt 2 umfasst die räumliche Allokation einer vorgegebenen Produktionsmenge (z. B. verschiedener Feldfrüchte) auf die am besten bewerteten Zellen. Der Ertrag und die daraus abgeleitete zellspezifische Produktionsmenge für landwirtschaftlich genutzte Zellen werden auf Basis der im Modul „Umwelt“ erzeugten Daten bestimmt.

##### Annahmen

Eingangsdaten für LandSHIFT werden auf zwei Skalenebenen bereitgestellt. Auf Ebene der in MAGNET verwendeten Regionen werden Informationen über die landwirtschaftliche Produktion verschiedener Feldfrüchte, im Bereich der Viehhaltung sowie über die Bevölkerungsentwicklung vorgegeben. LandSHIFT wird mit den gleichen statistischen Daten wie MAGNET für das Jahr 2007 initialisiert. Für die Simulation bis 2050 wird auf die im Projekt entwickelten Szenariendaten zurückgegriffen. Auf Rasterebene fließen zum einen Informationen über Landbedeckung und Landnutzung (u. a. Standorte von Feldfrüchten, Weideflächen und menschliche Bevölkerungsdichte) sowie über Topographie und Nutzungsrestriktionen (siehe u. a. Nachhaltigkeitsanforderungen in Kapitel A 4.1) in das Modell ein. Zum anderen werden die zellspezifischen Ernteerträge bzw. Biomasseproduktivität basierend auf Klimadaten (Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung) und Bodeninformationen berechnet. Das verwendete biophysikalische Modell LPJmL wird dabei auf einem 30-Bogenminuten Raster betrieben.

##### Ergebnisse der Berechnungen

Modellergebnisse sind globale Rasterkarten mit einer Auflösung von 5-Bogenminuten, welche in Fünfjahresschritten bis zum Jahr 2050 die Entwicklung der Landnutzung, bedingt durch die im vorigen Abschnitt beschriebenen Modelltreiber, darstellen. Dies umfasst sowohl die Veränderung von Landnutzungsklassen als auch der Bevölkerungsdichte. Basierend auf diesen Karten lassen sich sowohl direkte als auch indirekte Landnutzungsänderungen (LAPOLA et al. 2010) ableiten. Weiterhin werden für jeden Zeitschritt aggregierte Informationen über die in den MAGNET-Regionen vorhandene Ackerfläche und den mittleren Ernteertrag pro Feldfrucht sowie über die potenziell verfügbare Ackerfläche generiert. Diese Informationen können im Rahmen der Modellkopplung zum Abgleich insbesondere der mittleren Ernteerträge in den MAGNET-Regionen an MAGNET zurückgegeben werden.



## A 3.1.3 BENSIM

## Kurzübersicht

Das Simulationsmodell BENSIM wurde eigens für das Projekt „Meilensteine 2030“ entwickelt. Es simuliert den Wettbewerb ausgewählter Bioenergietechnologien zur Deckung einer Bioenergienachfrage (Kraftstoff bzw. Strom / Wärme) bei gegebenem Biomasseangebot für Deutschland bis 2050.

Eine Übersicht über die betrachteten und modellierten Konversionstechnologien und ausgewählter Parameter (in Ergänzung zu Tabelle 3-1) gibt Tabelle A-15.

Tabelle A-15: Technologien und Anlagenkennwerte innerhalb des Projektes „Meilensteine 2030“

Konversionssystem	Anlagenart bzw. Technologie-Cluster [Beschreibung Modellfall]	Rohstoff / Brennstoffquelle	Haupt- & Nebenprodukt(e)	Effizienz 2010 in $t_{TM}/GJ_{out}$ (Hauptprodukt)	Effizienz 2050 in $t_{TM}/GJ_{out}$ (Hauptprodukt)	Investkosten in $\text{€}_{2010}/MW$ (Hauptprodukt)	Lernrate ökon. [%]	Modellierung in BENSIM	
Verbrennung	Einzelraumfeuerungen < 30 kW (Einzelraumfeuerung 8 kW)	Holz (Scheitholz)	Wärme*	85	65	200.000	0	Nein (Expertschätzung)	
	Pelletkessel < 0,3 MW (Holzpelletkessel [Zentralheizung, 15 kW])	Holzpellets (zumeist 90 %) Sägewerknebenprodukte)	Wärme*	67	61	800.000	5-8		
	Holzhackschnittel < 2 MW (Automatische Kleinfeuerungsanlagen [Holzhackschnittelkessel 500 kW])	Holzhackschnittel	Wärme*	74	65	1.000.000	5		
	KWK < 1 MW <sub>el</sub> (ORC [250 kW <sub>el</sub> ])	Holzhackschnittel	Strom + Wärme	380	275	12.350.000	10		Ja (unter Berücksichtigung flexibler Bereitstellung)
	KWK 0,5 - 5 MW (2 MW <sub>el</sub> )	Pflanzenöl (Palm, Raps)	Strom + Wärme	63	61	1.037.000	0-5		Ja (unter Berücksichtigung flexibler Bereitstellung)
	KWK > 5 MW <sub>el</sub> (Dampfturbine [6 MW <sub>el</sub> ])	Holzhackschnittel	Strom + Wärme	168	148	4.300.000	5-15		Ja (unter Berücksichtigung flexibler Bereitstellung)

Konversionssystem	Anlagenart bzw. Technologie-Cluster [Beschreibung Modellfall]	Rohstoff / Brennstoffquelle	Haupt- & Nebenprodukt(e)	Effizienz 2010 in $t_{TM}/GJ_{out}$ (Hauptprodukt)	Effizienz 2050 in $t_{TM}/GJ_{out}$ (Hauptprodukt)	Investkosten in $\text{€}_{2010}/MW$ (Hauptprodukt)	Lernrate ökon. [%]	Modellierung in BENSIM
Anaerobe Vergärung	Biogas klein (< 150 kW <sub>el</sub> ) (landw. Biogasanlage [80 kW <sub>el</sub> ])	Gülle (85 %), Grassilage (10 %), Mais (5 %)	Strom + Wärme*	377	211	7.000.000	5	Nein (Expertschätzung)
	Biogas mittel / groß (> 150 kW-ca 20 MW <sub>el</sub> ) (Biogasanlage [500 kW <sub>el</sub> ])	Mais 70 %, Gülle Rind 20 %, Grassilage 5 %, GPS 5 %	Strom + Wärme	265	141	4.500.000	5	Ja (unter Berücksichtigung flexibler Bereitstellung)
	Biomethan (Biogasaufbereitung / -einspeisung [700 Nm <sup>3</sup> /h, ca. 7 MW Biomethan])	Mais (80 %), GPS (15 %), Gülle (5 %)	Biomethan	100	80	1.750.000	5	Ja
	Biomethan + KWK (Biogasaufbereitung / -einspeisung [700 Nm <sup>3</sup> /h] + BHKW 4,8 MW <sub>el</sub> )	Mais (80 %), GPS (15 %), Gülle (5 %)	Strom + Wärme	251	134	8.500.000	5	Ja (unter Berücksichtigung flexibler Bereitstellung)
	Bioabfall (Bioabfallvergärung [800 kW <sub>el</sub> ])	Bioabfälle (90 %), Grassilage (10 %)	Strom + Wärme*	250	133	12.000.000	5	Nein (Expertschätzung)
Fermentation	Zucker (130.000 m <sup>3</sup> Ethanol/a)	Zuckerrübe	Bioethanol + Vinasse, dried pulp	103	93	800.000	5-10	Ja
	Stärke (200.000 m <sup>3</sup> Ethanol/a)	Weizen	Bioethanol + DDGS	123	111	1.390.000	5-10	Ja
	Lignozellulose (73.000 m <sup>3</sup> Ethanol/a)	Weizenstroh	Bioethanol + Lignin, C5-Sirup	250	119	2.600.000	10-25	Ja
Umesterung	FAME (> 100.000 t <sub>Biodiesel</sub> /a) (200.000 t <sub>Biodiesel</sub> /a)	Rapsöl (aus zentraler Ölmühle)	Biodiesel + Glycerin + Extraktionschrot	64	61	235.000	3-10	Ja
Hydroprocessing	HVO (ca. 297 MW <sub>KS</sub> ) (200.000 t <sub>HVO</sub> /a)	Pflanzenöl (Raps)	HVO + Butan / Propan, Naphtha	65	62	713.000	2-5	Ja

Konversionssystem	Anlagenart bzw. Technologie-Cluster [Beschreibung Modellfall]	Rohstoff / Brennstoffquelle	Haupt- & Nebenprodukt(e)	Effizienz 2010 in $t_{in}/GJ_{out}$ (Hauptprodukt)	Effizienz 2050 in $t_{in}/GJ_{out}$ (Hauptprodukt)	Investkosten in $\text{€}_{2010}/\text{MW}$ (Hauptprodukt)	Lernrate ökon. [%]	Modellierung in BENSIM
Vergasung	Kleinvergaser < 3 MW (0,03 $\text{MW}_{in}$ , 200 t/a Holzeinsatz) <sup>27</sup>	Holzhackschnitzel	Strom + Wärme	289	142	5.000.000	5-20	Ja (unter Berücksichtigung flexibler Bereitstellung)
	Vergaser KWK < 100 MW (10,8 $\text{MW}_{in}$ , 44.000 t/a Holzeinsatz, ORC-Nachverstromung)	Holzhackschnitzel	Strom	163	96	4.700.000	5-15	Ja (unter Berücksichtigung flexibler Bereitstellung)
	Bio-SNG < 100 MW (25 $\text{MW}_{SNG}$ ) (121.000 t/a Holzeinsatz)	Holzhackschnitzel	Biomethan	96	77	3.500.000	8-10	Ja
	BTL > 100 MW (500 $\text{MW}_{FWL}$ , 1.433.000 t/a Holzeinsatz, 158 $\text{MW}_{out}$ Kerosin, 77 $\text{MW}_{out}$ Diesel)	Holzhackschnitzel	FT-Diesel + FT-Kerosin; FT-LPG, FT-Naphtha	183	142	3.850.000	8-10	Ja

<sup>27</sup> Übergangsweise könnten weitere, holzbasierte Mikro-KWK-Systeme (u. a. Stirling) zum Einsatz kommen. Diese wurden jedoch nicht näher betrachtet bzw. modelliert.

Die Modellberechnungen in BENSIM liefern Aussagen darüber, welche der Bioenergietechnologien sich wann und unter welchen Bedingungen gegen andere Bioenergietechnologien durchsetzen. Wesentlich für die Durchsetzungsfähigkeit einer Technologie sind die Kosten, zu denen diese das nachgefragte Produkt herstellen kann. Diese Kosten sind unter anderem abhängig von technologischen Lerneffekten, die durch den Zubau von Anlagen entstehen (GRÜBLER, 1998; WRIGHT, 1936), von der Entwicklung der Rohstoffpreise für die Anlagensubstrate und einem möglichen Preis für THG-Emissionen. All diese Einflussparameter werden in der BENSIM-Simulation berücksichtigt.

#### Funktion im Modellverbund

Für die Simulation benötigt das BENSIM Modell Angaben zu den Kosten der Rohstoffe. Diese werden für handelbare Agrarrohstoffe durch die Schnittstelle zu MAGNET bereitgestellt (siehe Kap. A 3.2.2). Die gesteigerte Nachfrage nach Anbaubiomasse durch die Bioenergienutzung, die einen Effekt auf die Rohstoffpreise hat, wird wiederum in MAGNET berücksichtigt. Um die Auswirkungen unterschiedlicher Preise für THG-Emissionen (Preise und Preisentwicklung in Anlehnung an EUROPEAN COMMISSION, 2013) auf die Entwicklung des Anlagenparks in BENSIM abschätzen zu können, werden durch IFEU Übersichtsökbilanzen für jeden Konversionspfad bereitgestellt (vgl. Kapitel A 3.1.4 und A 3.2.3). Zur Abschätzung der Auswirkungen einer regionalen Integration der Anlagen auf die Wärme- und KWK Ziele der Bundesregierung werden die berechnete Zusammensetzung des Anlagenparks und die resultierende Produktion an die IZES gGmbH für eine entsprechende Analyse (vgl. Kapitel A 3.1.7) übermittelt.

#### Arbeitsweise

##### Vorarbeiten

Aufgrund der Vielzahl der möglichen Bereitstellungsketten und Kombinationen von Rohstoffen, Technologien und Endnutzungen wurde sich auf relevante Bereitstellungspfade beschränkt. Ausgehend von der Expertise des DBFZ wurden zwei interne Technologieworkshops (06/2012 und 10/2012) durchgeführt. Ziel war es hierbei ausgehend vom heutigen Anlagenpark in Deutschland mögliche technische Entwicklungen, neue Technologien und Kombinationen von Rohstoffen (Reststoffe) und Endnutzungen (bedarfsgerechte Erzeugung, Flugkraftstoffe) und deren Treiber (u. a. Kosten, Umweltauflagen, Förderinstrumente) aufzuzeigen. Ausgehend vom Status quo (DBFZ Anlagendatenbanken, Statistiken) und unter Berücksichtigung zukünftiger Konzepte wurden 20 typische Technologiecluster festgelegt, welche wiederum durch entsprechende Modellkonzepte repräsentiert werden. Diese beinhalten sowohl heute verfügbare als auch zukünftige Technologien, die für die Bioenergiebereitstellung in Deutschland relevant sein können. Die Auswahl der Modellkonzepte und die getroffenen technischen und ökonomischen Annahmen wurden des Weiteren mit Experten des DLR (11/2013) und in einem Side-Event (11/2013<sup>28</sup> zur Statuskonferenz des Förderprogrammes „Energetische Biomassenutzung“ vorgestellt und diskutiert.

<sup>28</sup> Vorträge zum Download unter: <http://www.energetische-biomassenutzung.de/de/veranstaltungen/workshops/workshop-bioenergie-2050/vortraege.html>

Für die Simulation in BENSIM werden zunächst umfassende Technologiedaten (typische Anlagengröße, Produktionskapazität, Investitionskosten, Rohstoffbedarf, Wirkungsgrade (Status quo und jährliche Effizienzsteigerungen), ökonomische Lernraten, Jahresvollstundstunden, Anlagenlebensdauer, Erlöse für Nebenprodukte) für die ausgewählten, repräsentativen und modellhaft abgebildeten Konzepte ermittelt (vgl. A 3.1.3). Für die betrachteten Konversionspfade werden außerdem Übersichtsökobilanzen erstellt. Ebenfalls ermittelt wird für alle Konversionstechnologien die bislang kumulierte installierte Kapazität im Startjahr 2013, da diese eine relevante Basisgröße für die Entwicklung der weiteren Lernkurven darstellt.

Preisentwicklungen für Anlagensubstrate werden für handelbare Biomasse mit Hilfe des MAGNET Modells ermittelt (vgl. Kapitel A 3.1.1). Für nicht handelbare Biomasse (im wesentlichen Wald-Restholz / Stroh / KUP) wird vereinfachend unterstellt, dass die Preisentwicklung der von Weizen folgt, mit der Begründung, dass Weizen die Hauptkonkurrenz um die Flächen darstellt. Basierend auf Startwerten aus 2010 werden so Preise für Anlagensubstrate bis 2050 ermittelt, welche in BENSIM berücksichtigt werden.

#### Zubau und Abbau von Anlagen

Ausgangsbasis für die BENSIM-Simulation ist der bestehende Anlagenpark in Deutschland (Basis: DBFZ-Datenbank) und die kumulierte installierte Kapazität im Jahr 2013. Im ersten Jahr der Simulation erfolgt zunächst eine Analyse der Altersstruktur des Anlagenparks. Alt-Anlagen, die ihre Lebensdauer (derzeit 20 Jahre) bereits erreicht haben, werden abgebaut. Es wird dann überprüft, ob das aktuell verfügbare nachhaltige Biomassepotential (im Folgenden PE-Angebot genannt) durch den noch vorhandenen Anlagenpark bereits vollständig ausgeschöpft werden kann. Ist dies nicht der Fall, werden die am günstigsten verfügbaren Technologien zugebaut. Hierfür werden zunächst die Gestehungskosten (TC)<sup>29</sup> der Technologien ermittelt auf Basis der oben genannten Annahmen, mit der Gleichung:

$$TC_{GJ} = \frac{I_0}{3.6 \cdot v \cdot l \cdot h} \cdot \left( \frac{Cap_t}{Cap_0} \right)^{\frac{\log(1-LR)}{\log 2}} \cdot \frac{i \cdot (1+i)^T}{(1+i)^T - 1} + C_{O\&M} + \frac{P_{feed,t}}{E_{feed} \cdot \eta_t} + P_{feed2} + P_{el} \cdot m_{el} + P_{th} \cdot m_{th} + P_{infra} - P_{byprod} + (m_{CO_2} - m_{CO_2,sub}) \cdot P_{CO_2}$$

Anschließend werden die Technologien nach aufsteigenden Gestehungskosten sortiert. Die Anlagen mit den geringsten Gestehungskosten werden solange zugebaut, bis das PE-Angebot erschöpft ist. Hierbei gilt die Begrenzung, dass ein Zubau neuer Anlagen nur im Umfang von bis zu 30 % der bereits installierten, bestehenden Kapazität pro Jahr und Technologie möglich ist.

In einem anschließenden Schritt wird überprüft, ob die Gestehungskosten neuer Anlagen (die derzeit nicht am Markt, aber potentiell verfügbar sind) niedriger liegen als die Marginal-

<sup>29</sup> Unter Gestehungskosten werden die Kosten verstanden, zu der eine gegebene Technologie eine Einheit eines gegebenen Produktes (hier GJ Strom oder Kraftstoff) herstellen kann, inklusive Investitionskosten. Marginalkosten oder Grenzkosten sind die Kosten exklusive Investitionskosten. Eine übersichtliche Erläuterung zur Berechnung von (Strom)gestehungskosten findet sich beispielsweise in (Kost et al., 2013)

kosten der teuersten bereits vorhandenen Anlagen, die zum Einsatz kämen. Ist das der Fall, dann werden von den neuen Technologien diejenigen mit den niedrigsten Gestehungskosten ausgebaut. Dadurch werden die teuersten Technologien am Markt ersetzt (die Anlagen bleiben aber bis zum Ende ihrer Lebensdauer prinzipiell einsatzbereit, werden also nicht abgebaut). Erfolgt der Ersatz der teuersten Technologie vollständig, sinken die Marginalkosten des Gesamtsystems. Der Zubau neuer Anlagen wird gestoppt, wenn die Marginalkosten des Gesamtsystems niedriger als oder gleich wie die günstigsten Gestehungskosten der neuen Anlagen sind. Für den Zubau gilt die oben bereits genannte Begrenzung (maximaler Ausbau von 30 %). Die mit dem Zubau von Anlagen einhergehenden preissenkenden Effekte werden über Lernkurven berücksichtigt, sodass die Investitionskosten für Neuanlagen mit zunehmender kumulierter installierter Kapazität sinken. Auch Technologien, die nicht zugebaut werden erleben Lerneffekte durch FuE. Diese sind für die BAU-Szenarien entsprechend das Lernen bei einer Verdoppelung der Anlagenkapazität über 10 Jahre, und in den N-Szenarien über drei Jahre. Wenn eine Technologie eine 5% Lernrate hat, ist dies auch die Kostensenkung über 10 bzw. drei Jahre.

#### Produktion

Mit dem nun vorhandenen Anlagenpark wird das PE-Angebot erschöpft. Dabei kommt zunächst die Technologie mit den niedrigsten Marginalkosten zum Einsatz. Ist deren Produktionskapazität ausgereizt, kommt die Technologie mit den nächst höheren Marginalkosten zum Einsatz. Dies wird so lange fortgesetzt, bis das PE-Angebot ausgeschöpft ist. Anlagen, die in der Vergangenheit installiert wurden und deren Marginalkosten höher liegen als die Marginalkosten des Gesamtsystems, produzieren nicht, werden aber auch nicht abgebaut.

#### Nicht modellierte Technologien

Einige der betrachteten Technologien (vgl. Tabelle A-15) werden nicht explizit in BENSIM modelliert, da sie nicht im direkten Konkurrenzgefüge stehen, sondern werden mit vereinfachten Methoden abgeschätzt. Dies betrifft Technologien:

- speziell im Abfall- / Reststoffsektor (Güllekleinanlage, Bioabfallvergärung),
- die derzeit in einer speziellen Anwenderkrise stecken (Mikro-KWK; Anlagen, die nur Wärme produzieren) und
- die zusätzlich stark von den sich ändernden Rahmenbedingungen abhängen.

Diese nicht modellierten Technologien werden über entsprechende Expertenschätzungen (Anlagenanzahl, Endenergiebereitstellung), die den technologischen Fortschritt und die Rohstoffpotenziale berücksichtigen, in allen Szenarien in gleichem Umfang mitgeführt. Ihr Betrieb reduziert das für die Modellierung verfügbare PE-Angebot an Biomasse.

#### Ergebnisse der Berechnungen

BENSIM berechnet, welche Bioenergietechnologien sich wann und unter welchen Bedingungen zur Befriedigung einer gegebenen Bioenergienachfrage gegen andere Bioenergietechnologien durchsetzen. Im Ergebnis liefert das Modell für jede betrachtete Technologie Daten zur zeitlichen Entwicklung der installierten Kapazität, der kumulierten installierten Kapazität, zu Lerneffekten sowie zu Bereitstellungskosten.

Im Zusammenspiel mit den bereitgestellten Ökobilanzen kann abgeleitet werden, welche Treibhausgasemissionen mit der Entwicklung des Anlagenparks einhergehen und welche Emissionsminderungen im Vergleich zu einem fossilen Referenzsystem erreicht werden. Durch die Kopplung des BENSIM-Modells an das MAGNET-Modell und über dieses indirekt auch an das LandSHIFT-Modell, kann der Einfluss der durch den Anlagenpark verursachten Biomassenachfrage auf die Preisentwicklung der Anbaubiomasse untersucht und gleichzeitig das Risiko von durch die Biomassenachfrage verursachten Landnutzungsänderungen abgeschätzt werden.

Durch die Berücksichtigung der Lerneffekte und THG-Emissionen in der Modellierung werden darüber hinaus zwei wichtige Beispiele des Marktversagens in der Modellierung berücksichtigt. Dies sind zum einen die externen Kosten, die durch die Emission von Treibhausgasen verursacht werden und zum anderen der Umstand, dass Investitionen in neue Technologien über Lerneffekte zukünftige Investitionen günstiger machen, ein Effekt, der einzelnen Investoren selber nicht voll zugutekommt, aber volkswirtschaftlich von Vorteil ist.

### A 3.1.4 Übersichtsökobilanzen

#### Kurzübersicht

Die in diesem Projekt betrachteten Fragestellungen werden mittels Übersichtsökobilanzen bearbeitet, die sich an den internationalen Ökobilanznormen (DIN EN ISO 14040 und 14044, Deutsches Institut für Normung e.V. 2006) orientieren. Der Grundansatz dabei ist, den gesamten Lebensweg des Bioenergieträgers bzw. der Bioenergie von der Landwirtschaft bis zu seiner energetischen Nutzung zu untersuchen. In den Fällen, wo Reststoffe betrachtet werden, sind die jeweiligen anderweitigen Verwertungspfade eingeschlossen.

#### Funktion im Modellverbund

Die Reduktion von THG-Emissionen ist ein wesentliches Ziel, das mit dem Ausbau der Erneuerbaren Energien einschließlich der Bioenergie verfolgt wird. Für bestimmte Bioenergieträger (im Wesentlichen Biokraftstoffe) gibt es bereits heute rechtliche Anforderungen, die eine prozentuale Verringerung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum fossilen Referenzenergieträger vorschreiben. Die absolute Höhe der Emissionsminderung (in kg CO<sub>2</sub>eq/MJ) war dabei bislang nicht von Interesse, es galt nur die jeweils gültige Prozhürde zu nehmen.

Bei der Simulation eines Technologiewettbewerbes – wie im Projekt vorgesehen – sind jedoch Angaben über die absolute Höhe an THG-Emissionen bzw. -Einsparungen für jeden betrachteten Konversionspfad notwendig, um den Einfluss unterschiedlich hoher Preise für THG-Emissionen (als eine Möglichkeit zur Internalisierung externer Effekte) modellieren zu können. Diese werden durch IFEU ermittelt und in BENSIM hinterlegt. In einem zweiten Schritt werden die Umweltwirkungen des gesamten Bioenergiesektors in den verschiedenen Szenarien auf Basis der BENSIM-Ergebnisse ermittelt und einander gegenübergestellt.

#### Arbeitsweise

Sämtliche Ökobilanzen werden auf der Basis bestehender Ökobilanzen parametrisiert angelegt. Dadurch können für die einzelnen Zeitpunkte in der Zukunft in Abhängigkeit von den jeweiligen Rahmenbedingungen wie dem landwirtschaftlichen Ertrag, den Umweltwirkungen der Energiebereitstellung sowie den Konversions- und Nutzungseffizienzen die Umweltwirkungen einer Technologie bereitgestellt werden (zu Annahmen bzgl. Ertragssteigerungen und Effizienzgewinnen in der Landwirtschaft siehe [GÄRTNER et al., 2014]). Die Datenübergabe an BENSIM erfolgt in Form von Modulen, welche die Umweltwirkungen für jeweils eine Technologie (oder Technologiegruppe) in den verschiedenen Jahren enthalten. Um die Unsicherheiten zukünftiger technologischer Entwicklungen abbilden zu können, werden die Umweltwirkungen in Form von Bandbreiten dargestellt, die neben typischen Werten auch günstige bzw. weniger günstige Entwicklungen aufzeigen. In BENSIM geht ein Teil der Umweltwirkungen, nämlich die Treibhausgasemissionen, über die zugrunde gelegten CO<sub>2</sub>-Kosten in die Modellierung des Bioenergie-Anlagenparks ein.

Im zweiten Schritt werden aus dem von BENSIM ermittelten Anlagenpark und den Umweltwirkungen der einzelnen Technologien die Auswirkungen des gesamten Bioenergiesektors in Deutschland auf die Umwelt mit Unterstützung von Sensitivitätsanalysen bestimmt. Anhand dessen können die wesentlichen ökologischen Zusammenhänge der energetischen Biomassenutzung aufgezeigt und bewertet werden.

#### Annahmen und Inputparameter

##### Systemgrenzen

Die Systemgrenzen einer Ökobilanz umfassen im Allgemeinen alle Prozesse „von der Wiege bis zur Bahre“, also angefangen von der Rohstoffgewinnung über die Nutzung des Endproduktes bis zur Abfallentsorgung. Dabei werden alle zugeführten Energieträger und stofflichen Inputs sowie die aus dem System abgegebenen Reststoffe und Emissionen in die Berechnung einbezogen. Die Systemgrenzen der Bioenergie-Systeme umfassen dementsprechend den Lebensweg von der Biomasseproduktion und bereitstellung einschließlich aller dafür benötigten Inputs über die Konversion der Bioenergieträger bis hin zur energetischen Nutzung. Bei der Bewertung der Nutzenäquivalenz sämtlicher Haupt- und Nebenprodukte zu Vergleichsprodukten werden Unterschiede in Energiegehalt, Futterwert, Nährstoffgehalte etc. berücksichtigt.

Die Umweltwirkungen der verschiedenen Bioenergie-Systeme werden in den Kontext der Umweltwirkungen entsprechender nicht-erneuerbarer Vergleichssysteme (konventionelle Kraftstoffe, Strommix, Wärmemix) gestellt, um Aussagen über ökologische Vor- bzw. Nachteile der verstärkten Nutzung von Bioenergie bei gleichzeitiger Verdrängung konventioneller Produkte treffen zu können (z. B. Treibhausgaseinsparungen etc.). Dies wird u. a. auch mit Hilfe des Nutzenkorbansatzes (s. u.) geschehen, indem die Umweltwirkungen des gesamten Bioenergiesystems in den verschiedenen Szenarien dargestellt und miteinander verglichen werden.

### Geografischer Bezug

Der geografische Bezug gibt an, für welche Region die Ökobilanz erstellt wird. Der geografische Bezug bestimmt eine Reihe von Bilanzparametern, z. B. landwirtschaftliche Anbaubedingungen (GÄRTNER et al., 2014), Infrastruktur oder verwendete Strom- und Wärmemixe.

Generell ist der geografische Bezug dieser Untersuchung Deutschland. Davon abweichend werden für Importprodukte wie z. B. die meisten fossilen Energieträger die Bedingungen der realen Förder- bzw. Produktionsstandorte bzw. eines Mixes aus den typischen Standorten angesetzt. Für Importbiomasse werden die landwirtschaftlichen Inputdaten wie Herkunftsregion und Erträge projektspezifisch mit TI und CESR abgestimmt.

### Zeitlicher Bezug

Ebenso wie der geografische Bezug ist auch der zeitliche Bezugsrahmen für die Ergebnisse der Ökobilanz bedeutsam. Der zeitliche Bezug bestimmt z. B. rechtliche, technische und energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen. Als zeitlicher Bezug für dieses Vorhaben wird der Zeitbereich von 2010 bis 2050 gesetzt. Ökobilanzdaten werden jahresspezifisch für neun Zeitpunkte im Fünf-Jahres-Raster erstellt.

### Nutzenkorbansatz

In dieser Studie sollen in verschiedenen Szenarien die Umweltauswirkungen der Deckung eines bestimmten Gesamtenergiebedarfs (Nutzenkorb) durch verschiedene Arten der Energiebereitstellung untersucht werden. Gleichzeitig steht nur eine bestimmte Menge an Landwirtschafts- und Forstfläche sowie biogenen Reststoffen zur Verfügung, aus denen der Nahrungs- und Futtermittelbedarf sowie die Bioenergie- und stoffliche Biomassennutzung gedeckt werden müssen. Dazu kommen noch die Abhängigkeiten der einzelnen Bereiche untereinander, wenn beispielsweise die Bioenergiebereitstellung zur Futtermittelproduktion beiträgt (z. B. proteinhaltige Vinasse aus der Bioethanolproduktion). Die Ökobilanz mit Nutzenkorbansatz trägt dem Rechnung, indem sie jeweils Gesamtsysteme (also hier das gesamte Bioenergiesystem in verschiedenen Szenarien und einschließlich der jeweils ersetzten konventionellen Energieträger) miteinander vergleicht und dabei Nutzengleichheit sowie Gleichheit der fixen Ressourcen wie Boden oder Reststoffe aus anderen Wirtschaftszweigen gewährleistet.

### Umgang mit Kuppelprodukten

Bei der Biomasseproduktion und bei Konversionsprozessen fallen unter Umständen Kuppelprodukte an. Die Art und Weise, wie Kuppelprodukte in Ökobilanzen berücksichtigt werden, hat zum Teil erhebliche Auswirkungen auf das Ergebnis. Entsprechend den ISO-Normen 14040 und 14044 für Ökobilanzen ist der sogenannten Systemraumerweiterung Vorrang vor einer Allokation zu geben. Daher werden den Kuppelprodukten in dieser Studie Gutschriften für die durch diese Produkte eingesparten Aufwendungen erteilt. Dies ist eine analoge Vorgehensweise zur Systemraumerweiterung durch das ersetzte Produkt des „Haupt“-produktes. Im Rahmen des Warenkorbansatzes erhält man so die Möglichkeit, nur die Erzeugung der jeweiligen Nettomenge eines Produktes im Gesamtsystem bewerten zu müssen. Dabei wird so vorgegangen, dass in der Regel eine interne Verrechnung der

vermiedenen Umweltlasten aufgrund von Kuppelprodukten erfolgt, um die Ökobilanz des einzelnen Lebensweges konsistent zu machen. Ausnahmen mögen dort sinnvoll sein, wo ein Kuppelprodukt Input eines weiteren modellierten Prozesses ist.

### Strom- / Wärmemix, Verkehrsträgermix

Die Entwicklung der durchschnittlichen Strom- und Wärmemixe sowie der Transportprozesse wird dem Leitszenario 2011 A entnommen (ggf. ergänzt durch IEA-WEO) und zwischen den Szenarien nicht variiert. Als Referenz für die Ökobilanzen wird der fossile („residuale“) Durchschnittstrommix aus Kohle / Gas<sup>30</sup>, der fossile („residuale“) Durchschnittswärmemix aus Gas / Öl bzw. der fossile („residuale“) Durchschnittsmix aus Benzin / Diesel<sup>31</sup> des jeweiligen Jahres zugrunde gelegt.

Darüber hinaus werden die Anteile der nicht-biogenen Erneuerbaren Energien über alle Szenarien identisch gehalten, d. h. Verschiebungen gegenüber dem Referenzszenario (Leitszenario 2011 A) finden nur zwischen Bioenergie (Kraftstoffe bzw. Strom / Wärme) und fossiler Energie statt. Dies bedeutet, dass bei Nutzenkorbberechnungen die nicht-biogenen Erneuerbaren Energien nicht betrachtet werden müssen.

Um diese Zahlen einordnen zu können, wird zusätzlich auch eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der anstelle der o. g. Residualmixe die so genannten Grenzmixe nach Methodenhandbuch (THRÄN et al., 2013) angesetzt werden.

### Datenbasis

Diese Studie zieht im Wesentlichen die Prozess- und Stoffstromdaten aus verschiedenen Ökobilanzdatenbanken und Studien heran, harmonisiert sie und verknüpft sie zu zusammenhängenden Systemen. Unter anderem werden die IFEU-eigene Datenbank in der Ökobilanzsoftware UMBERTO (IFEU, 2014), das offizielle deutsche Modell für die Verkehrsemissionen TREMOD (KNÖRR et al., 2012) sowie allgemeine Ökobilanzdatenbanken wie ecoinvent (FRISCHKNECHT, 2010) und GEMIS (ÖKO-INSTITUT, 2011) verwendet.

### Ergebnisse der Berechnungen

Alle Umweltwirkungen, Inputs und Outputs eines Ökobilanzmoduls werden bezogen auf eine Menge des („Haupt“-)Produkts angegeben.

<sup>30</sup> Kernkraft wird aufgrund des geplanten Atomausstiegs nicht berücksichtigt

<sup>31</sup> Erdgas wird trotz immerhin noch 80 PJ im Jahr 2050 nicht mit in den fossilen Durchschnittsmix aufgenommen, da davon auszugehen ist, dass politisch die Substitutionswirkung auf Benzin und Diesel gewollt ist und damit die Umstellung von benzin- / dieselbetriebenen auf erdgasbetriebene Fahrzeugen parallel zur Umstellung von Benzin- / Dieselantrieb auf Bio-CH<sub>4</sub>- / SNG-Antrieb weitergehen wird. Weitere Hintergründe siehe auch <http://www.ifeu.de/biogas>. Kerosin wird als Flugturbinenkraftstoff nur im Luftfahrtsektor eingesetzt und deshalb nicht mit in den ersetzten Kraftstoffmix integriert. Falls ein biogener Flugturbinenkraftstoff bilanziert wird, so wird als ersetzter Kraftstoff reines Kerosin bilanziert.



Folgende Umweltwirkungen werden im Rahmen dieses Vorhabens untersucht:

- Aufwand nicht erneuerbarer Energieträger (kurz auch: Energieaufwand)
- Treibhauseffekt
- Versauerung
- Nährstoffeintrag in Böden
- Humantoxizität: Emission von Feinstaub und Feinstaubvorläufersubstanzen

Die Sachbilanzgrößen der einzelnen Umweltwirkungen sowie die zugehörigen Äquivalenzfaktoren finden sich in Tabelle A-17. Zur besseren Darstell- und Vergleichbarkeit kann eine Normierung auf deutsche Einwohnertageswerte vorgenommen werden.

Tabelle A-16 stellt die quantitativ untersuchten Umweltwirkungen zusammenfassend dar.

Tabelle A-16: Qualitativ untersuchte Umweltwirkungen

Wirkungskategorie	Einheit	Kurzbeschreibung
Energieaufwand (nicht erneuerbar)	MJ	Energieeinsatz bzw. -einsparung ist ein Indikator der Ressourcenbeanspruchung. Üblicherweise wird in Ökobilanzen die nicht erneuerbare Primärenergie ausgewiesen. Zu den nicht erneuerbaren Energieträgern zählen die fossilen Brennstoffe Erdöl, Erdgas und Kohle sowie Uranerz. Die Primärenergie unterscheidet sich von der Endenergie dadurch, dass auch der Aufwand für die Bereitstellung der Energieträger mit erfasst wird (Förderung, Raffinerie, Transporte etc.). Im Folgenden wird diese Umweltwirkungskategorie der besseren Begrifflichkeit halber mit „Energieaufwand“ bezeichnet.
Treibhauseffekt	kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.	Bezeichnet die Erwärmung der Atmosphäre in Folge der vom Menschen verursachten Freisetzung von klimawirksamen Gasen. Neben Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ) werden auch Methan (CH <sub>4</sub> ) und Lachgas (Distickstoffoxid, N <sub>2</sub> O) sowie eine Reihe von Spurengasen erfasst.
	kg SO <sub>2</sub> -Äquiv.	Verschiebung des Säuregleichgewichts in Böden und Gewässern durch den Eintrag Säure bildender Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Ammoniak und Chlorwasserstoff in Böden und Gewässer (Stichwort „saurer Regen“). Versauerung schädigt sensible Ökosysteme wie Wälder oder Magerwiesen, aber auch Gebäude.
Versauerung	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -Äquiv.	Einbringung von Nährstoffen in Böden natürlicher und empfindlicher Ökosysteme über atmosphärische Deposition. Die Eutrophierung der Böden natürlicher Ökosysteme führt zur Verdrängung seltener und gefährdeter Arten. Die wichtigsten Quellen atmosphärischer Nährstoffdeposition sind Emissionen von Ammoniak und Stickstoffoxiden.
Nährstoffeintrag in Böden		Humantoxische Wirkung von Feinstaub (PM <sub>10</sub> ) in der Luft, der durch direkte Emission freigesetzt werden oder über die Vorläufersubstanzen Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Ammoniak und Schwefeldioxid entstehen kann.
Humantoxizität: Feinstaub	kg PM <sub>10</sub> -Äquiv.	

Tabelle A-17: Untersuchte Umweltwirkungen mit den jeweiligen Äquivalenzfaktoren nach (IFEU, 2014; INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL SCIENCES, 2004; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007; KLÖPPER UND RENNER 1995; DE LEEUW, 2002)

Wirkungskategorie	Einheit	Sachbilanzgröße	Formel	Äquivalenzfaktor
Energieaufwand	MJ kumulierter Primärenergieaufwand aus nicht-erneuerbaren Quellen	Erdöl Erdgas Steinkohle Braunkohle Uranerz	—	—
Treibhauseffekt	kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente (Kohlenstoffdioxid-Äquivalente)	Kohlendioxid fossil Lachgas (Distickstoffoxid) Methan biogen Methan fossil	CO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O CH <sub>4</sub> CH <sub>4</sub>	1 298 25 27,74
Versauerung	kg SO <sub>2</sub> -Äquivalente (Schwefeldioxid-Äquivalente)	Schwefeldioxid Stickstoffoxide Ammoniak Chlorwasserstoff	SO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub> NH <sub>3</sub> HCl	1 0,7 1,88 0,88
Nährstoffeintrag in Böden	kg -Äquivalente (Phosphat-Äquivalente)	Stickstoffoxide Ammoniak	NO <sub>x</sub> NH <sub>3</sub>	0,13 0,346
Humantoxizität: Feinstaub	kg PM10-Äquivalente (aggregierter Parameter)	Partikel Schwefeldioxid Stickstoffoxide Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe Ammoniak	PM10 SO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub> NMHC NH <sub>3</sub>	1 0,54 0,88 0,012 0,64

### A 3.1.5 Ernährungstool

#### Kurzübersicht

Das Modul zur Berücksichtigung der Ernährungssicherheit stützt sich auf die These, dass das Ziel die Gewährleistung einer gesunden Ernährung (in Quantitäten) ist. Diese These wird durch die Definition von Ernährungssicherheit der Weltgesundheitsorganisation untermauert, welche besagt, dass Ernährungssicherheit dann besteht "when all people at all times have access to sufficient, safe, nutritious food to maintain a healthy and active life" (WORLD FOOD SUMMIT, 1996).

Das Modul basiert auf den folgenden Schritten (vgl. Abbildung A-8):

- Einstufung, ob ein Land ein „Hungerland“ ist
- Ermittlung der fehlenden Nahrung in den Hungerländern
- Anteilige Reduktion der verfügbaren Bioenergie in reichen Ländern, um die fehlende Nahrung bereitzustellen

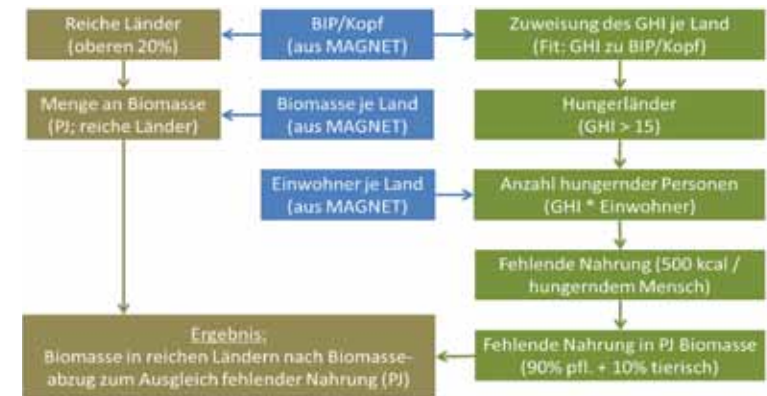


Abbildung A-8: Rechenalgorithmus Ernährungstool (Quelle: Eigene Darstellung)

Im Grundzug wird in dem Modul zur Ernährungssicherheit fehlende Nahrung in Hungerländern durch eine Reduktion von verfügbarer Bioenergie in reichen Ländern ausgeglichen.

#### Funktion im Modellverbund

Die Berücksichtigung von Anforderungen an die Ernährungssicherheit wird aufbauend auf den Ergebnissen der Modellierung in MAGNET durchgeführt (ex-post). Grundsätzlich wird angenommen, dass die globale Verteilung von Nahrungsmitteln funktioniert. Tatsächliche Verteilungsprobleme können im Rahmen der Modellierung nicht abgedeckt werden. Für den Fall, dass in einem Land / Ländergruppe keine ausreichende Ernährung sichergestellt werden kann (Hungergrenzwert unterschritten), kommt es zu einem Biomassefluss aus reichen Ländern.

Dabei werden nur der Länder / Ländergruppen einbezogen, die im Bereich der oberen 20 % der Länder liegen, die Bioenergie konsumieren. Des Weiteren wird in den armen Ländern der Nahrungsmittelkonsum so weit erhöht, bis eine ausreichende Ernährung gesichert ist. Entsprechend wird in den reichen Ländern der Bioenergiekonsum reduziert. Dies bedeutet, dass das globale Biomassepotenzial, welches für die energetische (bzw. stoffliche) Nutzung möglich ist, reduziert wird. Die Zuordnungsebene ist die Fläche.

#### Arbeitsweise

##### Schritt 1: Ermittlung der Hungerländer

Für die Berechnung zur Ernährungssicherheit werden als „Hungerländer“ die Länder berücksichtigt, in denen bereits eine ernste bis gravierende Hungersituation besteht. Die Einstufung, ob ein Land ein Hungerland ist, erfolgt auf Basis des Globalen-Hunger-Indizes (GHI)<sup>32</sup> (VON GREBMER et al., 2013).

32 Der GHI kombiniert drei Indizes: Unterernährung (in%), unterernährte Kinder Alter >5 Jahre (in %), Kindersterblichkeit Alter >5 Jahre (in %)

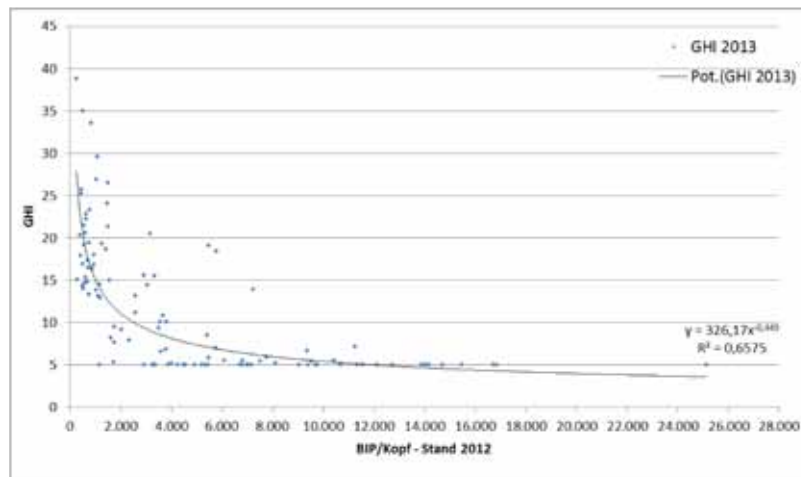


Abbildung A 9: Korrelation zwischen BIP/Kopf und GHI (Quelle: Eigene Berechnung)

Hierzu wird der Zusammenhang zwischen BIP/Kopf und dem GHI in einem Land über eine nicht-lineare Regression beschrieben (Abbildung A 9). Anhand des in MAGNET modellierten BIP/Kopf wird ein GHI für jedes Land und jede Zeitscheibe ermittelt. Als Schwellenwert wird ein GHI von 15 festgelegt, ab dem ein Land als Hungerland eingestuft wird.

### Schritt 2: Ermittlung der fehlenden Nahrung in den Hungerländern

Die wichtigste Kennzahl zur Einstufung einer gesunden Ernährung ist das Nahrungsmittelangebot, umgerechnet in Kalorien pro Tag und Kopf. Ausgehend von einer gesunden Ernährung gibt dieser Indikator Hinweise auf den fehlenden Bedarf des jeweiligen Landes an Nahrungsmitteln. Laut (SEARCHINGER et al., 2013) kann ab einem Wert von 2.300 kcal pro Tag mit einer ausreichenden Ernährung gerechnet werden. Hunger tritt bei einem Wert von weniger als 1.800 kcal pro Tag auf. Auf Basis dieser Angaben zu einer gesunden Ernährung wird für Hungerländer angenommen, dass durchschnittlich 500 kcal pro Tag und hungerrnder Person fehlen.

Als Maß für die Anzahl der hungernden Menschen in einem Hungerland wird der GHI herangezogen, der annäherungsweise dem Prozentsatz der hungernden Menschen in einem Land entspricht. Als Produkt aus dem GHI (in %), der Bevölkerungszahl und den oben genannten 500 kcal ergibt sich die Menge an fehlender Nahrung in einem Hungerland.

### Schritt 3: Anteilige Reduktion der verfügbaren Bioenergie in reichen Ländern, um die fehlende Nahrung bereitzustellen

Aus den Ergebnissen in Schritt 2 ergibt sich eine Menge an weltweit fehlender Nahrung. Es wird angenommen, dass sich diese Nahrung zu 90 % aus pflanzlichen und zu 10 % aus tierischen Produkten zusammensetzt. Der Wert in kcal wird in Bioenergie (PJ) umgerechnet. Dabei wird der für die pflanzliche Nahrung angenommen, dass sie 1:1 der Menge an Bioenergie entspricht. Für tierische Produkte wird hingegen die Menge an Futter, die zur Produktion der Tierprodukte nötig ist, veranschlagt.

Die in PJ umgerechnete Menge an fehlender Nahrung wird zuletzt von der verfügbaren Bioenergie in den 20 % der reichsten Länder abgezogen. Dazu werden auf Basis des BIP/Kopf (Daten aus MAGNET) je Zeitscheibe die 20 % der reichsten Länder identifiziert und anteilig zur genutzten Bioenergie in einem Land die Reduktion durchgeführt. Im Ergebnis zeigt das Modul damit die um den Hunger korrigierte Biomassemenge, die in dem jeweiligen Land noch zur Verfügung steht.

In dem Modul zur Ernährungssicherheit können die Schwellenwerte/Annahmewerte zum GHI (Auswahl der Hungerländer), zum Anteil an tierischer Nahrung, zur Menge an fehlenden kcal je hungernden Mensch und zum BIP/Kopf (Ermittlung reicher Länder) variiert werden, so dass Sensitivitäten bzw. „Extrem“-Berechnungen möglich sind und deren Effekte auf die „korrigierte“ Biomassemenge veranschaulicht werden können.

### Annahmen

Das Modell geht von der Annahme aus, dass je geringer das BIP/Kopf in einem Land ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Land unter Nahrungsmittelunterversorgung leidet. Dafür wurde ein Wert von 15 (gemessen am GHI) festgelegt. Des Weiteren wird angenommen, dass den Ländern, die einen GHI von größer bzw. gleich 15 haben, eine tägliche Kalorienmenge von 500 kcal pro Person fehlt. Die dritte Annahme ist, dass reiche Länder den Mangel an Nahrungsmitteln ausgleichen müssen. Dazu wurde festgelegt, dass dies Länder betrifft, die zu den 20 % mit dem höchsten BIP/Kopf zählen. Das Modell ist jedoch so angelegt, dass diese Annahmen bzgl. Sensitivitätsanalysen variabel sind.

### Ergebnisse der Berechnungen

Das Ergebnis der Berechnungen ist die um den Hunger reduzierte Menge an potenziell nutzbarer Bioenergie in Ländern, die zu den 20 % reichsten Ländern (gemessen am BIP/Kopf) zählen.

### A 3.1.6 Bewertung flächenbezogener Risiken

#### Kurzübersicht

Die Produktion von Biomasse kann zu negativen Auswirkungen auf die Umwelt führen. Beispielsweise kann Biomasse von Flächen stammen, die ein hohes Erosionsrisiko aufweisen, oder von Flächen die vor einer Ackerbaulichen Nutzung einen hohen Wert für die biologische Vielfalt darstellten oder einen hohen Gehalt an Kohlenstoff aufwiesen. Das Ziel der Bewertung von flächenbezogenen Risiken im Vorhaben ist es einzuschätzen, mit welchen Risiken für die Umwelt die in Deutschland energetisch genutzte Biomasse behaftet ist. Bei der Bewertung werden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Risiken für eine Reduktion der Bodenfruchtbarkeit
- Risiken für den Verlust der biologischen Vielfalt durch Flächenumwandlung
- Risiko von Flächenumwandlung

#### Funktion im Modellverbund

Es erfolgt eine ex post Betrachtung der Ergebnisse aus den Modellen MAGNET und LandSHIFT.

#### Arbeitsweise

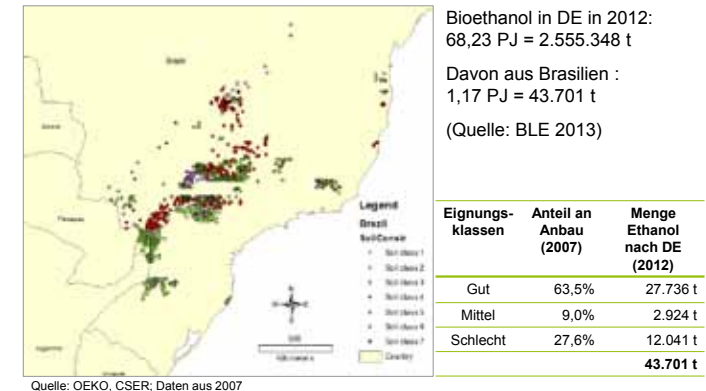
Als Ergebnisse der Interaktion von MAGNET und LandSHIFT stehen Zellinformationen zur Landnutzung (LandSHIFT) sowie Biomasseproduktion in Ländern und Importe nach Deutschland (MAGNET) zur Verfügung (z. B. Anbau von Zuckerrohr nach Umwandlung von Savanne). Diese Information wird genutzt, um eine Risikobewertung für die Biomasse, die in einem Land produziert wird, durchzuführen.

Bei der Berechnung der Flächenanteile bei der Bewertung der Auswirkung auf Böden und auf die Biologische Vielfalt wird in gleicher Weise wie bei der Ökobilanzierung in Kapitel A 3.1.4 eine Allokation vorgenommen, wenn Anteile des Rohstoffs anderweitig genutzt werden. Dies führt zu einer Reduktion der genutzten Fläche für Bioenergie. Je nach Land und Feldfrucht werden 35 % (z. B. Ölsaaten in Argentinien) bis 100 % (z. B. KUP in Deutschland) der Anbaufläche der Rohstoffproduktion für Bioenergie zugewiesen.

#### Risiken für eine Reduktion der Bodenfruchtbarkeit

Die Risikobewertung für eine Reduktion der Bodenfruchtbarkeit betrachtet alle Feldfrüchte, die als Bioenergiesubstrat in Deutschland eingesetzt werden. In dem jeweiligen Erzeugerland wird analysiert, wie viel Biomasse auf Böden mit guter Eignung für eine landwirtschaftliche Nutzung (Gut = Klassen 1-4 des IASA-Bodendaten „soil-constrained-combined [Plate 27]“), auf Böden mit mittlerer Eignung (Mittel = Klasse 5-6) und auf Böden mit schlechter Eignung (Schlecht = Klasse 7-8) produziert werden. Hieraus ergibt sich ein Anteil an Biomasse, der auf Böden mit guter, mittlerer und schlechter Eignung für eine landwirtschaftliche Nutzung stattfindet. Als Indikator wird angenommen, dass in der Tendenz mit Abnahme der Eignung von Böden für eine landwirtschaftliche Nutzung das Risiko für eine Reduktion der Bodenfruchtbarkeit steigt.

Es wird dann davon ausgegangen, dass Importe dieser Biomasse nach Deutschland den gleichen Anteil an geeigneten Böden aufweist. Dies ist für Bioethanol aus Brasilien exemplarisch für den heutigen Zustand in Abbildung A-10 dargestellt. In Brasilien befinden sich 63,5 % der Zuckerrohrflächen auf Flächen mit einer guten Eignung für eine landwirtschaftliche Nutzung, 9 % auf Flächen mit einer mittleren Eignung und 27,6 % auf Flächen mit einer schlechten Eignung. Dies bedeutet, dass im Jahr 2012 12.041 t aus Brasilien nach Deutschland importiert wurden, von Böden mit einer schlechten Eignung für eine landwirtschaftliche Nutzung stammen.



Bioethanol in DE in 2012:  
68,23 PJ = 2.555.348 t

Davon aus Brasilien :  
1,17 PJ = 43.701 t

(Quelle: BLE 2013)

Abbildung A-10: Räumliche Verteilung des Zuckerrohranbaus in Brasilien nach Bodenrisikoklassen sowie Importmengen von Bioethanol aus den Risikoklassen L, M und H nach Deutschland

#### Risiken für den Verlust der biologischen Vielfalt durch Flächenumwandlung

Die höchsten Risiken für den Verlust der biologischen Vielfalt gehen von der Zerstörung von Lebensraum aus. In dem Vorhaben fokussiert die Bewertung des Risikos für den Verlust der Biologischen Vielfalt daher auf Flächenumwandlungen, die zu einer deutlichen Änderung von Habitaten führt. Hierbei wird die Umwandlung von Primärwald, Schutzgebieten, Wald und extensivem Grünland hin zu Anbauflächen (Acker oder Plantage) berücksichtigt. Tabelle A-18 stellt die unterschiedliche Risikoeinstufung je nach Ausgangszustand einer Fläche dar. Werden Primärwald- oder Schutzgebietsflächen zu Anbauflächen, birgt dies hohe Risiken für den Verlust der biologischen Vielfalt. Für den übrigen Wald, extensives Grünland, Feuchtgebiete und Torfmoor werden die Risiken als mittel eingestuft. Bei anderen Ausgangsflächen liegt ein niedriges Risiko für den Verlust der biologischen Vielfalt vor. Die Risikoeinstufung von bereits genutztem Grünland ist im Länderkontext zu bewerten und kann niedrig bis hoch sein.

Für die Betrachtung der Nutzungsänderung ist es nötig, zwei Zeitpunkte miteinander zu vergleichen. Da angenommen wird, dass vor allem der kumulative Effekt der Nutzungsänderungen von Flächen über den gesamten Modellierungszeitraum von Bedeutung ist, wird für die Bewertung der Risiken für den Verlust der biologischen Vielfalt durch Flächenumwandlung das Jahr 2007 mit den Jahren 2030 und 2050 verglichen.

In gleicher Weise wie für die Betrachtung der Eignung von Böden für eine landwirtschaftliche Nutzung dargestellt, wird analysiert, welche Feldfrucht in Erzeugerländern auf umgewandelten Flächen angebaut, welche Risikoverteilung sich für die angebaute Bioenergie-substrate ergibt und wie viel dieser Biomasse in Deutschland genutzt wird.

Tabelle A-18 Risikoeinstufung für den Verlust der biologischen Vielfalt bei Nutzungsänderungen

Nutzungsänderung (2007 bis 2050)	Risikoeinstufung für den Verlust der biologischen Vielfalt
Primärwald zu Anbaufläche	H (high)
Schutzgebiet zu Anbaufläche (ohne bestehende Anbaufläche und intensivem Grünland)	H (high)
Wald zu Anbaufläche	M (medium)
Ungenutztes Grünland zu Anbaufläche	M (medium)
Feuchtgebiete zu Anbaufläche	M (medium)
Torfmoor zu Anbaufläche	M (medium)
Genutztes Grünland zu Anbaufläche	L (low) – H (high)
Andere Flächen zu Anbaufläche	L (low)

#### Risiko von Flächenumwandlung

Im Rahmen der Bewertung der Risiken für den Verlust der biologischen Vielfalt durch Flächenumwandlung werden Nutzungsänderungen in der Berechnung genutzt. Die Darstellung der Bioenergie, die von umgewandelten Primärwäldern, Wald, ungenutztem / genutztem Grünland, Feuchtgebieten oder Torfmoor stammt, kann auch als einzelne Parameter ausgewiesen werden (z. B. Bioethanol ohne Umwandlung und mit Umwandlung von ungenutztem Grünland). Diese Parameter erlauben eine Einschätzung des Effekts der Bioenergieproduktion auf die Flächentypen.

#### Berücksichtigung der Anforderungen der RED in der Ergebnisdarstellung

Die Nachhaltigkeitsanforderungen der RED stellen im Prinzip ein Importverbot von Biokraftstoffen bzw. deren Substraten nach Europa dar, die die Anforderungen nicht erfüllen. Dies bedeutet aber, dass die nicht nachhaltig produzierte Biomasse in anderen Ländern genutzt wird. Um diese Effekte möglichst transparent zu machen, werden die Ergebnisse der Bewertung der flächenbezogenen Risiken in unterschiedlicher Weise dargestellt (spielt insbesondere im Szenario BAU eine Rolle):

Annahme von Importbeschränkungen von Biomasse, die die Anforderungen der RED nicht erfüllen (z. B. keine Biomasse von umgewandelten Primärwaldflächen).

Keine Annahme Importbeschränkungen von Biomasse, die die Anforderungen der RED nicht erfüllen (z. B. Biomasse von umgewandelten Primärwaldflächen zugelassen).

An den Unterschieden zwischen diesen beiden Darstellungen lässt sich ablesen, wie viel Biomasse mit einem hohen oder mittleren Risiko für die Umwelt durch die Regelungen der RED nicht nach Europa gelangt. Dies stellt einen Indikator für die Einschätzung der Größenordnung indirekte Landnutzungsänderungen dar.

#### A 3.1.7 Regionale Effekte

##### Kurzübersicht

Regionale Märkte von Biomasse sind auf Grund der niederkalorischen Energieträger und der Akteursstrukturen informell (WERN et al., 2013). Dies zeigt sich z. B. im Bereich der Preise für Landschaftspflegeholz<sup>33</sup> im Norden und Süden Deutschlands. Durch die Bewertung der regionalen Effekte im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen können Auswirkungen der in BENSIM modellierten Szenarien auf die regionalen Angebote von Biomasse modelliert werden. Im Ergebnis stehen v. a. die Auswirkungen auf die regionale Bereitstellung von Strom und Wärme.

##### Funktion im Modellverbund

Durch die Untersuchung der regionalen Effekte können die Wahrscheinlichkeit einzelner Szenarien sowie die Auswirkungen auf den Wärmemarkt aber auch auf die Rolle der Biomasse im Strommarkt (Ausgleich der fluktuierenden EE durch Biogas) rückgekoppelt werden. Dies wiederum erlaubt im Idealfall für ein bestimmtes Biomasseszenario regional untermauerte Rückschlüsse auf die derzeitigen Szenarien der Energiebereitstellung in Deutschland bzgl. Wärme und KWK.

##### Arbeitsweise

Im Rahmen des Projektes KomInteg<sup>34</sup> wurden sechs Indikatoren berechnet, mit denen alle deutschen Kommunen in zehn kommunale Bioenergie Cluster aufgeteilt werden konnten. Die sechs Indikatoren sind: Einwohnerzahl, Ackerfläche, Waldfläche, Viehbestand (GVE), Strohmenge und Grasmenge abzgl. Rauhfutterbedarf. Abbildung A-11 zeigt beispielhaft für ein Cluster die biogenen Energieangebote für verschiedene Biomassen in GJ sowie die verschiedenen Energieverbräuche, aufgeteilt in Wärme und Strom sowie „privat“ und „Wirtschaft“. Die Energieverbräuche sind jeweils aufgeteilt in die Jahre 2010, 2020 und 2030 und aus den Langfristszenarien 2012 (NITSCH et al., 2012) abgeleitet.

<sup>33</sup> vgl. EUWID Recycling und Entsorgung 11/2011

<sup>34</sup> Im Auftrag des BMU, FKZ: 03KB066 A-C



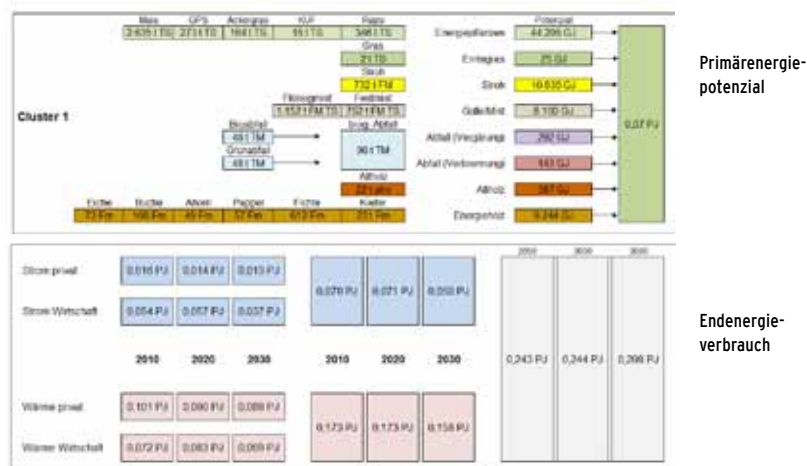


Abbildung A-11: Clusterspezifische biogene Energiepotenziale und Energieverbräuche am Beispiel des Cluster 1

Diese Daten sind Grundlagen für ein Technologieset, welches durch das Fraunhofer Um-sicht Institut erarbeitet wird. Hier werden Cluster spezifische Technologien für 2010, 2020 und 2030 abgeleitet. Zusätzlich wurden für das Projekt Meilensteine 2030 die Kommunen in Deutschland mit über 70 Indikatoren beschrieben. U.a. sind auch die Kaufkraft, die Steuereinnahmen und die Beschäftigung (2010, 2020 und 2030) in der Datenbank enthalten. Die Daten sind auch in einer GIS Datenbank georeferenziert.

Im Rahmen des Meilensteine Projektes werden folgende Fragestellungen adressiert:

- Welche Auswirkungen haben die im Meilensteine Projekt entwickelten Szenarien für die regionale Bereitstellung von Strom und Wärme?
- Ausgehend von Frage 1: Welche Auswirkungen haben die Szenarien auf die nationalen Ziele der biogenen Strom- und Wärmebereitstellung und der KWK Ziele?
- Welche nationalen Handlungsbedarfe können für die verschiedenen Szenarien aus kommunaler Sicht insbesondere für die Wärmeversorgung abgeleitet werden?

Dabei wird die erarbeitete Datenbasis genutzt, um mit Hilfe von Eingangsparametern aus BENSIM empirisch die Auswirkungen der Szenarien zu beschreiben. Der „Referenzwert“ in 2010, 2020 und 2030 ist jeweils berechnet über den in KomInteg hinterlegten kommunalen Technikmix. Mit diesem werden die im Meilensteine Projekt berechneten Szenarien verglichen. Dies erlaubt einen Vergleich des aus heutiger Sicht optimalen regionalen Energiemix mit den aus globalen Zusammenhängen berechneten Szenarien des Meilensteine Projektes.

#### Annahmen

Wichtigste Annahme der Arbeiten ist es, dass Biomasse zur Wärmeenergiebereitstellung ein regional gehandeltes Gut ist, welches durch informelle Märkte bestimmt ist. Für Biogas-substrate ist dieser Zusammenhang auf Grund der Nichttransportwürdigkeit klar gegeben. Für Holz gilt dies nur in Anlagen, welche Scheitholz, NaWaRo-Holz-hackschnitzel inkl. Landschaftspflegeholz verfeuern (WERN et al., 2013). Zusätzlich gelten die im Projekt KomInteg hinterlegten Annahmen (IZES et al., 2014) bzgl. der kommunalen Indikatoren.

#### Ergebnisse der Berechnungen

Insbesondere werden Aussagen zu folgenden Auswirkungen erwartet:

- Veränderung des Anteils EE an der Strombereitstellung
- Veränderung des Anteils möglicher biogener KWK
- Anteil biogener Wärme an Wärmebereitstellung aus „eigenen Potenzialen“
- Veränderungen der regionalen Investitionen (€) in biogene Energiebereitstellung

## A 3.2 Modelle und Module: Schnittstellen und Datenfluss

Sollen die Wechselwirkungen, die sich bei der energetischen Nutzung von Biomasse von der Landnutzung bis hin zum Endenergieeinsatz im globalen Kontext ergeben, umfassend analysiert und dargestellt werden, stellt die dynamische Koppelung von Angebots- und Nachfragemodellen eine Möglichkeit hierzu dar. Jedoch ist ein solches Vorhaben sehr komplex und die Ergebnisse der Berechnungen sind aufgrund vielfältiger, nicht immer nachvollziehbarer Rückkopplungseffekte in der Validierung schwierig. Als erster Schritt wird daher eine weniger dynamische Modellkoppelung gewählt, in der die kumulierte Nachfrage nach Bioenergie in bestimmten Einsatzbereichen als Eingangsgröße in die Landnutzungs- und Technologie Modelle eingeht und damit das (zunächst starre) Gelenk zwischen den Systemen darstellt. Dadurch wird sichergestellt, dass:

- die Resultate in einem praxisrelevanten Ergebnisraum liegen (nämlich den Bioenergienutzungsbereichen, die politisch relevant sind),
- die Folgen unterschiedlicher Ausgestaltung der Bioenergiepolitik in einem gegebenen konsistenten Rahmen der Energiewende hinreichend genau dargestellt werden können.

### A 3.2.1 LandSHIFT – MAGNET

Im Projekt „Meilensteine 2030“ kommen verschiedene Modelltypen zum Einsatz. LandSHIFT als räumliches Landnutzungsmodell bildet die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen als eine Komponente des gesamten Landnutzungssystems in einer Region ab. Dazu nutzt es naturräumliche und biophysikalische Faktoren wie Topographie, Bodenqualität, Klima und Ertragspotenziale, um die Konkurrenz verschiedener Landnutzungen räumlich und zeitlich abzubilden. Das zweite Modell MAGNET bildet landwirtschaftliche Produktion im ökonomischen Kontext ab, bei dem der Agrarsektor im Wettbewerb um knappe Ressourcen (Boden, Arbeit und Kapital) mit anderen Branchen steht und sich Preis-Mengenkombinationen im Zeitablauf ändern.

Somit werden in „Meilensteine 2030“ komplementäre Eigenschaften beider Modelltypen genutzt, um die Verfügbarkeit von Biomasse für die Verwendung in unterschiedlichen Nutzungsrichtungen abzubilden.

MAGNET ermittelt Produktion, Verbrauch und Handel von Gütern für die einzelnen Regionen. Ein wichtiger Produktionsfaktor in der Landwirtschaft ist Boden. Das Angebot an Boden in jeder Region ist in MAGNET variabel, abhängig vom Bodenpreis und von der maximal verfügbaren Fläche, die landwirtschaftlich genutzt werden kann bzw. darf. Letztere ist in MAGNET exogen und wird in der gekoppelten Modellversion von LandSHIFT vorgegeben. Die gesamte Nachfrage nach Boden ist die Summe der Nachfrage nach Boden der einzelnen beschriebenen Ackerkulturen. Die Nachfrage nach Boden hängt von den Ernteerträgen pro Fläche ab, diese variieren für Produkte, Länder und Szenarien. Durch Gleichsetzen von Angebot und Nachfrage entstehen der endogene Preis und die tatsächlich genutzte Menge an landwirtschaftlicher Produktion für die einzelnen Produkte (Weizen, Mais etc.).

Die Produktionsmenge pro Kultur und Region wird an LandSHIFT weitergeben und in ein räumliches Anbaumuster übersetzt.

In der technischen Umsetzung dieser Modellkopplung läuft MAGNET zunächst separat und gibt Ertragsänderungen über die Zeit sowie Produktionsmengen an LandSHIFT. LandSHIFT verteilt die Produktion in die Fläche und ermittelt einen neuen Durchschnittsertrag pro Kultur, Region und Zeitabschnitt, der an MAGNET übergeben wird. Der neue Durchschnittsertrag in MAGNET führt zu einer geänderten Flächennachfrage und entsprechend höheren oder niedrigeren Produktionsmengen. Diese Produktionsmengen werden wiederum durch LandSHIFT verteilt und der neu bestimmte Durchschnittsertrag geht erneut an MAGNET. Diese Iteration wird fortgesetzt bis beide Modelle gleiche genutzte Flächen pro Kultur und Region ausweisen. Durch die Kopplung beider Modelle werden so die jeweiligen endogenen Komponenten (Preise, Mengen in MAGNET und biophysikalische Bedingungen in LandSHIFT) in der Analyse kombiniert berücksichtigt.

Die folgende Tabelle fasst die Schritte der Modellkopplung stichpunktartig zusammen:

Tabelle A-19: Schritte der Modellkopplung zwischen MAGNET und LandSHIFT

Nr.	Was
1	Vereinheitlichen der Startwerte Flächen (ha) Menge (t)
2	Festlegen der maximal möglichen Agrarfläche von LandSHIFT und MAGNET gemeinsam mit Öko-Institut: Landwirtschaftliche Nutzung von Ackerfläche und Brachland erlaubt, die Nutzung von Wald und Schutzgebieten nur in bestimmten Ländern.
3	MAGNET- bestimmt und übergibt Produktions- und Ertragsänderungen (technologisch) an LandSHIFT
4	LandSHIFT bestimmt und liefert durchschnittliche Ertragsänderungen und Flächennutzung/Flächenpotentiale an MAGNET
5	Vergleich Flächennutzung in beiden Modellen
6	Wiederholung 3 & 4 bis Flächennutzung konvergiert (siehe 5).

### A 3.2.2 MAGNET – BENSIM

Damit MAGNET korrekte Preissignale an BENSIM liefern kann ist es unter anderem notwendig, die globale und nationale Nachfrage an Biomasse für die energetische Nutzung und den damit verbundenen Bedarf an Anbaufläche zu ermitteln, damit diese in MAGNET berücksichtigt werden können.

Für die KS-Szenarien wird die globale Nachfrage nach Kraftstoffen der ersten und zweiten Generation auf der Basis von Daten der IEA ([IINAS, 2014] in Anlehnung an [IEA, 2014]) abgeleitet und über Biokraftstoffquoten / -mandate für Biodiesel und Bioethanol bzw. über einen Flächenbedarf für Kraftstoffe der zweiten Generation in MAGNET berücksichtigt.

Die Entwicklung der nationalen Nachfrage nach Kraftstoffen der ersten und zweiten Generation wird in einem ersten Schritt auf der Basis von Ergebnissen aus Experten-Workshops und -Interviews sowie in Anlehnung an Angaben aus den Langfristszenarien 2012 abgeschätzt. Hierfür wird angenommen, dass die Menge an nachhaltig verfügbarer Biomasse aus den Langfristszenarien (NITSCH et al., 2012) von 1550 PJ der nachgefragten Menge an Biomasse in den Meilensteine 2030 Szenarien in 2050 entspricht.

Der technische Entwicklungsfortschritt wird zwischen den Modellen abgestimmt, der bei den Technologien erwartet werden kann, beispielsweise eine Verbesserung der Konversionsrate von Ölsaaten zu Pflanzenöl. Mit den abgestimmten Konversionseffizienzen, der gegebenen nationalen wie globalen Biomassenachfrage und der verfügbaren Fläche ermittelt MAGNET relative Preisänderungen für heimische und importierte Waren nach Herkunft separat und übergibt an BENSIM die durchschnittliche Preisentwicklung aus dem gewichteten Preis für heimische und importierte Güter. Da BENSIM absolute Preise benötigt, werden in BENSIM zunächst Startpreise für in MAGNET erfasste Rohstoffe ermittelt und abgestimmt. Die Projektionen der relativen Preisänderungen aus MAGNET liefern dann die für BENSIM notwendigen Preisentwicklungen bis 2050. Mit diesen Preisen wird dann in einem ersten Durchlauf die Entwicklung des Anlagenparks bis 2050 simuliert. Die sich aus diesem Anlagenpark ergebende Nachfrage nach Kraftstoffen der ersten Generation sowie Flächen für Kraftstoffe der zweiten Generation werden wieder an MAGNET übermittelt. Auf dieser Basis ermittelt MAGNET erneut relative prozentuale Änderungen von Mengen und Preisen, welche dann wieder für eine Simulation der Anlagenparkentwicklung genutzt werden. Diese Iteration erfolgt so lange, bis die Entwicklung des Anlagenparks in BENSIM robust ist.

Für Rohstoffe, die in MAGNET nicht oder nur unzureichend abgebildet sind (Stroh sowie Holz) werden ebenfalls Startpreise recherchiert. Die Preisentwicklung erfolgt für diese Stoffe in Anlehnung an die Weizenpreisentwicklung.

Diese gesamte Kalibration des Modellverbundes wird für jedes Szenario vorgenommen und ist exemplarisch in der folgenden Tabelle zusammengefasst dargestellt.

Tabelle A 20: Schritte der Modellkopplung zwischen MAGNET und BENSIM

Nr.	Was
0	Bioenergienachfrage Deutschland DBFZ -> TI
0a	Technischer Fortschritt DBFZ -> TI (min/max)
0b	Technologiemixentwicklung BENSIM an MAGNET
1a	Überprüfen Rohstoffpreise als Startwert (für 2010) TI -> DBFZ
1b	Erster MAGNET Lauf => Rohstoffpreisänderungen (bzw. Mix der Agrarrohstoffe zur Biokraftstoffproduktion) MAGNET an BENSIM
2a	Erster BENSIM Lauf => Bioenergienachfrage DBFZ -> TI
3a	Erneuter MAGNET Lauf => Rohstoffpreise (s. o.) MAGNET an BENSIM
3b	Erneuter BENSIM Lauf => Bioenergienachfrage BENSIM an MAGNET (s. o.)
4	Wiederholung der Schritte 3a und 3b. Stoppkriterium: Technologiemixentwicklung in BENSIM robust

### A 3.2.3 BENSIM – Übersichtsökobilanzen

Um möglichst exakte Ökobilanzen für die in BENSIM betrachteten Konversionstechnologien und Bereitstellungspfade erstellen zu können, sind exakte Kenntnisse der verwendeten Technologien und spezifischer Technologieparameter (z. B. Wirkungsgrade, technische Limits, technologische Lernraten) nötig. Das DBFZ steht daher diesbezüglich in engem Austausch mit IFEU. Darüber hinaus erfolgt ein Austausch und Abgleich von Annahmen zwischen IFEU und CESR sowie TI, da einzelne Parameter, welche für die Erstellung von Ökobilanzen relevant sind (GÄRTNER et al., 2014) ebenfalls für die Modelle LandSHIFT und MAGNET relevant sind und im Modellverbund abgestimmt sein müssen. Darüber hinaus sind Ergebnisse aus diesen beiden Modellen (z. B. Rohstoffherkunft) für die Erstellung von Ökobilanzen relevant, sodass auch hier ein enger Austausch erfolgt.

Die erstellten Ökobilanzen enthalten Angaben zu Umweltauswirkungen der einzelnen betrachteten Bereitstellungspfade, darunter das Treibhausgaspotential. Diese Größe wird in den BENSIM Berechnungen berücksichtigt, indem den Treibhausgasemissionen Kosten zugewiesen werden, die sich auf die Wirtschaftlichkeit der Anlagen und damit auf die Rangfolge der Technologien auswirken.

Der zwischen BENSIM und den Übersichtsökobilanzen notwendige Abstimmungsprozess ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle A 21: Schritte der Modellkopplung zwischen BENSIM und den Übersichtsökobilanzen

Nr.	Was
1a	Technologiecluster aus BENSIM
-	Welcher Rohstoff wird eingesetzt (national/global)?
-	Woher kommen die eingesetzten Rohstoffe?
1b	Wirkungsgrade aus Expertenschätzung (Technologieworkshops und Interviews)
-	Ertragssteigerung
-	Erträge
1c	Additiv ggf. nicht-modular aufgebaute externe Ökobilanzen von HTC/Torrefizierung
1d	Für die Berechnung der Referenz ist der Energiemix aus den Langfristszenarien 2012 (DLR) notwendig
2	Technologiespezifische THG-Bilanzen -> mit Referenz-Substitut Bezugseinheiten: Kraftstoff – UW/GJ Kraftstoff Strom – UW/kWh Strom Wärme – UW/MJ Wärme KWK – UW/ kWh Strom
3	BENSIM – Ergebnis (Warenkorb) Anlagenpark, Anlagenanzahl, Anlagenkapazität, jährliche Produktion, CO <sub>2</sub> -Vermeidung gegenüber dem Referenzsystem, Kosten/MJ Energie

### A 3.2.4 BENSIM – Regionale Effekte

Für die die Berechnungen übergibt das DBFZ folgende Daten an die IZES gGmbH für jedes Meilensteine Szenario für alle Zeitscheiben bis 2050:

- Anzahl, Art und durchschnittliche Größe der Anlagen
- Durchschnittliche Menge und Energiegehalt der Input Biomasse pro Anlage
- Anlagen spezifische Biomassen aus dem Inland
- Jährliche Outputs an elektrischer und thermischer Energie inkl. dem KWK Anteil oder aber an Energieträgern (z. B. Biomethan oder Kraftstoff)
- Kosten pro kW<sub>el</sub>.

### A 3.2.5 MAGNET- Tool zur Bewertung der Ernährungssicherung

Das Modell zur Ernährungssicherheit ist als ex post-Modell angelegt. Von MAGNET werden Daten zum pro Kopf Einkommen (in USD/Kopf), zur Bevölkerung und zur Bioenergienachfrage der ersten Generation (in PJ) der Länderaggregate an das Ernährungssicherungstool übergeben. Durch die Anlage einer ausschließlichen ex post Bewertung werden für diesen Projektbereich keine Rückkopplungseffekte aus den Ergebnissen des Ernährungssicherungstools an MAGNET berücksichtigt. Das Ernährungssicherungstool generiert einen „Hungerkoeffizienten“ und berechnet den „Mangel an Nahrungsmitteln“ in Energieeinheiten sowie die um den Hunger korrigierte Menge an Biomasse, ebenfalls in Energieeinheiten. Die Berechnung der Daten erfolgt dabei entlang der Zeitscheiben bis 2050.

## A 3.3 Optimierungsbedarf / Herausforderungen / Grenzen

An dieser Stelle soll kurz darauf eingegangen werden, an welchen Schnittstellen es Probleme bei der Modellkopplung / beim Datenaustausch gibt und an welchen Punkten einzelne Modelle / Module derzeit an ihre Grenzen stoßen

### A 3.3.1 MAGNET

Weder Strom noch Wärme aus Biomasse ist einzeln abgebildet (dies ist in anderen Sektoren aggregiert)

Lösung: Benötigte landwirtschaftliche Flächen zur Strom und Wärme Erzeugung werden exogen festlegt. Diese Flächen werden aus der landwirtschaftlichen Produktion genommen und erhöhen so den Druck auf die Ressource Land. Annahme: Strom und Wärme aus Biomasse ist nicht über Ländergrenzen hinweg handelbar, d.h. der Einfluss von Strom und Wärme aus Biomasse auf andere Länder kommt durch eine erhöhte Nachfrage von Lebensmittel zustande, die nun nicht mehr im eigenen Land produziert werden. Dazu wird in MAGNET der für die Biogaserzeugung benötigte Flächenbedarf von der verfügbaren Agrarfläche abgezogen.

Nicht-handelbare Biomasse ist im Modell nicht abgebildet. Es gibt keine landwirtschaftlichen Reststoffe in MAGNET.

Lösung: Aufschlüsselung des Biomasse-Primärenergiebedarfs in MAGNET-relevante Biomasse und für das Modell irrelevante Biomasse. Relevante Biomasse ist alle flächenrelevante Anbaubiomasse. Diese kann handelbar (klassische Agrarrohstoffe wie z. B. Weizen) oder nicht-handelbar (z. B. Holzhackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen) sein. Irrelevante Biomasse ist weder handelbar noch flächenrelevant und wird in MAGNET nicht für bioenergetische Zwecke nachgefragt, sondern lediglich exogen, aufgrund von Experteninterviews und Literaturwerten, abgeschätzt. Diese exogen festgelegte Menge an Biomasse wird in BENSIM unterschiedlich berücksichtigt. Einerseits als Rohstoffe, deren Preise über exogene Annahmen definiert werden (z. B. Stroh, Restholz) und andererseits fließt eine bestimmte Menge an Rohstoffen in komplett exogen festgelegten Bioenergiepfaden, die nicht modelliert werden (z. B. Bioabfälle). In die Modellberechnungen in MAGNET einfließen müssen handelbare Biomasse und agrarische Rohstoffe, die auf Ackerflächen (in MAGNET abgebildeten Flächen) kultiviert werden können. Die gesamt nachgefragte Menge an Biomasse muss alle Fraktionen beinhalten und entspricht für Deutschland dem angenommenen Wert von 1.550 PJ Primärenergie in 2050. Der Anteil relevanter Biomasse in MAGNET wird exogen vorgegeben (Experten, andere Studien, eigene Abschätzungen).

Technologie oder Produktionsverfahren, die noch nicht im großen Stil angewendet werden, sind nicht in MAGNET enthalten; für diese können keine Preise ausgewiesen werden. Es ist kein CO<sub>2</sub>-Preis vorhanden bzw. THG-Emission ausgewiesen.

### A 3.3.2 BENSIM

Der Wettbewerb mit den anderen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieträgern wird vorerst nicht modelliert.

Räumliche Aussagen zu den Anlagen und der Produktion sind nicht möglich, d. h. die Produkte, die die deutsche Nachfrage erfüllen, können prinzipiell sowohl in Deutschland als auch im Ausland produziert worden sein.

### A 3.3.3 Modellkopplung

In der BENSIM Modellierung haben die Substratkosten einen starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Anlagen. Die Entwicklung der Preise für die Anlagensubstrate ist damit ein wichtiger Input für das Modell und beeinflusst die Entwicklung der Zusammensetzung des Anlagenparks. Diese zeitlich veränderliche und von den Rohstoffpreisen abhängige Zusammensetzung des Anlagenparks bewirkt gleichzeitig eine zeitlich veränderliche Nachfrage nach Anlagensubstraten, die sich wiederum auf den Preis auswirkt. Um diesen Effekt abzubilden, wäre ein dynamischer Datenaustausch für jede Jahresscheibe notwendig. Aus bereits eingangs beschriebenen Gründen wird im Vorhaben jedoch auf eine solch dynamische Kopplung verzichtet und ein besser nachvollziehbarer Ansatz gewählt.

## A 4 Hintergrunddaten und -annahmen

### A 4.1 Nachhaltigkeitsanforderungen

Tabelle A-22: Überblick über die berücksichtigten Nachhaltigkeitsanforderungen in den Szenarien „business as usual“ (BAU) und „Nachhaltig“

Nachhaltigkeitsanforderung	Datensätze	Szenario BAU	Szenario Nachhaltig	Berücksichtigt von	Art der Umsetzung
<b>Erhalt der Biologischen Vielfalt</b>					
Schutz von Primärwäldern	„Intact Forest Landscape“ Korruptionsindex nach Transparency International	In Ländern mit geringer Korruption: forstliche Nutzung erlaubt, aber Wald bleibt erhalten. In Ländern mit hoher Korruption: forstliche Nutzung und Umwandlung zu Ackerland / Grünland zugelassen.	Keine Nutzung	LandSHIFT	Flächenrestriktionen
Schutzgebiete, noch ungeschützte Gebiete und Flächen mit großer Biologischer Vielfalt	World Database on Protected Areas (WDPA) (BAU) Korruptionsindex nach Transparency International	Ländern mit geringer Korruption: Keine Nutzung / Umwandlung; Länder mit hoher Korruption: Nutzung / Umwandlung zugelassen	Keine Nutzung; zusätzlich: Erfüllen des CBD-Ziels von 17 % Schutzgebiete an der terrestrischen Fläche (neue Gebiete werden generiert)	LandSHIFT	Flächenrestriktionen
<b>Erhalt kohlenstoffreicher Flächen</b>					
Feuchtgebiete	Global Lake and Wetland Database (GLWD)	Nutzung erlaubt, Umwandlung nicht erlaubt	Keine Nutzung	LandSHIFT	Flächenrestriktionen
Wälder	GlobCover (2005) Korruptionsindex nach Transparency International	In Ländern mit geringer Korruption: forstliche Nutzung erlaubt, aber Wald bleibt erhalten. In Ländern mit hoher Korruption: forstliche Nutzung und Umwandlung zu Ackerland oder Grünland erlaubt	Nur forstliche Nutzung erlaubt, keine Umwandlung zu Ackerland oder Grünland Ab 2020 keine Waldumnutzung und keine Grünlandumnutzung. Ebenso werden RED-Flächen aus Nutzung genommen (zusätzliche Naturschutzgebiete)	LandSHIFT	Flächenrestriktionen



Nachhaltigkeitsanforderung	Datensätze	Szenario BAU	Szenario Nachhaltig	Berücksichtigt von	Art der Umsetzung
Torfmoor / Moore	Harmonized World Soil Database (FAO), dort Histosole (40 cm Torfhorizont), ggf. andere Bodentypen mit geringerer Torfmächtigkeit	Nicht berücksichtigt	Keine Nutzung	LandSHIFT	Flächenrestriktionen
Bodenschutz	Soil constrained data (IIASA): soil-constrained-combined, Plate 27	Nicht berücksichtigt (nur für Bewertung genutzt)	Nicht berücksichtigt (nur für Bewertung genutzt)	LandSHIFT	
Art der landwirtschaftlichen Produktion	In LandSHIFT nicht extra berücksichtigt à heutige Erträge integrieren bereits die aktuellen Regelungen. Zukünftige ambitionierte Anforderungen werden ausreichend über den Schutz der Biologischen Vielfalt und von Boden berücksichtigt.			LandSHIFT	
Forstwirtschaftliche Nutzung à Nachhaltiges Waldmanagement, Holzentnahmerate		Blocken von Waldflächen nach Annahme zu Potenzialen	Blocken von Waldflächen nach Annahme zu Potenzialen	LandSHIFT	Flächenrestriktionen (wird nicht modelliert)
Grünland	Grünlandumbruchverbot in der EU	Nicht berücksichtigt	Berücksichtigt	LandSHIFT+ MAGNET	Flächenrestriktionen
Soziale Nachhaltigkeitskriterien	ILO-Kriterien, als „Unterszenario“ prüfen	Nicht berücksichtigt	Berücksichtigt	MAGNET	Strafzölle; alternativ: Besteuerung von Arbeit (Sensitivitätsanalyse)
Bioenergienachfrage global (1st Gen)	Abschätzungen (IIINAS 2014) in Anlehnung an (IEA 2014)	IEA-ETP „6DS“	IEA-ETP „2DS“	MAGNET	Nachfrage (Quoten)
Bioenergienachfrage global (2nd Gen)	(IIINAS 2014) in Anlehnung an (IEA 2014)	IEA-ETP „6DS“	IEA-ETP „2DS“	LandSHIFT+ MAGNET	Flächenrestriktionen
<b>Weitere Parameter</b>					
CO <sub>2</sub> Zertifikatspreis	Referenzszenario EU-Kommission	Referenzszenario (100 €/t in 2050)	2050: 100 €/t, Verlauf steiler als Referenz	BENSIM	CO <sub>2</sub> -Preis

Nachhaltigkeitsanforderung	Datensätze	Szenario BAU	Szenario Nachhaltig	Berücksichtigt von	Art der Umsetzung
Rohölpreis (+Kohle und Gas)	Referenzszenario EU-Kommission	Referenzszenario EU-Kommission	Referenzszenario EU-Kommission	MAGNET	Preise
THG-Minderungsziele Kraftstoffe	RED / Biomass Future	Anforderungen der RED	Anforderungen aus Biomass Future	BENSIM (nachträglich als Sensitivitätsanalyse)	Technologische Restriktion, bzw. über CO <sub>2</sub> -Preis
THG-Minderungsziele Strom / Wärme		Nicht berücksichtigt	Offen, noch Diskussionsbedarf, insb. Importholz, Biomethan	Wenn, dann BENSIM; Ggf. Ifeu	
Nachhaltige Kaskadennutzung		Wird betrachtet	Wird betrachtet	Beschrieben im Kontext Holzverfügbarkeit	
Zertifizierung von Biomasseimporten		Siehe THG-Anforderungen und Flächenrestriktionen	Siehe THG-Anforderungen und Flächenrestriktionen		

## A 4.2 Globale Bioenergie- und Flächennachfrage

Tabelle A-23 Annahmen zur globalen Bioenergie- Flächennachfrage

	Einheit	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Quelle / Methode
<b>Szenario (SW-N; KS-N)</b>											
Endenergiebereitstellung „Biokraftstoff“	PJ/a	2611	3669	5176	8174	10987	15453	19306	25518	30568	(IINAS 2014)
Anteil Biokraftstoffe 1. Generation	%	99,8	97,0	89,7	70,5	48,5	30,9	21,4	15,3	11,4	
Flächenverbrauch [ha] KUP / Energiegräser (Kraftstoffe 2. Generation)	Mio. ha/a	0	0	0	1,25	5,0	18,1	38,39	69,44	87,94	Basierend auf (IINAS 2014)
<b>Szenario (SW-BAU; KS-BAU)</b>											
Endenergiebereitstellung „Biokraftstoff“	PJ/a	528	762	889	903	962	998	1035	1069	1077	Basierend auf (IINAS 2014)
Anteil Biokraftstoffe 1. Generation	%	99,9	99,76	99,34	98,89	98,21	96,25	96,21	96,17	96,0	Basierend auf (IINAS 2014)
Flächenverbrauch [ha] KUP / Energiegräser (Kraftstoffe 2. Generation)	Mio. ha/a	0	0,22	0,51	0,72	1,12	2,17	1,94	1,8	1,68	Basierend auf (IINAS 2014)

## A 4.3 Annahmen zu Ertragssteigerungen

Tabelle A-24 Annahmen zu Ertragssteigerungen

	Einheit	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Quelle / Methode
<b>Ertragssteigerung („typischer Fall“)</b>											
Industrieländer generell	%/a	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	(GÄRTNER et al., 2014)
Global generell	%/a	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	(GÄRTNER et al., 2014)
Für bereits etablierte Bioenergiepflanzenarten (Mais, Weizen, Raps, und Zuckerrübe)	%/a	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	(GÄRTNER et al., 2014)
Weniger etablierte Bioenergiepflanzen und KUP	%/a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	(GÄRTNER et al., 2014)

## A 4.4 Preis für Treibhausgasemissionen

Tabelle A-25 Preise für Treibhausgasemissionen

	Einheit	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Quelle / Methode
<b>Preis für THG-Emissionen</b>											
BAU-Szenarien (Szenario 2+4)	€ <sub>2010</sub> /tCO <sub>2</sub>	10	5	10	14	35	57	78	89	100	(EUROPEAN COMMISSION, 2013)
Nachhaltig-Szenarien (Szenario 1+3)	€ <sub>2010</sub> /tCO <sub>2</sub>	10	50	70	80	87,5	92,5	95	97,5	100	Eigene Annahmen

## A 4.5 Potenziale / Berücksichtigung limitierter Rohstoffe (Reststoffe, Abfälle) (national)

In MAGNET nicht berücksichtigte Biomassefraktionen werden nicht als nachgefragte Menge an Biomasse für bioenergetische Zwecke in die Modellläufe integriert, sie werden vielmehr exogen, aufgrund von Experteninterviews und Literaturwerten, abgeschätzt. Die Verwendung dieser exogen festgelegten Menge an Biomasse wird in BENSIM unterschiedlich berücksichtigt. Einerseits werden in BENSIM Technologien mit Rohstoffen modelliert, deren Preise über exogene Annahmen definiert werden (Holz, Stroh) und andererseits fließt eine bestimmte Menge an Rohstoffen in komplett exogen festgelegte Bioenergiepfade, die nicht modelliert werden (Güllekleinanlage, Bioabfallvergärung, Kleinf Feuerung).

Der Beitrag von Güllekleinanlagen wurde aufgrund von Expertenschätzungen (ca. Vervielfachung der Anlagenzahl gegenüber heute) unter Berücksichtigung des Anlagenbestandes (Anlagen <150 kW<sub>el</sub>; Anteil Gülle > 50 %) und der Güllepotenziale (in Anlehnung an [BMVBS, 2010]) abgeschätzt. Hierbei ist anzumerken, dass nur ein geringer Teil der in Deutschland aufkommenden Gülle in derartigen Hofbiogasanlagen verwendet wird. Nach den Modellläufen wird abgeglichen, wieviel Gülle der Anlagenpark insgesamt benötigt, um eventuelle Limitierungen des Zubaus vorzugeben.

Ebenfalls wurden die Anlagen der Bioabfallvergärung abgeschätzt (ca. Verdreifachung der Anlagenzahl gegenüber heute). Hierbei kommen die Bioabfallpotenziale (technisches Rohstoffpotenzial 23 PJ nach [BMVBS, 2010]) und der Erschließungsfaktor (75 %) zum Tragen.

Strohehanolanlagen werden in BENSIM modelliert. Hier wird es ebenfalls einen Abgleich der verwendeten Strohmenge geben, da Stroh nicht in MAGNET abgebildet und außerdem wenig transportwürdig ist und der Zubau durch die in Deutschland begrenzten, nachhaltig (technisch) verfügbaren Strohpotenziale (8-13 Mio. t; Erschließung von 70 % in Anlehnung an [ZELLER et al., 2012]) limitiert ist.

Die Anlagen zur reinen Wärmebereitstellung (Kleinf Feuerungen) werden, da in keinem der Szenarien im Fokus und auch nicht in BENSIM modelliert, mit abnehmendem Endenergiebeitrag bis auf 50 PJ (Expertenschätzung) in 2050 reduziert abgebildet.

Die Einordnung der stofflichen Nutzung von holzbasierten Sekundärrohstoffen im Gesamtsystem erfolgt anhand der Einschätzung von derzeit vorhanden Massenströmen und der Haupttreiber bzw. der daraus folgenden Ableitung der zukünftigen Aufkommensentwicklung. Die Entwicklung mehrerer großtechnologischer Anlagen für die Holz-basierte Bioökonomie in Deutschland und dem Rückfluss der erzeugten Produkte in die Kaskade wird nicht vor 2025 erwartet. Generell erscheint unter den gegenwärtigen Voraussetzungen eine signifikante Verschiebung gegenwärtig energetisch genutzter Stoffströme hin zur verstärkten stofflichen Nutzung von Holz in der chemischen Industrie bis 2030 als eher unwahrscheinlich ([BEZAMA & HILDEBRANDT, 2014]). Stärkere Entwicklungen der energetischen Altholz-nutzung im Vergleich zu heute sind bis 2050 nicht zu erwarten.

## A 4.6 Rohstoffpreise und Entwicklungen

Tabelle A 26: Startwerte für Rohstoffpreise und Annahmen zu Preisentwicklungen

Rohstoff	Preis	Einheit	Quelle	Preisentwicklung	Sonstiges
Weizen	169	€ <sub>2010</sub> /t <sub>FM</sub>	(BMELV 2014)	MAGNET wht	Erzeugerpreise, Mittelwert 2009 - 2011
Zucker-rüben	26	€ <sub>2010</sub> /t <sub>FM</sub>	(BMELV 2014)	MAGNET c_b	Erzeugerpreise, Mittelwert 2009 - 2011
Ölsaaten = Raps	329	€ <sub>2010</sub> /t <sub>FM</sub>	(BMELV 2014)	MAGNET osd	Erzeugerpreise, Mittelwert 2009 - 2011
Rapsöl	776	€ <sub>2010</sub> /t	UFOP Marktinformationen Ölsaaten und Biokraftstoffe	MAGNET cvol	Erzeugerpreise, Mittelwert 2009 - 2011
Palmöl	628	€ <sub>2010</sub> /t	IMF Primary Commodity Prices ( <a href="http://www.imf.org/external/np/res/commod/index.aspx">http://www.imf.org/external/np/res/commod/index.aspx</a> )	MAGNET cvol	Palm oil, Malaysia Palm Oil Futures (first contract forward) 4-5 percent FFA, Mittelwert 2009 - 2011
Sojaöl	755	€ <sub>2010</sub> /t	IMF Primary Commodity Prices (International Monetary Fund 2014)	MAGNET cvol	Soybean Oil, Chicago Soybean Oil Futures (first contract forward) exchange approved grades, Mittelwert 2009 - 2011
Holz-(hack-schnitzel)	85	€ <sub>2010</sub> /t <sub>TM</sub>	in Anlehnung an (C.A.R.M.E.N. e.V. 2014; Thrän et al. 2013)	Kopplung an Weizenpreisentwicklung aus MAGNET	in den S/W-Szenarien zusätzliche Angebotskurve angenommen (linear steigend +15 €/t <sub>atro</sub> bis 400 PJ PE-Nachfrage, +35 €/t <sub>atro</sub> bis 800 PJ und +45 €/t <sub>atro</sub> bis 1000 PJ PE-Nachfrage)
Stroh	60	€ <sub>2010</sub> /t <sub>FM</sub>	Durchschnittspreis der Werte aus Tabelle 12, S. 55 in [ZELLER et al., 2012]	konstant	
Maissilage	35	€ <sub>2010</sub> /t <sub>FM</sub>	Abgeleitet über Weizenpreis in Anlehnung an [GÖMANN et al., 2013; TOEWS & KUHLMANN, 2009]	Kopplung an Weizenpreisentwicklung aus MAGNET	

Tabelle A-27: Gutschriften für Neben- und Koppelprodukte und Annahmen zu Preisentwicklungen

Rohstoff	Preis	Einheit	Quelle	Preisentwicklung	Sonstiges
Wärme bis 130 °C	0,83	€ct <sub>2010</sub> /MJ <sub>th</sub>	(THRÄN et al., 2013: S. 78)	MAGNET wht	Erzeugerpreise, Mittelwert 2009 - 2011
Hochdruckdampf	1,39	€ct <sub>2010</sub> /MJ <sub>th</sub>	(THRÄN et al., 2013: S. 78)	MAGNET c_b	Erzeugerpreise, Mittelwert 2009 - 2011
Rapspresskuchen	211	€ <sub>2010</sub> /t <sub>FM</sub>	UFOP Marktinformationen Ölsaaten und Biokraftstoffe	MAGNET osd	Erzeugerpreise, Mittelwert 2009 - 2011
Gepresste Trockenschlempe (DDGS)	140	€ <sub>2010</sub> /t	UFOP Marktinformationen Ölsaaten und Biokraftstoffe	MAGNET cvol	Erzeugerpreise, Mittelwert 2009 - 2011
Vinasse	70	€ <sub>2010</sub> /t	(THRÄN et al., 2013: S. 78)	MAGNET cvol	Palm oil, Malaysia Palm Oil Futures (first contract forward) 4-5 percent FFA, Mittelwert 2009 - 2011
Pharmaglycerin	600	€ <sub>2010</sub> /t	In Anlehnung an (FNR, 2015)	MAGNET cvol	Soybean Oil, Chicago Soybean Oil Futures (first contract forward) exchange approved grades, Mittelwert 2009 - 2011
Gärrest	0	€ <sub>2010</sub> /t <sub>TM</sub>	Starke regionale Preisunterschiede, daher vereinfachend weder Preise für Güllekauf noch für Düng-Gutschrift angenommen.		



[www.energetische-biomassenutzung.de](http://www.energetische-biomassenutzung.de)

ISSN: 2199-2762

Gefördert durch



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

Projekträger



Programmbegleitung



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages