



# **BioplanW: Systemlösungen Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen**

**Schlussbericht**

**Autoren: Daniela Thrän, Nora Szarka, Henryk Haufe, Volker Lenz,  
Stefan Majer, Katja Oehmichen (DBFZ), Matthias Jordan, Markus  
Millinger (UFZ), Rüdiger Schaldach, Jan Schüngel (Uni Kassel)**

## IMPRESSUM

### Herausgeber:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum  
gemeinnützige GmbH  
Torgauer Straße 116  
04347 Leipzig  
Tel.: +49 (0)341 2434-112  
Fax: +49 (0)341 2434-133  
[info@dbfz.de](mailto:info@dbfz.de)

### Institutionelle Förderung:

Das Deutsche Biomasseforschungszentrum wird institutionell gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

### Projektförderung:

Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

### Geschäftsführung:

Prof. Dr. mont. Michael Nelles  
(Wissenschaftlicher Geschäftsführer)  
Daniel Mayer  
(Administrativer Geschäftsführer)

### DBFZ Report Nr. 36

BioplanW: Systemlösungen Bioenergie im Wärmesektor  
im Kontext zukünftiger Entwicklungen

Leipzig: DBFZ, 2020  
ISSN: 2197-4632 (Online)  
ISSN: 2190-7943 (Print)  
ISBN: 978-3-946629-56-6

### Autoren:

Daniela Thrän, Nora Szarka, Henryk Haufe, Volker Lenz,  
Stefan Majer, Katja Oehmichen (DBFZ), Matthias Jordan,  
Markus Millinger (UFZ), Rüdiger Schaldach, Jan Schüngel  
(Uni Kassel)

### Bilder:

Sofern nicht am Bild vermerkt: DBFZ, Jan Gutzeit, Stefanie  
Bader (Karte), Pixabay (Titel: Gerd Altmann auf Pixabay/  
oben rechts: Ralf Vetterle auf Pixabay)

### Copyright:

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Broschüre darf  
ohne die 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 CD-ROM.

### Datum der Veröffentlichung:

2. Juli 2020

## ANFAHRT:

**Mit dem Zug:** Ankunft Leipzig Hauptbahnhof, Straßenbahn  
Linie 3/3E (Richtung Taucha/Sommerfeld) bis Haltestelle  
Bautzner Straße; Straße überqueren, Parkplatz rechts liegen  
lassen und den Haupteingang des DBFZ (Haus 1, Torgauer Str.  
116) benutzen. Bitte melden Sie sich am Empfang an.

**Mit dem Auto:** Über die Autobahn A 14; Abfahrt Leipzig Nord-  
Ost, Taucha; Richtung Leipzig; Richtung Zentrum, Innenstadt;  
nach bft Tankstelle befindet sich das DBFZ auf der linken  
Seite (siehe „... mit dem Zug“).

**Mit der Straßenbahn:** Linie 3/3E (Richtung Taucha/Sommer-  
feld); Haltestelle Bautzner Straße (siehe „... mit dem Zug“).



Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese  
Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter  
der Adresse [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

# **BioplanW: Systemlösungen Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen**

## **Schlussbericht**

**Daniela Thrän, Nora Szarka, Henryk Haufe, Volker Lenz,  
Stefan Majer, Katja Oehmichen (DBFZ),  
Matthias Jordan, Markus Millinger (UFZ),  
Rüdiger Schaldach, Jan Schüngel (Universität Kassel)**

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum  
gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116  
04347 Leipzig

Tel.: +49 (0)341 2434-112  
Fax: +49 (0)341 2434-133

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

Datum: 22.05.2020





Auftraggeber oder  
Zuwendungsgeber  
(bei Forschungsförderung)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Ansprechpartner:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH  
Torgauer Straße 116  
04347 Leipzig  
Tel.: +49 (0)341 2434-112  
Fax: +49 (0)341 2434-133  
E-Mail: [info@dbfz.de](mailto:info@dbfz.de)  
Internet: [www.dbfz.de](http://www.dbfz.de)  
**Prof. Dr.-Ing. Daniela Thrän**  
Tel.: +49 (0)341 2434-578  
E-Mail: [daniela.thraen@dbfz.de](mailto:daniela.thraen@dbfz.de)  
**M. Eng. Henryk Haufe**  
Tel.: +49 (0)341 2434-388  
E-Mail: [henryk.haufe@dbfz.de](mailto:henryk.haufe@dbfz.de)

Anprechpartner:

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH  
Permoserstraße 15  
04318 Leipzig  
**Dipl. Ing. Matthias Jordan**  
Tel.: +49 (0)341 2434-590  
E-Mail: [matthias.jordan@ufz.de](mailto:matthias.jordan@ufz.de)

Ansprechpartner:

Universität Kassel – Center for Environmental Systems Research  
(CESR)  
Wilhelmshöher Allee 47  
34117 Kassel  
**Prof. Dr. Rüdiger Schaldach**  
Tel.: +49 (0)561 804-6130  
E-Mail: [schaldach@usf.uni-kassel.de](mailto:schaldach@usf.uni-kassel.de)

Erstelldatum: 22.05.2020

Projektnummer DBFZ: P3330031

Projektnummer Auftraggeber  
oder Zuwendungsgeber: 03KB113

Gesamtseitenzahl + Anlagen 81

Gefördert durch

Koordiniert vom

Wissenschaftlich begleitet

## Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                                                                               |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Kurzdarstellung</b> .....                                                                                                                  | <b>6</b>  |
| 1.1      | Aufgabenstellung.....                                                                                                                         | 6         |
| 1.2      | Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....                                                                             | 7         |
| 1.3      | Planung und Ablauf des Vorhabens.....                                                                                                         | 7         |
|          | 1.3.1 Ergebnisse in Kurzform.....                                                                                                             | 8         |
| 1.4      | Stand des Wissens und der Technik.....                                                                                                        | 9         |
|          | 1.4.1 Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die<br>Durchführung des Vorhabens benutzt wurden .....            | 9         |
|          | 1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und<br>Dokumentationsdienste .....                               | 11        |
| 1.5      | Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....                                                                                                      | 11        |
| <b>2</b> | <b>Eingehende Darstellung</b> .....                                                                                                           | <b>11</b> |
| 2.1      | Erzielte Ergebnisse .....                                                                                                                     | 12        |
|          | 2.1.1 Wärme Teilmärkte und Szenarien (AP1) .....                                                                                              | 12        |
|          | 2.1.2 Biowärme-Technologien – Charakterisierende Eigenschaften und Entwicklungsoptionen im<br>Vergleich anderen EE-Wärme-Optionen (AP2) ..... | 40        |
|          | 2.1.3 Modellierung der Teilmärkte „Wärme“ (AP3).....                                                                                          | 41        |
|          | 2.1.4 Analyse der Auswirkungen (AP4) .....                                                                                                    | 44        |
|          | 2.1.5 Maßnahmen, Handlungsempfehlungen und Ergebniskommunikation (AP5).....                                                                   | 53        |
| 2.2      | Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....                                                                                      | 54        |
| 2.3      | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....                                                                                 | 54        |
| 2.4      | Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....                                                                               | 54        |
| 2.5      | Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des<br>Vorhabens bei anderen Stellen .....               | 59        |
| 2.6      | Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....                                                                                | 59        |
| <b>3</b> | <b>Erfolgskontrollbericht</b> .....                                                                                                           | <b>60</b> |
| <b>4</b> | <b>Literaturverzeichnis</b> .....                                                                                                             | <b>74</b> |

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

| Abkürzung | Erklärung                                                 |
|-----------|-----------------------------------------------------------|
| BIP       | Bruttoinlandsprodukt                                      |
| CCS       | Carbon Capture and Storage                                |
| COP       | Conference of the Parties                                 |
| CPI       | Consumer Price Index                                      |
| DLR       | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt                 |
| EE        | Erneuerbare Energien                                      |
| EED       | Energieeffizienz-Richtlinie / Energy Efficiency Directive |
| EEG       | Erneuerbare-Energien-Gesetz                               |
| EEWärmeG  | Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz                          |
| EnEV      | Energieeinsparverordnung                                  |
| EUA       | European Union Allowances (EU-Emissionsberechtigung)      |
| EU-ETS    | EU-Emissionshandel (EU Emission Trading System)           |
| GEG       | Gebäudeenergiegesetz                                      |
| GHD       | Gewerbe Handel Dienstleistung                             |
| KFB       | Klimafreundlich Pro Biomasse                              |
| KFS       | Klimafreundlich Standard                                  |
| KKB       | Klimakompromiss Pro Biomasse                              |
| KKS       | Klimakompromiss Standard                                  |
| KWKG      | Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz                               |
| LNG       | Liquified Natural Gas                                     |
| MsbG      | Messstellenbetriebsgesetz                                 |
| NDC       | Nationally determined contributions                       |
| RES       | renewable energy sources                                  |
| THG       | Treibhausgase                                             |
| WKK       | Wärme-Kraft-Kopplung                                      |

## 1 Kurzdarstellung

Biomassebasierte Energie leistet als erneuerbare Energie, insbesondere bei der Wärmebereitstellung, schon heute und auch zukünftig einen Beitrag zu einer zuverlässigen, bezahlbaren sowie umweltschonenden Transformation des Energiesystems. Um gerade im Wärmebereich kosteneffiziente und umweltverträgliche Lösungen zu identifizieren, müssen eine Reihe von Randbedingungen beachtet, neue Technologiekonzepte bewertet und ihre Anwendung und Auswirkungen in verschiedenen Wärmemärkten analysiert werden.

Mit diesem Vorhaben sollen – unter umfassender Berücksichtigung der politischen Zielstellungen und Rahmenbedingungen im Wärmebereich sowie auf Basis von vorliegenden Biomassepotenzialabschätzungen, Energieszenarien und Technologieinformationen – die Entwicklungsperspektiven der Wärmeerzeugung aus Biomasse systematisch abgeschätzt werden.

Dies erfolgt mit Hilfe verfügbarer Modellierungs- und Bewertungsansätze, die bereits für die Ableitung von Bioenergiestrategieelementen im Strom- und Verkehrssektor erprobt sind. Dabei werden zum einen die gegenwärtig in der Entwicklung befindlichen Technologiekonzepte systematisiert und zum anderen ihre Wettbewerbsfähigkeit in verschiedenen Teilmärkten simuliert. Die damit verbundenen Auswirkungen, auf den Gesamtbeitrag zur Energieversorgung, den Klimaschutzbeitrag und die Effekte auf die Landnutzung, werden bewertet und diskutiert. Die so entwickelte Datenbasis nebst Informationen zu den Perspektiven der Wärmebereitstellung aus Biomasse (mit anderen erneuerbaren Energien) wird zur Unterstützung der strategischen Arbeiten im Bereich Wärme und Effizienz(politik) zur Verfügung gestellt, z.B. für die Plattformen und Arbeitsgruppen des BMWi, BMEL oder BMUB.

### 1.1 Aufgabenstellung

Mit der Energiewende hat Deutschland die Entwicklung hin zu einer sicheren, umweltverträglichen und wirtschaftlich erfolgreichen Energiesystemtransformation auf den Weg gebracht. Die Politik setzt auch im Wärmebereich herausfordernde Ziele BMWi 2014a; u.a. soll der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte bis zum Jahr 2020 auf 14 % erhöht werden (Deutscher Bundestag 07.08.2008); Energieeffizienzmaßnahmen, Energieeinsparungen (z.B. ENEC) und die Modernisierung von Heizungsanlagen sollen vorangetrieben werden.

Biomasse spielt aktuell eine dominierende Rolle im Wärmesektor, die sich mit einem Anteil von 88 % an der erneuerbaren Wärmeerzeugung im Jahr 2014 (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2019) widerspiegelt. Auch künftig wird Biomasse im Wärmemarkt eine wichtige Rolle einnehmen (BMWi 2014b; BMWi/BMU (Hrsg.) 2010), Bekanntmachung „Energetische Biomassenutzung). Aufgrund der begrenzten Biomassepotenziale ist es jedoch wichtig, die kostengünstige Biomasse in effizienten, emissionsarmen und zukunfts- und wettbewerbsfähigen Umwandlungstechnologien einzusetzen, um die Energienachfrage im Zusammenspiel mit anderen erneuerbaren Energieträgern flexibel und intelligent decken zu können. Konkret könnte beispielsweise ein automatischer Pelletofen mit Wassertaschen ideal ein Wärmepumpenheizsystem, das über die eigene PV-Anlage mit Strom versorgt wird, ergänzen (PV-Erträge im Winter niedrig und sinkende Arbeitszahl der Wärmepumpe bei kalten Außentemperaturen). Es stellt sich – auch vor dem Hintergrund begrenzter Ressourcen, Akzeptanzfragen und künftiger Kostenentwicklungen – daher die Frage, welche quantitative und qualitative Rolle die Biomasse inkl.



KWK-Wärme und in Relation zu anderen EE-Wärmeoptionen in den Wärmemärkten der Zukunft einnehmen und wie diese möglichst kostengünstig, effizient und umweltfreundlich realisiert werden kann.

Gesamtziel des Vorhabens ist es daher, Grundlagen und Daten über die mittelfristigen Perspektiven der effizienten, kostengünstigen und umweltfreundlichen Wärmebereitstellung aus Biomasse – in Kombination mit anderen EE – in Deutschland für Wissenschaft und Politik strukturiert und transparent bereitzustellen und Maßnahmen und Handlungsempfehlungen für deren effizienten Integration abzuleiten.

## 1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt gliedert sich in laufende Arbeiten des DBFZ und UFZ rund um optimale Strategien und technische Lösungen für die biomassebasierte Energiebereitstellung ein. Insbesondere schließen sich die Arbeiten an das abgeschlossene Vorhaben „Meilensteine 2030“ (Thrän 2015) an, wo alle drei Projektpartner beteiligt waren. Für die datenseitigen Vorarbeiten lagen dem Konsortium erprobte Methoden und entsprechende Ergebnisse der Technologiepfade für die Bewertung vor. Im Rahmen des DBFZ-Forschungsschwerpunkts „Intelligente Biomasseheiztechnologien“ (SmartBiomassHeat) wurden und werden am DBFZ gezielt die verschiedenen Bausteine zukunftsfähiger Wärmeerzeuger auf Basis biogener Festbrennstoffe untersucht, die sich durch angepasste (verringerte) Leistungsspektren (Patentanmeldung für eine Rohrverbrennungsapparatur im unteren kW-Bereich), drastische Emissionsminderungen durch integrierte neuartige Abgaskatalysatoren (Ausgründung und Patentantrag), Untersuchungen zu modifizierten Hochqualitätsbrennstoffen, modellbasierte Systemregelungskonzepte und die stromnetzstabilisierende Wärmeerzeugung auszeichnen. Auf Basis dieser praktischen Erfahrungen und der Weiterentwicklung dieser Technologiepfade stehen dem DBFZ grundlegende, einmalige und in ihrem Umfang exklusive Daten zu den zukünftigen Technologietrends im Wärmebereich zur Verfügung.

Das ökonomische Optimierungsmodell BENSIM wurde am UFZ im Rahmen einer Dissertation entwickelt und wurde bisher auf die Biokraftstoff- und Strom/Wärme-Märkte angewendet (u.a. im Projekt Meilensteine 2030). Das Modell und die Expertise werden kontinuierlich erweitert, um weitere Teilaspekte der Biomassenutzung detaillierter abzubilden.

Das Modellframework LandSHIFT wurde am CESR entwickelt (Schaldach et al. 2011). Es bietet einen konzeptionellen Rahmen, um konkrete Modelle zur Analyse von Landnutzungsänderungen und deren Umweltwirkungen für spezifische Studienregionen und Problembereiche softwaretechnisch zu implementieren.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Beantwortung der Fragen wird das vorgeschlagene Vorhaben in fünf Arbeitsschritte (Arbeitspakete (AP)) untergliedert, die in Abbildung 1 dargestellt sind. Sie umfassen (AP 0) Koordination und Dialog, (AP 1) Analyse des Wärmemarktes und die Klassifizierung relevanter Teilmärkte und ihrer Entwicklungsperspektiven, (AP 2) modellhafte Konzeption und Beschreibung von Technologiekonzepten, in denen Bioenergie im Verbund mit anderen erneuerbaren Energien zur Wärmebereitstellung genutzt wird, (AP 3) Modellierung der Teilmärkte unter verschiedenen Randbedingungen (Szenarien), (AP 4) Abschätzung der Auswirkungen auf Effizienz, Kosten und Umwelt sowie (AP 5) die Ableitung von



Handlungsempfehlungen. Parallel werden die Methoden, Ergebnisse und Schlussfolgerungen sowohl mit der Wissenschaft als auch in Richtung der politischen Entscheidungsträger vernetzt.

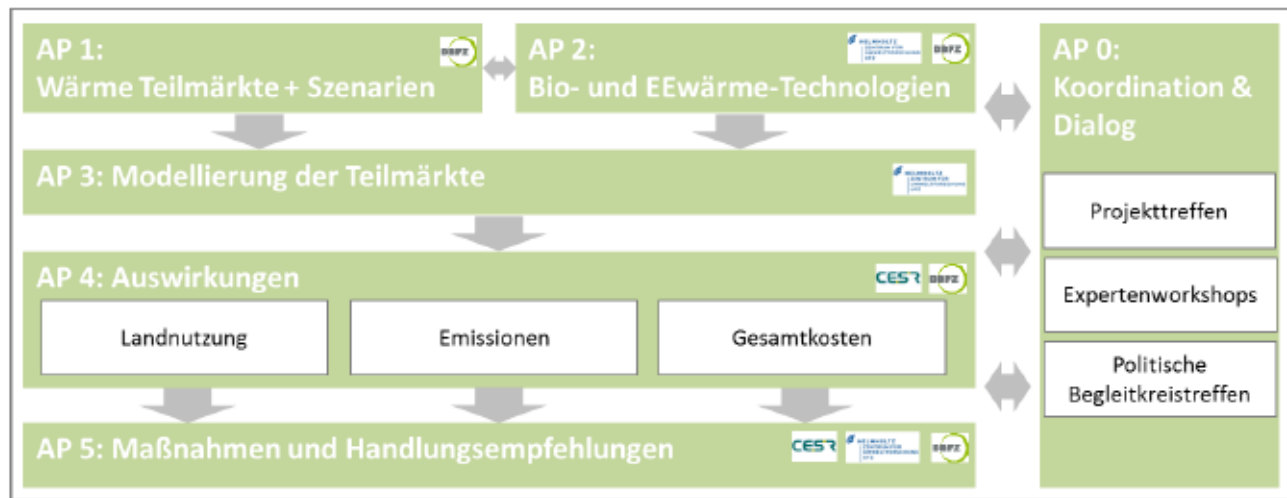


Abbildung 1 Arbeitspakete und Vernetzung im geplanten Vorhaben

### 1.3.1 Ergebnisse in Kurzform

Ergebnisse des Projektes wurden in Schwerpunkte (Wärme-Kraft-Kopplungs-Technologien, industrielle Wärmenutzung, Bereitstellung von Festbrennstoffe) untergliedert. Kernergebnisse werden folglich in tabellarischer Form aufgezeigt (siehe Kapitel 2.4).

Die Ergebnisse aus der Szenarienmodellierung zeigen, dass Biomasse mittelfristig vor allem in Kleinst-WKK-Hybridssystemen innerhalb der privaten Haushalte kosten-optimal eingesetzt wird, speziell in (Torrifizierten-) Pellet-WKK Anwendungen kombiniert mit einer Wärmepumpe und Photovoltaik Anlage. Mit ansteigenden Strompreisen, wie es aktuelle Energieszenarien projizieren, bieten diese Hybridysteme im Modell das kosteneffizienteste THG Einsparpotenzial für den Biomasseeinsatz. Trotzdem findet ab dem Jahr 2040–2045, in den 95 % Reduktionsszenarien, eine Verschiebung des Biomasseeinsatzes von den privaten Haushalten zu Hochtemperatur-Industrieanwendungen statt. Mangels kostengünstiger erneuerbarer Alternativen für Prozesswärme, wurde für die fast vollständige Dekarbonisierung des Wärmesektors der Einsatz von Biomasse in der Prozesswärme als Gesamtkostenoptimum ermittelt. Mittels Sensitivitätsanalysen wurde aber auch ermittelt, dass die Szenarienergebnisse sehr sensitiv gegenüber der zukünftigen Entwicklung des Strompreises sind. Die Sensitivitätsanalysen verdeutlichen, dass der Einsatz von Biomasse in Hochtemperaturanwendungen in der Industrie das robusteste Ergebnis unter den untersuchten Unsicherheiten ist, wobei jedoch bisher keine detaillierten Einzelprozesse außer der Herstellung von Stahlkohlenkoks betrachtet wurden. Wohingegen die Pellet-WKK-Hybrid Systeme nur bei deutlich steigenden Strompreisen wettbewerbsfähige Optionen darstellen.

Im letzten Schritt wurde analysiert, welche Auswirkungen die ermittelten Transformationspfade im Wärmesektor auf Ressourceneffizienz, Landnutzung und Klimanutzen bedeuten. Anhand dieser Untersuchungen wurden konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet.

### Schlussfolgerungen und Kernergebnisse:

- Erneuerbare Energien verdrängen im Zeitverlauf sowohl im Stromsektor als auch im Gebäudesektor fossile Energieträger, um die vorgegebenen THG-Minderungsziele zu erfüllen.
- Ohne Förderung wird Biogas/Biomethan erst bei sehr hohen THG-Minderungszielen und einem gleichzeitig geringen Angebot an fester Biomasse eingesetzt
  - Prüfen: gasförmige Biomasse bevorzugt im Verkehrssektor einsetzen
  - Forschungsbedarf: Verkehrssektor in die Optimierung integrieren
- Der Einsatz von fester Biomasse stellt in der dezentralen Wärmeversorgung eine wichtige Übergangstechnologie dar
  - insbesondere für schlecht gedämmte bzw. nur unzureichend energetisch sanierbare Gebäude → keine sinnvolle erneuerbare Alternative
- Kopplung des Wärme- und Stromsektors nimmt von 2020 bis 2050 zu.
  - Kopplung vor allem über Wärmepumpen und auch Heizstäben
  - Flexible Biomasse WKK-Anlagen mit geringen Volllaststunden (Lückenfüller)

## 1.4 Stand des Wissens und der Technik

Es gibt zahlreiche Szenarien Studien über die Energiewende und erneuerbare Energien (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH 2018), andere die den Klimabeitrag modellieren (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2015). Es gibt aber nur wenige, die die Bioenergie in Details betrachten (Thrän 2015). Das Projekt Meilensteine 2030 (Thrän 2015) hat den Wärmesektor nicht im Detail betrachtet, aufgrund seiner Heterogenität. Aus diesem Hintergrund wurde das Projekt BioplanW speziell für den Wärmesektor und die Rolle Bioenergie initiiert. Ein weiteres Schwesterprojekt (Öko-Institut e.V. 2018) wurde gleichzeitig durchgeführt, mit dem Ziel, die Rolle der Bioenergie in beiden Strom- und Wärmesektor (Koch et al. 2018) zu analysieren. Im Verlauf der Projektbearbeitung wurden weitere Projekte begonnen die sich dem Thema der Biomasse befassen (Projekt TatBio (Thrän et al. 2019); Projekt BalanceE (Bioenergie im Stromsektor) (Millinger et al. 2017b), Projekt BeniVer (Bioenergie im Verkehrssektor) (Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme gGmbH) und Projekt BEPASO: Szenarien einer Bioökonomie 2050 – Potenziale, Zielkonflikte, Lösungsstrategien) (Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei).

### 1.4.1 Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

BENSIM (BioENERgy Simulation Model) und BENOPT (BioENERgy OPTimisation model) sind entwickelt worden, um den Wettbewerb zwischen Technologieoptionen darzustellen – mit besonderem Fokus auf Bioenergie in Deutschland. BENSIM/BENOPT existiert in zwei Hauptvarianten: (1) ein myopisches, rekursives Simulationsmodell, das den kostengünstigsten Technologiemit unter bestimmten Rahmenbedingungen sucht (BENSIM), und (2) ein perfect foresight Optimierungsmodell, was die optimale Allokation von Biomasse über verschiedenen Sektoren und Zielfunktionen untersucht (BENOPT).

Datenbasis für die Modellierungen sind Investitions- und Betriebskosten sowie Kosten und THG-Emissionen der Input-Output- Variablen für die Prozesse (Rohstoffe, Strom/Wärme, Nebenprodukte, etc.).

Durch die Rekursivität werden Pfadabhängigkeiten und Lock-In-Effekte im BENSIM-Modell abgebildet. Endogene Lerneffekte (Kostensenkungen in Abhängigkeit vom Zubau) sowie Entwicklungen der Wirkungsgrade und Biomassekosten beeinflussen die Gesamtkosten und verändern sich über die Zeit, wodurch sich die kostengünstigsten Technologien entsprechend ändern können. Das Modell beinhaltet ein Modul, womit die künftigen Entwicklungen der Biomassekosten abgeschätzt werden können. Anhand des Modells kann auch mittels verschiedener Verfahren (Monte Carlo, SOBOL) die Sensitivität der Entwicklungen untersucht werden, auf die eine Vielzahl an Parameter einen Einfluss hat, besonders im komplexen Bereich der Biomassenutzung.

Eine Liste der Publikation die aus BENSIM entstanden sind (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung GmbH):

- Jordan et al. 2020
- Jordan et al. 2019
- Millinger et al. 2019
- Millinger 2018
- Millinger et al. 2018
- Millinger und Thrän 2016
- Millinger et al. 2017a
- Thrän et al. 2017
- Thrän et al. 2016

Das Modell wurde im BioplanW Projekt genutzt und für spezifische Fragstellungen erweitert. Das Zusammenspiel der Technologieoptionen wird in seiner künftigen Entwicklung modellhaft abgeschätzt. Das Modell simuliert daraufhin konkret die Systemkonzepte (AP2) untereinander und in Bezug auf sich verändernde Anforderungen (z.B. THG-Kosten) und Marktsignale (auch in Bezug auf andere EE). Im Ergebnis liegen Marktentwicklungen der verschiedenen Wärmeoptionen zur Deckung der Nachfrage in den Teilmärkten unter den verschiedenen Anforderungen vor. Die Szenarienergebnisse werden genutzt, um die Auswirkungen (ökonomisch und ökologisch) neuer Konzepte im Energiesystem zu analysieren.

Das Modellframework LandSHIFT wurde entwickelt, um die räumlich und zeitliche Dynamik von Landnutzungsänderungen sowie deren Umweltfolgen zu berechnen. Hierbei unterscheidet es verschiedene Landnutzungsaktivitäten (u.a. Ackerbau, Weidenutzung sowie Siedlungsentwicklung) und ist damit in der Lage, auch Flächenkonkurrenzen abzubilden. Das Modell verfolgt einen Top-Down Ansatz und verortet die Produktion z.B. verschiedener Feldfrüchte sowie die Nachfrage nach Siedlungsfläche auf einem räumlichen Raster. Anwendungen finden sich auf kontinentaler und globaler Ebene in den Bereichen Bioenergie und biologische Kohlenstoffspeicherung (Projekt Meilensteine 2030; (Thrän et al. 2016)) sowie Bewässerungswassernutzung (EU-Projekte COMBINE und SCENES; Schaldach et al., 2012). Beispiele für Studien auf regionaler Ebene liegen u.a. für Brasilien (z.B. Projekt CarBioCial; Schaldach et al. 2018) und für den Nahen Osten im Bereich Weidenutzung vor (u.a. BMBF Projekt Glowa-Jordan; Schaldach et al. 2013).

Im Rahmen vom BioplanW Projekt wurde eine angepasste Modellversion LandSHIFT.D für Deutschland entwickelt. Das Modell arbeitet mit einer räumlichen Auflösung von 250m x 250m und bildet zusätzlich zu anderen Landnutzungsprozessen den Anbau von Miscanthus und Pappel als Energiepflanzen ab. Weiterhin wurde eine Schnittstelle zum Datenaustausch mit dem BENSIM Modell implementiert.



### 1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Innerhalb des Projektes wurde eine umfangreiche Informations- und Datenanalyse durchgeführt. Genutzte Literatur wurde im Literaturverzeichnis dargestellt.

### 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb der Projektlaufzeit fand ein intensiver Austausch mit dem Öko-Institut statt. Begründet ist diese Zusammenarbeit durch die zeitlich parallele Projektbearbeitung und des daher sinnvollen Austausches zwischen dem Projekt des Öko-Instituts (Koch et al. 2018) und BioplanW. Daten zu Wärmebedarfen einzelner Teilmärkte wurde dem Projektkonsortium durch das Öko-Institut zur Verfügung gestellt. Neben der Organisation regelmäßiger Projekttreffen, Qualitätssicherung der Produkte und Kommunikation mit den Partnern und dem Zuwendungsgeber, wurden Workshops mit Experten aus der Bioenergie und EE-Sektoren koordiniert. Dabei wurden Experten betroffener Ressorts und Systemplattformen (insb. BMWi) und dem BMWi-Förderprogramm Methodiken und Ergebnisse ausgetauscht. Es wurde ein politischer Begleitkreis einberufen der sich in regelmäßigen Abständen über Methodiken, Teilergebnissen, Ergebnissen und Handlungsempfehlungen austauschte. Dabei bestand der pol. Begleitkreis aus verschiedenen Institutionen (BMWi, BMEL<sup>1</sup>, BMUB, BMBF und UBA).

## 2 Eingehende Darstellung

Zur Beantwortung der Fragen (siehe Kapitel 1.1) wurde das Projekt in fünf Arbeitsschritte (Arbeitspakete (AP)) untergliedert, die in Abbildung 2 dargestellt sind. Sie umfassen (0) Koordination und Dialog, (1) Analyse des Wärmemarktes und die Klassifizierung relevanter Teilmärkte und ihrer Entwicklungsperspektiven, (2) modellhafte Konzeption und Beschreibung von Technologiekonzepten, in denen Bioenergie im Verbund mit anderen erneuerbaren Energien zur Wärmebereitstellung genutzt wird, (3) Modellierung der Teilmärkte unter verschiedenen Randbedingungen (Szenarien), (4) Abschätzung der Auswirkungen auf Effizienz, Kosten und Umwelt sowie (5) die Ableitung von Handlungsempfehlungen. Parallel werden die Methoden, Ergebnisse und Schlussfolgerungen sowohl mit der Wissenschaft als auch in Richtung der politischen Entscheidungsträger vernetzt.

---

<sup>1</sup> u.a. FNR Lenkungskreis zur Einhaltung der 1.BIMSchV, sowie die AG Technologien

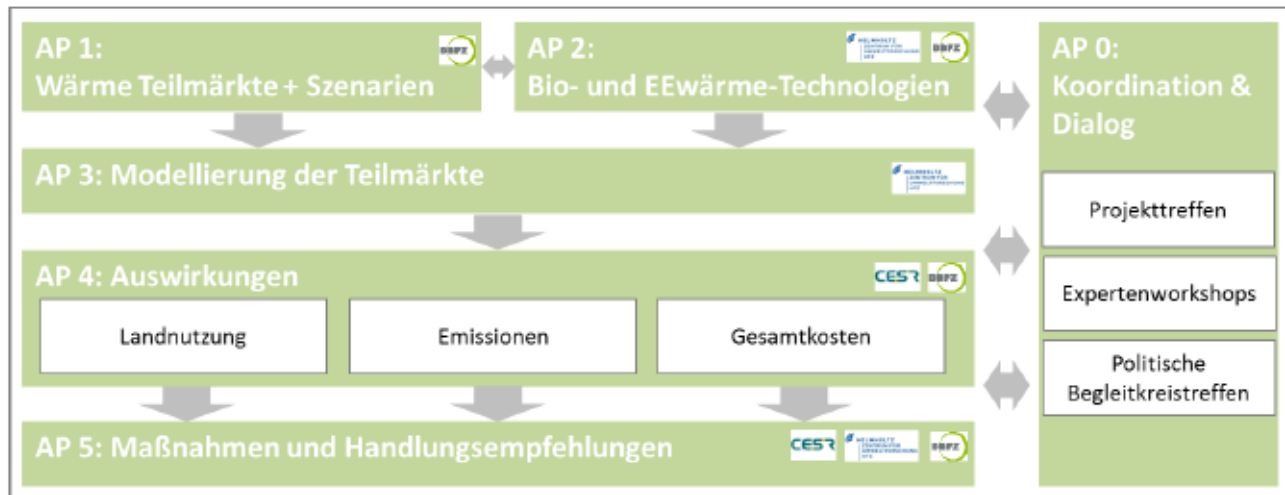


Abbildung 2 Arbeitspakete und Vernetzung im Projekt

## 2.1 Erzielte Ergebnisse

Innerhalb dieses Unterkapitels werden die erzielten Ergebnisse einzelner APs beschrieben. Aufgrund der Vernetzung der APs untereinander sind der Übersichtlichkeit Ergebnisse teilweise zusammengefasst und dargestellt.

### 2.1.1 Wärme Teilmärkte und Szenarien (AP1)

Der Wärmemarkt untergliedert sich in Teilmärkte mit verschiedener Charakteristik und daher bieten sich unterschiedliche Wärmebereitstellungsoptionen heute und künftig an. In diesem AP wurden Teilmärkte für die Wärme (Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme) formuliert, wobei verschiedene Rahmenbedingungen berücksichtigt werden, z.B. 1) Gebäudetypologie (z.B. Wohn- und Nichtwohngebäude, Größe, Baujahr, Energiebedarf, Sanierungsgrad) 2) Prozesswärme (Temperaturniveaus). Folgende Teilmärkte mit entsprechend möglichen Technologieoptionen könnten beispielsweise abgegrenzt werden 1) Wohngebäude - Niedrigenergie bzw. Passivhaus (z.B. Kamin- oder Pelletofen mit Wassertasche); 2) Wohngebäude - Altbau (un- und teilsaniert) (z.B. Biomassekesseln und ggf. Mikro-KWK); 3) Wohngebäude- Mehrfamilienhaus & Nicht-wohngebäude-GHD (Krankenhäuser, Schulen, usw.); 4) Industrielle Prozesswärme: a) unter 100 °C (Waschen und Trocknen), b) über 100 °C bzw. Dampf; 5) Integrierte industrielle Wärmeanwendungen. Die Teilmärkte wurden beschrieben, analysiert, in Szenarien abgebildet und modelliert.

Darüber hinaus wurden in diesem AP Szenarien entwickelt und die definierten Teilmärkte in Szenarien abgebildet. Hierzu fand eine Literaturanalyse statt, die u.a. folgende Themengebiete umfasst: 1) Szenarien, z.B. Energieszenarien, Entwicklungsszenarien des EEG-Anlagenbestandes; 2) Trends z.B. der Gebäudedämmung und Effizienz im Wärmebereich; 3) Potenzialanalysen, z.B. Biomassepotenziale (z.B. BIOPOT<sup>2</sup>). Es werden ein Szenario-framework definiert, und ein Trendszenario und weitere Szenarien

<sup>2</sup> FNR-Projekt „BIOPOT“; FKZ22020114



festgelegt. Basis für die Ausgestaltung der Szenarien bildet u.a. die Biomassepotenziale und sektorale Wärmebedarfe.

Um die Szenarienrahmen zu setzen, wurde Deutschland bis 2050 und die Sektoren reine Wärme, als auch Wärme und Strom ausgewählt. Der Fokus liegt auf Biomasse, aber auch andere erneuerbare Energien werden betrachtet. Für die Bestimmung der Szenarien wurde die Methode der Szenarioplanung angewandt. Zunächst wurden Einflussfaktoren identifiziert und die Unsichersten und Bedeutendsten ausgewählt und darauf aufbauend Szenarien erstellt und beschrieben. Der Prozess ist kurz in Abbildung 3 dargestellt.

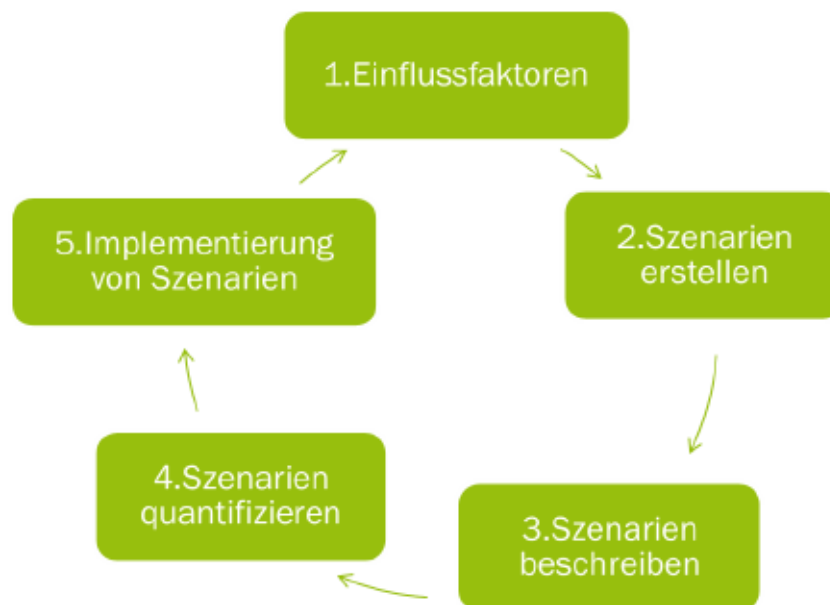


Abbildung 3 Kurzdarstellung der Szenarioplanung

## 1. Einflussfaktoren

Bei der Identifikation möglicher Einflussfaktoren wurden unterschiedliche Akteure einbezogen. Neben Brainstorming auf zwei Workshops wurden politische Beteiligte und Projektpartner einerseits und 20 Experten aus Wissenschaft und Industrie andererseits einbezogen. Es erfolgten Umfragen zu den Einflussfaktoren und deren Bedeutung. Die Rückmeldungen wurden zusammengeführt und die zwei wichtigsten und unsichersten Einflussfaktoren als Treiber für die Szenarios identifiziert. Dabei handelt es sich um kritische Szenariotreiber. Als Ergebnis wurden insgesamt 52 Einflussfaktoren genannt. Nach der Bewertung wurden als kritische Szenariotreiber die THG-Minderungsziele sowie die Biomassepotenziale identifiziert.

## 2. Szenarien erstellen

Innerhalb dieses Bearbeitungsschritts wurden die Inputparameter für die definierten Szenarien beschrieben. Basierend auf Forschungsergebnissen und Strategiezielen, die die Spannweite der Einflussfaktoren als Bestandteil für die Szenarien (Repenning et al. 2015) bestimmen, wurde in einem Workshop weiter diskutiert. Basis der Parameter sind aktuelle Szenarien, bei denen die Szenariomentwicklung bis 2050 im Fokus der Untersuchungen lag und politische Vorgaben. Mit

Veröffentlichung der neuen „Langfristszenarien“ (Pfluger et al. 2017a) des BMWi wurden die Szenarien überprüft.

Auf Basis der gewählten kritischen Szenariotreiber wurden vier Szenarien erstellt, wie in Abbildung 4 gezeigt. Alle Treibhausgasminderungen beziehen sich auf das Jahr 1990. Die Szenarien „Klimakompromiss“ erzielen bis 2050 eine THG-Minderung von 80% und die Szenarien „Klimafreundlich“ von 95% gegenüber 1990. Die Szenarien „Standard“ begrenzen das Biomassepotenzial auf Abfall- und Reststoffe und die Szenarien „Pro Biomasse“ erlauben auch Anbaubiomasse. Angenommen werden für die Abfall- und Reststoffe 1.000 PJ (Brosowski et al. 2015) und für die Anbaubiomasse 2 Mio. ha auf Basis von Workshop Diskussionen.

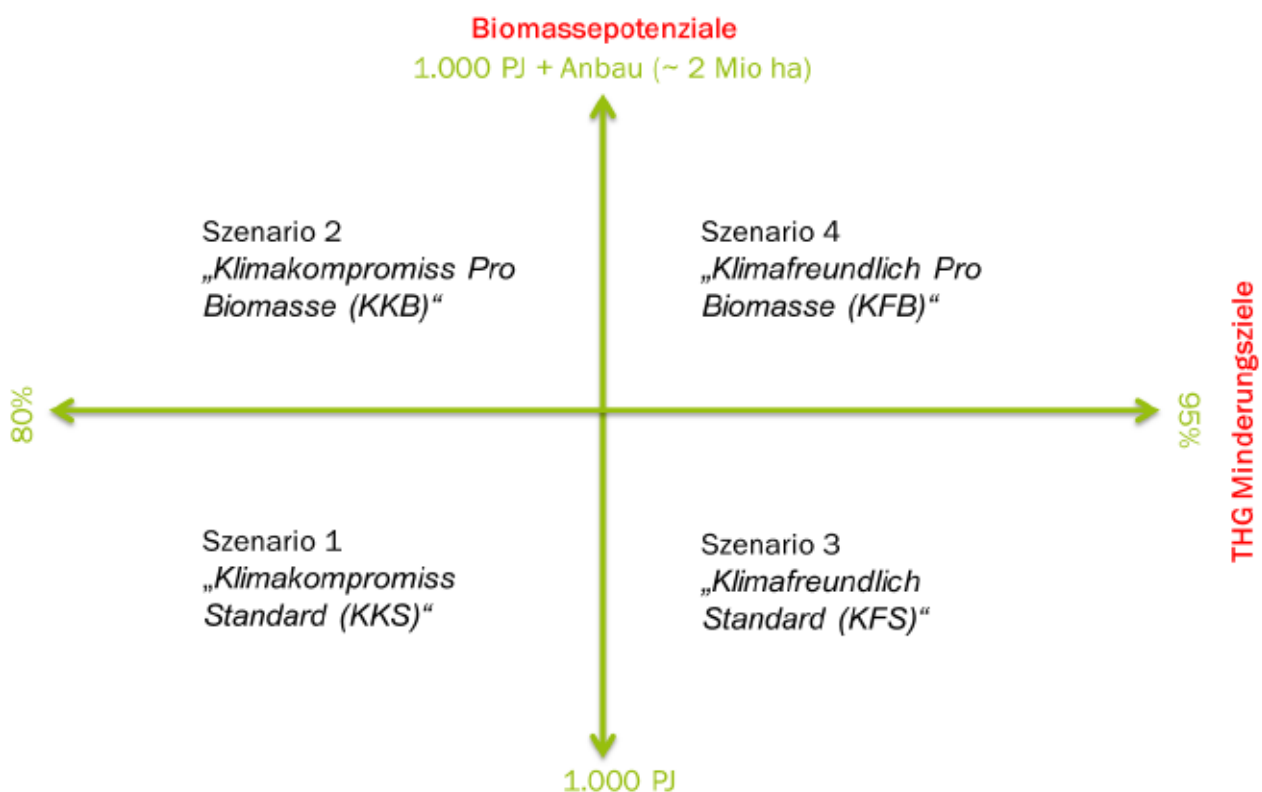


Abbildung 4 Szenario Achsen

#### Klimakompromiss Standard (KKS)

In diesem Szenario beträgt das Ziel der THG-Minderung lediglich 80%. Das Biomassepotenzial ergibt sich vollständig aus den Abfall- und Reststoffen in Höhe von 1.000 PJ. Es wird kein zusätzlicher Anbau von Biomasse für die energetische Nutzung betrieben und kein Import angenommen.

#### Klimakompromiss Pro Biomasse (KKB):

In diesem Szenario wird ebenfalls eine Reduzierung um 80% der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 angesetzt. Im Kontrast zum vorherigen Szenario werden zusätzlich zur Biomasse aus Abfall- und Reststoffen jedoch auch noch 2 Mio. ha an Fläche für Anbaubiomasse angenommen. Es findet kein Import statt.

### Klimafreundlich Standard (KFS):

In diesem Szenario wird eine Reduzierung der THG um 95% angesetzt. Um dieses Ziel zu erreichen wird an Biomasse nur das Reststoff- und Abfallpotenzial genutzt, jedoch keine Anbaubiomasse oder Import.

### Klimafreundlich Pro Biomasse (KFB):

In diesem Szenario wird die Reduzierung von 95% THG gegenüber 1990 festgelegt. Zusätzlich wird zu Biomasse aus Rest- und Abfallstoffen durch 2 Mio. ha. an Fläche für Anbaubiomasse erweitert, ohne Import.

## 3. Szenarien beschreiben

Nachfolgend werden alle Szenarien mit verwendeten Quellen, Daten und Annahmen beschrieben und charakterisiert. Basis bilden dabei rechtliche Grundlagen, Workshops, Umfragen unter Experten und die bereits in Punkt 2. benannten Studien.

### Politische Ziele in den Szenarien

- **COP21, Klimaschutzplan 2050**

Im Jahr 2015 wurden auf der 21. UN-Klimakonferenz in Paris mehrere Klimaschutzzusagen definiert. Ziel ist es, den Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu halten. Dabei gilt es Anstrengungen zu unternehmen, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Des Weiteren soll die Fähigkeit zur Anpassung an die nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderungen erhöht werden. Es soll die Widerstandsfähigkeit gegenüber Klimaänderungen sowie eine hinsichtlich der Treibhausgas emissionsarme Entwicklung so gefördert werden, dass die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird. Finanzmittelflüsse sollen auf emissionsarme und Klimaresiliente Pfade gelenkt werden (Artikel 2-1-c). Zur Erreichung der genannten politischen Zusagen ist es notwendig, dass jedes Land eigene nationale Beiträge zur THG-Reduktion (NDCs) erstellt. Dabei steigen die Anstrengungen aller Parteien im Laufe der Zeit an (Artikel 3). Ab 2023 werden die gesetzten Ziele alle 5 Jahre überprüft und weiter verschärft.

Der Klimaschutzplan 2050 enthält klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Im Kontext von globalen und EU-weiten Regularien wird dargelegt wie das 2°-Ziel der COP21 erreicht werden soll, aufgeteilt nach einzelnen Sektoren. So wird für den Energiesektor eine hohe Effizienzsteigerung angestrebt und der restliche Energiebedarf soll durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden. Dabei wird die Sektorkopplung angestrebt. Biomasse wird insbesondere im Luft- und Schiffsverkehr sowie in Teilen der Industrie (energetisch) genutzt. Dabei soll verstärkt auf eine Kaskadennutzung von Biomasse eingegangen werden. Grund sind Grenzen für den weiteren Ausbau von Anbaubiomasse (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2016).

*Mit der Annahme, dass die gesteckten Ziele für die Begrenzung der Temperaturerhöhung weltweit nicht erreicht werden, wird der Druck auf eine Reduzierung um 95% in Deutschland noch stärker. In beiden Szenarien der 80% THG-Minderung werden die Klimaschutzziele und Naturschutzziele nicht vollständig erreicht, sodass der Druck auf der Reduzierung innerhalb 95% THG-Szenarien wächst um die Ziele zu erreichen.*



- **Energieeinsparverordnung (EnEV)**

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) dient der Umsetzung der EU Richtlinie 2010/31/EU. Es werden Anforderungen an die Energieeffizienz bei der Errichtung und Modernisierung von Gebäuden gestellt. Innerhalb dieser Verordnung werden baulicher Wärmeschutz und die Effizienz der Energieversorgung bei Ermittlung der energetischen Qualität berücksichtigt. Eine leitungsgebundene Wärmeversorgung geht über den Primärenergiefaktor in die Primärenergiebilanz des Gebäudes ein. Zu errichtende Wohngebäude sind so auszuführen, dass der Jahres-Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Kühlung den Wert des Jahres-Primärenergiebedarfs eines Referenzgebäudes gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung mit der in Anlage 1 Tabelle 1 der EnEV angegebenen technischen Referenzausführung nicht überschreitet. Die EnEV ist ein Beitrag zur Erreichung der energiepolitischen Ziele der Bundesregierung, insbesondere einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand bis zum Jahr 2050 zu erreichen (Deutscher Bundestag 16.11.2001).

*Ergebnisse aus der Technologieprägung finden innerhalb des Bio-Strom-Wärme Projektes statt und werden innerhalb dieses Projektes übertragen. Dabei finden kontinuierliche Effizienzsteigerungen über die Simulationszeit statt. Es handelt sich dabei unter anderem um Wirkungsgradsteigerungen aus Lerneffekten.*

- **Erneuerbare-Energien-Gesetz 2017 (EEG 2017) Ausbaurkorridor**

Wesentlicher Faktor ist, dass der Anteil der Erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2050 weiter gesteigert werden soll. Ziel ist es bis 2025 den Anteil erneuerbarer Energien (Strom) 40 – 45%, in 2035 55-60% und 2050 min. 80% zu erreichen. Dabei soll die Kosteneffizienz erhöht werden und eine Akteursvielfalt bewahrt werden.

Zu den rechtlichen Rahmenbedingungen ist zu erwähnen, dass im Vergleich zu vorangegangenen Novellierungen in 2017 Ausschreibung von EE-Anlagen erfolgen. Dabei wird eine vereinfachte Teilnahme an den Auktionen für definierte "Bürgergesellschaften" gewährt. Von der Ausschreibung sind sowohl Windenergie-, PV- und Biomasseanlagen betroffen. Ausgenommen sind "kleine" Anlagen mit einer Leistung <750kW und bei Biomasse <150 kW. 13% der Braunkohlekapazitäten werden in "Sicherheitsbereitschaft mit anschließender Stilllegung" überführt. Folgende Ausbaurkorridore wurden definiert. An Offshore-Windkraftanlagen sollen bis 2030 insgesamt 15.000 MW installiert werden. In den Jahren 2021 und 2022 ist ein Zubau von 500 MW/a vorgesehen. Von 2023 bis 2025 steigt dieser auf 700 MW/a und ab 2026 ist ein jährlicher Ausbau von 840 MW geplant. An Photovoltaikanlagen mit mehr als 750 kW werden jährlich 600 MW ausgeschrieben, Die Deckelung bei 52 GW entfällt. Für Biomasseanlagen ist für 2017 bis 2019 ein jährlicher Zubau von 150 MW (brutto) und in 2020 bis 2022 ein Zubau von 200 MW/a (brutto) vorgesehen. Alle Bestandsanlagen können an der Ausschreibung teilnehmen, um eine 10-jährige Anschlussförderung zu erhalten, wenn Strom bedarfsgerecht und flexibel erzeugt wird.

*Bei 80%-Szenarien werden die Ziele nicht erreicht und es gibt noch fossile Anlagen für Energieversorgung. Bei 95%-Szenarien wird angenommen, dass Ziele erreicht werden und kaum fossile mehr im Energiesystem.*

- **Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung**

Das Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung vom 28. September 2010 ist ein Strategiepapier zur angestrebten Entwicklung der Energieversorgung (Tabelle 1). Deutschland steigt schrittweise aus der Nutzung der Kernenergie aus, verbessert die Energieeffizienz und beschleunigt den Umstieg auf die erneuerbaren Energien. Zitat: "Die wichtigsten Elemente des Konzepts sind: Ausbau der erneuerbaren Energien, Ausbau der Stromnetze, Erweiterung der Speicherkapazitäten, Steigerung der Energieeffizienz, Forschung für bessere und kostengünstige Energietechnologien." Das Energiekonzept in der ursprünglichen Form enthält auch noch Kernenergie als Brückentechnologie. (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2010).

Tabelle 1 Zieldatensatz des Energiekonzepts 2010 und EEG 2017

| Jahr  | Senkung der Treibhausgasemissionen | Erneuerbare Anteil        |                      | Senkung Energieverbrauch |                    |                      | Steigerung Energieproduktivität<br>(2,1 % p.a) |
|-------|------------------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|----------------------|------------------------------------------------|
|       |                                    | Bruttoendenergieverbrauch | Bruttostromverbrauch | Primärenergie            | Endenergie Verkehr | Bruttostromverbrauch |                                                |
| Basis | 1990                               |                           |                      | 2008                     | 2005               | 2008                 | 2008                                           |
| 2020  | min. 40 %                          | 18 %                      | 35 %                 | 20 %                     | 10 %               | 10 %                 |                                                |
| 2025  |                                    |                           | *40-45 %             |                          |                    |                      |                                                |
| 2030  | min. 55 %                          | 30 %                      | 50 %                 |                          |                    |                      |                                                |
| 2035  |                                    |                           | *55-60 %             |                          |                    |                      |                                                |
| 2040  | min. 70 %                          | 45 %                      | 65 %                 |                          |                    |                      |                                                |
| 2045  |                                    |                           |                      |                          |                    |                      |                                                |
| 2050  | 80 % bis 95 %                      | 60 %                      | 80 %                 | 50 %                     | 40 %               | 25 %                 |                                                |

\*Erneuerbare-Energien-Gesetz 2017 §1 (EEG2017)

\*\* Primärenergiebedarfsenkung Gebäude ggü. 2008 (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016)

Der Wärmebedarf von Gebäuden wurde bis 2015 (ggü. 2008) um 11 % gesenkt (siehe Abbildung 5) (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016). Für eine 20%-ige Senkung bis 2020 und 80% bis 2050 (ggü. 2008) müsste eine schnellere Dynamik erfolgen. Diese Kernaussage wird berücksichtigt und zeitlich im Projekt angewendet.



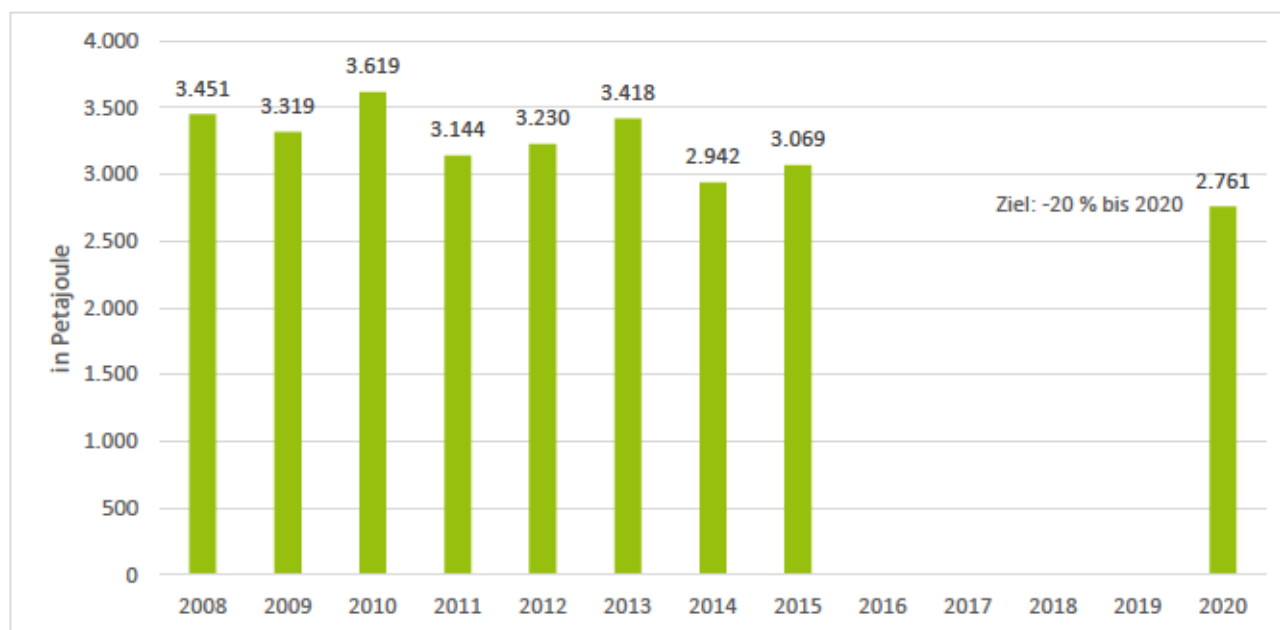


Abbildung 5 Endenergieverbrauch Gebäude (Wärme) (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016)

Über die Gebäudesanierungsrate gibt es keine regelmäßige Ermittlung, der dena-Gebäudereport weist darauf hin, dass zwar die Märkte für energieeffiziente Heizungen um 10 % und für Fenster um 4 % wuchsen (2012 bis 2015), der Absatz von Dämmstoffen sank jedoch um 11%. Diese Werte lassen darauf schließen, dass sich die Sanierungsrate sich nicht wie gewünscht verhält (Bigalke et al. 2016; Deutsche Energie-Agentur GmbH 06.02.2017). „Beschleunigung ist bei der Energieeffizienz im Wärmesektor nicht erkennbar. Der Handlungsdruck steigt damit rapide an. Wir müssen immer mehr in immer kürzerer Zeit erreichen“ (Deutsche Energie-Agentur GmbH 06.02.2017). Daher wird angenommen, dass die Ziele für 2050 ohne weiteren Druck nicht zu erreichen sind.

Der Anteil der erneuerbarer Energien im Stromverbrauch lag in 2016 bei 31,7 % (Umweltbundesamt 2017a). Die Expertenkommission zum Monitoringprozess hält eine Zielerreichung für 2020 (35%) und 2030 (60%) für wahrscheinlich. Damit sollte der Verlauf für 2050 weitergehen (80%). Eindeutig sollen die Ziele der Bundesregierung im Energiekonzept erreicht werden.

*Die THG Minderung in den Sektoren orientiert sich konkret an den Klimaschutzzielen. Dabei gibt es einen Unterschied für 80 und 95% Szenario.*

*Die Verläufe der Sanierungsrate von Gebäuden ist ein dynamisches Ergebnis über die Zeit des Bio-Strom-Wärme Projektes. Dabei findet innerhalb der Simulation eine kontinuierliche Sanierung von Gebäudekomponenten statt. Jährliche Sanierungsraten können dem Bio-Strom-Wärme Projekt entnommen werden.*

- **Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG)**

Zweck dieses Gesetzes ist es, im Interesse des Klimaschutzes, der Schonung fossiler Ressourcen und der Minderung der Abhängigkeit von Energieimporten, eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Wärme und Kälte aus Erneuerbaren Energien zu fördern. Unter Wahrung der wirtschaftlichen

Vertretbarkeit, ist das Ziel den Anteil Erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte bis zum Jahr 2020 auf 14 Prozent zu erhöhen.

Das Gesetz dient teilweise zur Umsetzung der EU-Richtlinie 2009/28/EG in nationales Recht. Eigentümer von neu errichteten Gebäuden müssen den Wärme- und Kälteenergiebedarf durch eine anteilige Nutzung von Erneuerbaren Energien decken. Durch das Europarechtsanpassungsgesetz vom 12. April 2011 (Bundesanzeiger 15.04.2011) wurde einigen Details geändert. So muss Wärme aus Wärmenetzen zu einem im Gesetz definierten Mindestanteil aus erneuerbaren Energien, Abwärme oder hocheffizienten KWK-Anlagen stammen.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen umfassen, dass Fördermittel bei der Altbausanierung bei Nachrüstung von Heizungen vergeben werden. Neubauten müssen mit einem Mindestprozentsatz durch EE versorgt werden. Den Rahmenbedingungen ist genüge getan, wenn mindestens 15 % des Wärme- und Kälteenergiebedarfs durch solare Strahlungsenergie gedeckt werden. Bei der Nutzung von Biogas müssen 30 % des Bedarfs dadurch gedeckt werden. Für flüssige und feste Biomasse muss der Bedarf an Wärme- und Kälteenergie zu 50 % gedeckt werden. Auch bei der Nutzung von Geothermie und Umweltwärme muss mindestens die Hälfte des Bedarfs aus dieser Quelle gedeckt werden um die Ansprüche der Förderung zu erfüllen.

Alternativ können Ersatzmaßnahmen verwendet werden. Dies ist unter Anderem der Fall, wenn der Wärme- und Kälteenergiebedarf mindestens zur Hälfte aus Abwärme oder aus KWK-Anlagen bedient wird. Weiterhin ist es durch das Ergreifen von Energieeffizienzmaßnahmen möglich den Anforderungen zu entsprechen. Auch die Nutzung von Fernwärme oder Fernkälte ist eine anerkannte Ersatzmaßnahme, solange diese aus EE-Anlagen, aus Abwärme oder aus KWK-Anlagen stammt

*Das Ziel 14% soll für allen Szenarien bis 2020 erreicht.*

- **Digitalisierung der Energiewende**

Wichtigster Bestandteil des GDEW ist das Messstellenbetriebsgesetz (MsbG). Kernziel des MsbG ist es einen Rollout intelligenter Messtechnik (intelligentes Messsystem und moderne Messeinrichtungen) auf den Weg zu bringen, dafür werden technische und regulatorische Vorgaben gemacht. Die Mess- und Eichverordnung, das Energiewirtschaftsgesetz, das Erneuerbare-Energien-Gesetz und andere Verordnungen werden entsprechend angepasst um auch für intelligente Messsysteme zu gelten.

*Die Digitalisierung wird in den Technologiesteckbriefen berücksichtigt. Dabei ist eine voranschreitende Digitalisierung von Verbundsystemen und SmartHome bedacht damit Komponenten zusammen agieren können.*

## Zusammenfassung

Tabelle 2 Erreichung der Ziele im Projekt Bioplan W

| Dokument                                    | Ziele 2050                                                                      | Zielerreichung 2050<br>80%                                                                   | Zielerreichung 2050<br>95%                                                                        |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| COP21, Klimaschutzplan                      | Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen      | Übergeordnete Ziele werden nicht erreicht und damit der Druck auf Energiesektor noch stärker | Übergeordnete Ziele werden nicht erreicht und damit der Druck auf Energiesektor noch viel stärker |
| Erneuerbare-Energien-Gesetz 2017 (EEG 2017) | Ausbaukorridore EE Anlagen                                                      | Ausbauziele werden nicht erreicht, es gibt noch fossile im System                            | Ausbauziele werden erreicht, kaum fossil im System                                                |
| Energiekonzept                              | THG 80-95%                                                                      | THG 80%                                                                                      | THG 95%                                                                                           |
|                                             | Senkung Energieverbrauch im Gebäudewärme 80 % (ab 2020 Sanierungs-rate 2 % p.a) | Nicht erreicht (wie viel)                                                                    | erreicht                                                                                          |
| Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) | 14% bis 2020                                                                    | Ist bis 2020 erreicht                                                                        | Ist bis 2020 erreicht                                                                             |
| Digitalisierung der Energiewende            | Intelligente Messtechnik vorantreiben                                           | Es ist stark vorangetrieben und in Steckbriefe berücksichtigt (z.B. Smart Home)              | Es ist stark vorangetrieben und in Steckbriefe berücksichtigt (z.B. Smart Home)                   |

## Sozioökonomische Daten: Demographie, wirtschaftliche und strukturelle Annahmen

Innerhalb eines Workshops 2017 wurde zusammen mit wissenschaftlich Experten entschieden, dass sozioökonomische Daten aus den Langfristszenarien (Pfluger et al. 2017a) angewendet werden. Dabei soll eine Breite Vergleichbarkeit mit vorangegangenen Studien ermöglicht werden.

Es wurden folgende Parameter als wichtige Einflussfaktoren identifiziert und im Folgenden beschrieben:

- Bevölkerungsentwicklung
- Wirtschaftsentwicklung
- Entwicklung der Energiepreise
- Preise für Treibhausgas-Emissionszertifikate

- **Bevölkerungsentwicklung**

Die Bevölkerungsentwicklung wird zwischen den Szenarien nicht variiert. Sie entspricht den Annahmen im Projekt „Klimaschutzszenario 2050“ des Öko-Instituts (Repenning et al. 2014) und den „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ des BMWi. Die 13. Bevölkerungsvorausberechnung erschien mit einem sechsjährigen Abstand zur 12. Koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung.

### Bevölkerungsentwicklung bis 2050

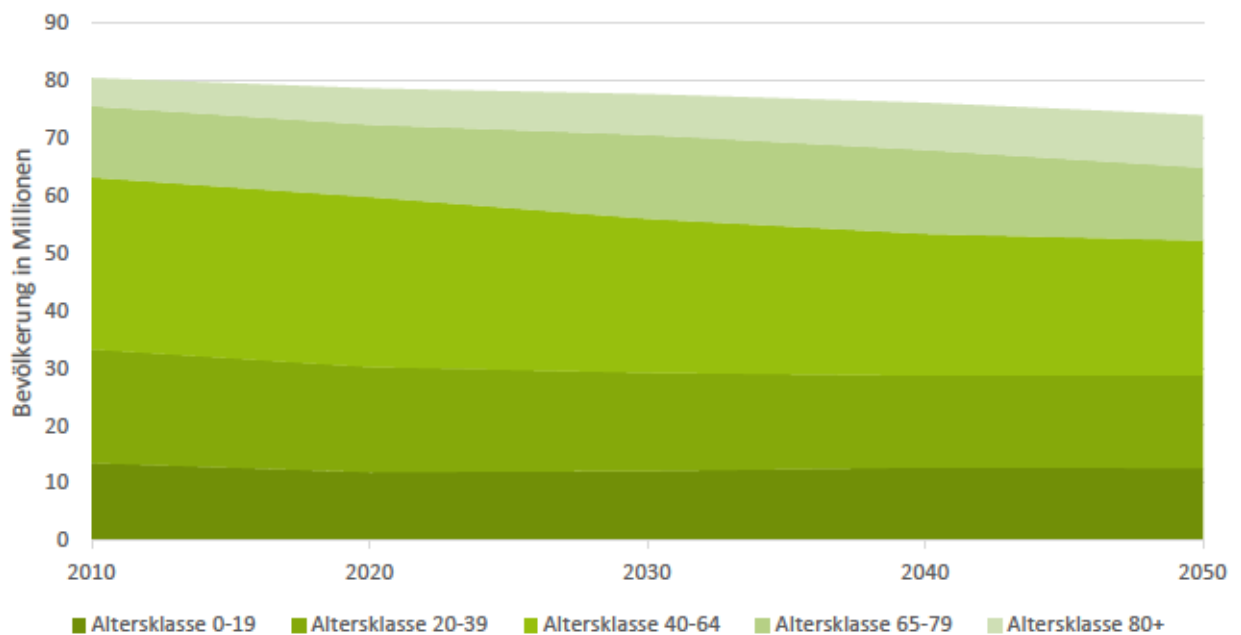


Abbildung 6 Annahme für Bevölkerungsentwicklung bis 2050 (Pfluger et al. 2017b)

Tabelle 3 Angenommene Entwicklung der Bevölkerung bis 2050 (Pfluger et al. 2017b)

|                    | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| Altersklasse 0-19  | 13,5 | 11,9 | 12,1 | 12,7 | 12,6 |
| Altersklasse 20-39 | 19,8 | 18,3 | 17,1 | 16,0 | 16,1 |
| Altersklasse 40-64 | 29,9 | 29,6 | 26,8 | 24,7 | 23,5 |
| Altersklasse 65-79 | 12,4 | 12,6 | 14,6 | 14,6 | 12,7 |
| Altersklasse 80+   | 4,9  | 6,39 | 7,1  | 8,2  | 9,1  |
| Gesamtbevölkerung  | 80,6 | 78,8 | 77,7 | 76,2 | 74,0 |



- **Wirtschaftsentwicklung**

Die für Deutschland resultierende Entwicklung des preisbereinigten Bruttoinlandsproduktes (BIP) ist in Abbildung 7 dargestellt und wird weiteren Wirtschaftsprojektionen zum Vergleich gegenübergestellt. Aufgrund des weltwirtschaftlichen Einbruchs, Mitte 2008, ist das Bruttoinlandsprodukt 2009 in Deutschland gegenüber dem 2007 um etwa 5 % geschrumpft. Ausgehend von dem stark verminderten Niveau der Wirtschaftstätigkeit 2009 zeigte sich ab 2010 in Deutschland ein unerwartet kräftiges Wachstum. Die künftige Entwicklung verbleibt allerdings unsicher: Im Jahr 2012 betrug das Wirtschaftswachstum 0,7 % (Statistisches Bundesamt 15.01.2013). Für die Darstellung des preisbereinigten BIP ergibt sich vor dieser Szenerie von 2010 bis 2030 im Durchschnitt ein Wachstum von 0,93 % pro Jahr. Von 2030-2050 wird von einer Wachstumsrate von rund 0,61 % pro Jahr ausgegangen (Repenning et al. 2015). Innerhalb (Pfluger et al. 2017a) ist eine Spannweite von 0,8 % pro Jahr und 0,7 % pro Jahr vorhanden.

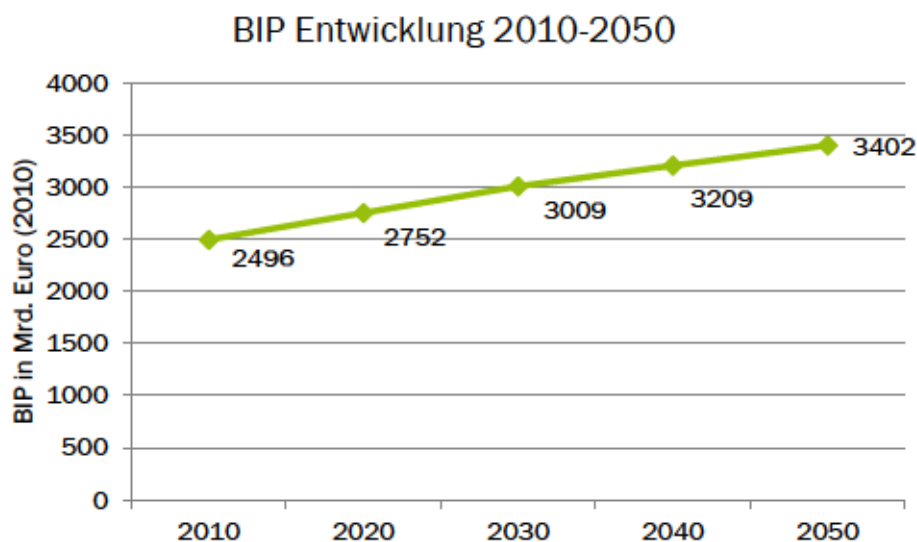


Abbildung 7 Annahme für BIP Entwicklung 2010-2050 Quellen: (Repenning et al. 2015), Statistisches Bundesamt 15.01.2013

- **Preise für Treibhausgas-Emissionszertifikate**

Zum Zeitpunkt der Recherche der Preise für Emissionszertifikate (August 2017) wurden ca. 5 € je EU-Emissionsberechtigung (€/EUA) veranschlagt. Perspektivisch ist anzunehmen, dass dieser Preis auch auf Grund politischer Maßnahmen steigen wird. Hierbei gibt es eine große Spannweite in den Vorhersagen, da die politischen Maßnahmen mit hohen Unsicherheiten behaftet sind.

So steigt in (Schlesinger et al. 2014) der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis von 10 €/t CO<sub>2</sub> in 2020 auf 40€/t CO<sub>2</sub> in 2030 bis zu 65 €/t CO<sub>2</sub> und 76 €/t CO<sub>2</sub> in 2040 und 2050 (2011er Preisbasis).

In (Prognos AG et al. 2010) wurde der CO<sub>2</sub>-Preis für die Referenzentwicklung 2020 auf 20 €/EUA sowie 2030 auf 30 €/EUA festgesetzt. Für 2040/2050 wurde ein Preis von 40 bzw. 50 €/EUA fortgeschrieben (Preisbasis jeweils 2008). Im Zielszenario erhöht sich der Preis auf 38 €/EUA, für 2030, 57 €/EUA im Jahr 2040 und 75 €/EUA für 2050. Die Leitstudie von (Pfluger et al. 2017a) nimmt im Referenzszenario lediglich Preise von 10, 15, 20 und 30 € / Tonne für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 an (Preisbasis 2010).



Die Energy Roadmap der Europäischen Kommission zeigt die Preisentwicklung (siehe Abbildung 8) des ETS für verschiedene Energieszenarien auf (European Commission 2011a, 2011b). So wurde bei der Referenzentwicklung für 2020 ein EUA-Preis von 18 €/EUA sowie für 2030 von 40 €/EUA ermittelt, für 2040/2050 ergeben sich Preise von ca. 50 €/EUA (Preisbasis jeweils 2008). In weiteren Szenarien, beispielsweise bei verspäteter CCS-Einführung oder geringer Nutzung der Kernkraft steigen die EUA-Preise auf 55€ bzw. 63 €/EUA in 2030 und 270 bzw. 310 €/EUA in 2050.

### Entwicklung des ETS in der EU-Energy-Roadmap

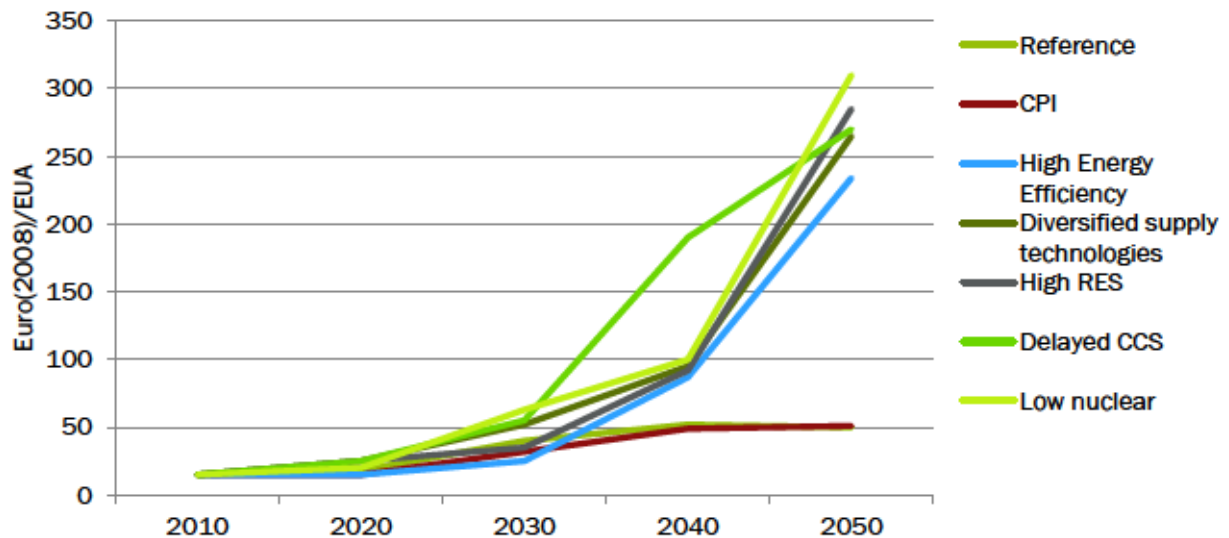


Abbildung 8 Entwicklung der ETS-Preise in der EU-Energy Roadmap (European Commission 2011a)

Als Grundlage werden die ETS-Preisentwicklungen von (Repenning et al. 2015) übernommen. Die ETS Preise in den beiden Klimaschutzszenarien KKS+KKB (80% THG) werden wie folgt begründet: Um für 2020 das EU-Minderungsziel von 25% ggü. 1990 zu erreichen, ergibt sich ein Preis von 23€ pro EUA. Hierfür wurden Angebot und Nachfrage in den folgenden Jahren abgeschätzt (Herrmann und Matthes 2012).

Die ETS-Preise für die Jahre 2030 und 2040 in Höhe von 50€ bzw. 90€ werden vom Öko-Institut übernommen (Repenning et al. 2015). Diese wiederum beziehen sich auf die EU-Energy-Roadmap. Die Preise entsprechen einer positiven Entwicklung von Erneuerbare Energien und Energieeffizienz durch politische Maßnahmen und liegen im Mittelfeld der Preise in der EU-Energy-Roadmap.

Für 2050 wird unterstellt, dass Maßnahmen mit geringeren Verteilungseffekten durchgeführt werden, sodass der Preis für EUA 130€ beträgt. Das liegt weit unter den Werten der EU-Energy-Roadmap, die in ihren Szenarien zur Zielerreichung zwischen 234 und 310 €/EUA liegen (Repenning et al. 2015).

In den beiden Szenarien mit höherer Treibhausgasvermeidung Klimaschutzszenario KFS+KFB (95THG) wird zur Zielerreichung in 2020 ein CO<sub>2</sub>-Preis von 30 €/EUA angenommen, der bis zum Jahr 2050 linear auf 200 €/EUA ansteigt. Abbildung 9 gibt einen Überblick über die in den beiden Szenarien definierten Preise für Treibhausgas-Emissionszertifikate. Zum Erreichen der Klimaschutzziele ist es notwendig, dass Preise für Emissionszertifikate steigen.

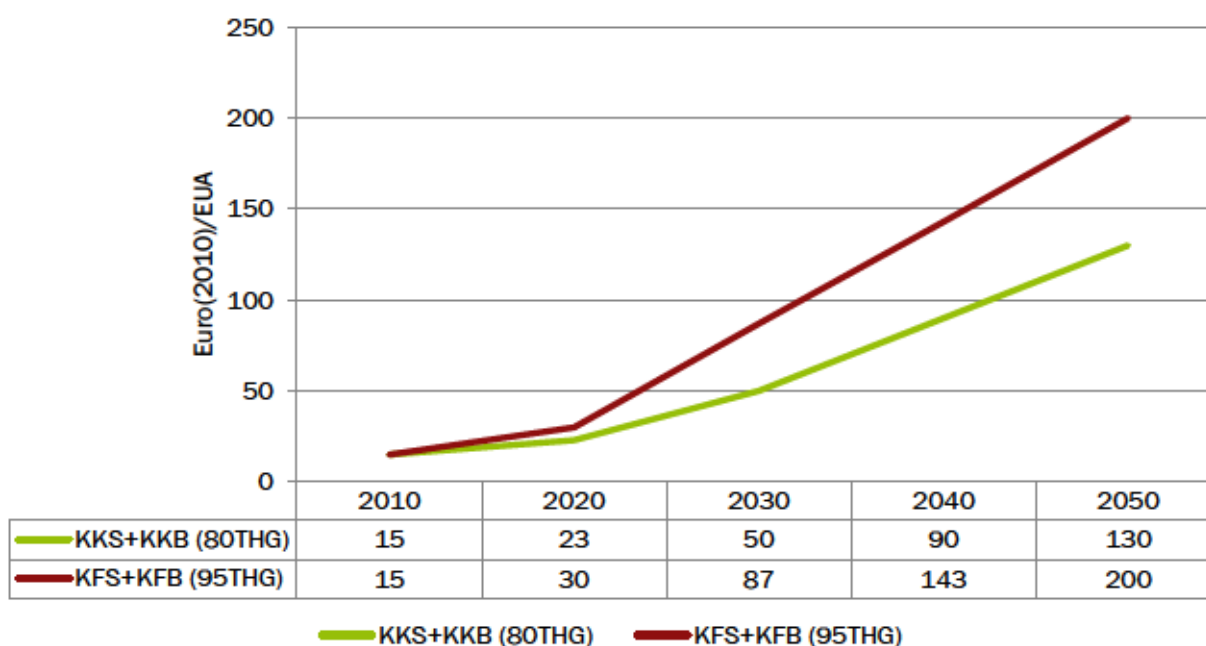


Abbildung 9 Annahmen für Treibhausgas-Emissionszertifikatspreise 2010-2050 (Repenning et al. 2015)

### • Strompreisentwicklung

Für Strompreisvorhersagen und Ausbildung von Kernentwicklungen innerhalb einzelner Sektoren (Private Haushalte, Gewerbe-Handel-Dienstleistungen, Industrie) zu bestimmen, ist es erforderlich Endverbraucher-Strompreisentwicklungen für diese Sektoren darzustellen. Eine Differenzierung dieser Preise wird innerhalb der Modellierung einzelner Teilmärkte angewendet. In gängigen Langfristszenarien sind modellierte Börsenstrompreise bzw. Börsengaspreise von heute bis 2050 angegeben. Auf Basis dieser Börsenpreise müssen nun Endverbraucherpreise in den einzelnen Sub-Sektoren von heute bis 2050 abgeleitet werden.

Um ein konsistentes Datenpaket mit Entwicklungsparametern zu gewährleisten wird für die Darstellung der Strompreisentwicklungen auf die „Klimaschutzszenarien 2050“ des Öko-Instituts zurückgegriffen (Repenning et al. 2015). Basierend auf dieser Studie erfolgte die Anpassung einzelner Parameter (CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisentwicklung und Strompreisentwicklungen). Hintergrund sind die im Strompreis beinhalteten CO<sub>2</sub>-Preisentwicklungen und eine nicht vorhandene Differenzierung der Strompreise für einzelne Sektoren (Privathaushalte, Gewerbe-Handel-Dienstleistungen, Industrie).

Im jährlich erscheinenden Monitoringbericht der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt 2018) sind die verbrauchsabhängigen Endverbraucherstrompreise für verschiedene Abnehmergruppen (Haushalte, Gewerbe, Industrie) detailliert aufgeschlüsselt. Anhand des Basisjahres 2015 wurde der Anteil des Börsenstrompreises für die einzelnen Verbrauchergruppen ermittelt und den entsprechenden Teilmärkten im Projekt BioPlanW zugeordnet. Dabei wurde der Anteil der EEG-Umlage herausgerechnet, da Förderungen und Umlagen aus dem EEG sowohl in BioPlanW als auch in Repenning et al. 2015 nicht berücksichtigt werden. Anhand der ermittelten Faktoren konnten auf Basis der Börsenstrompreise aus (Repenning et al. 2015) die Endverbraucherpreise für die einzelnen Teilmärkte in die Zukunft projiziert werden (Abbildung 10).

### Endverbraucherstrompreise je Szenario und Sektor (ohne EEG-Umlagen)

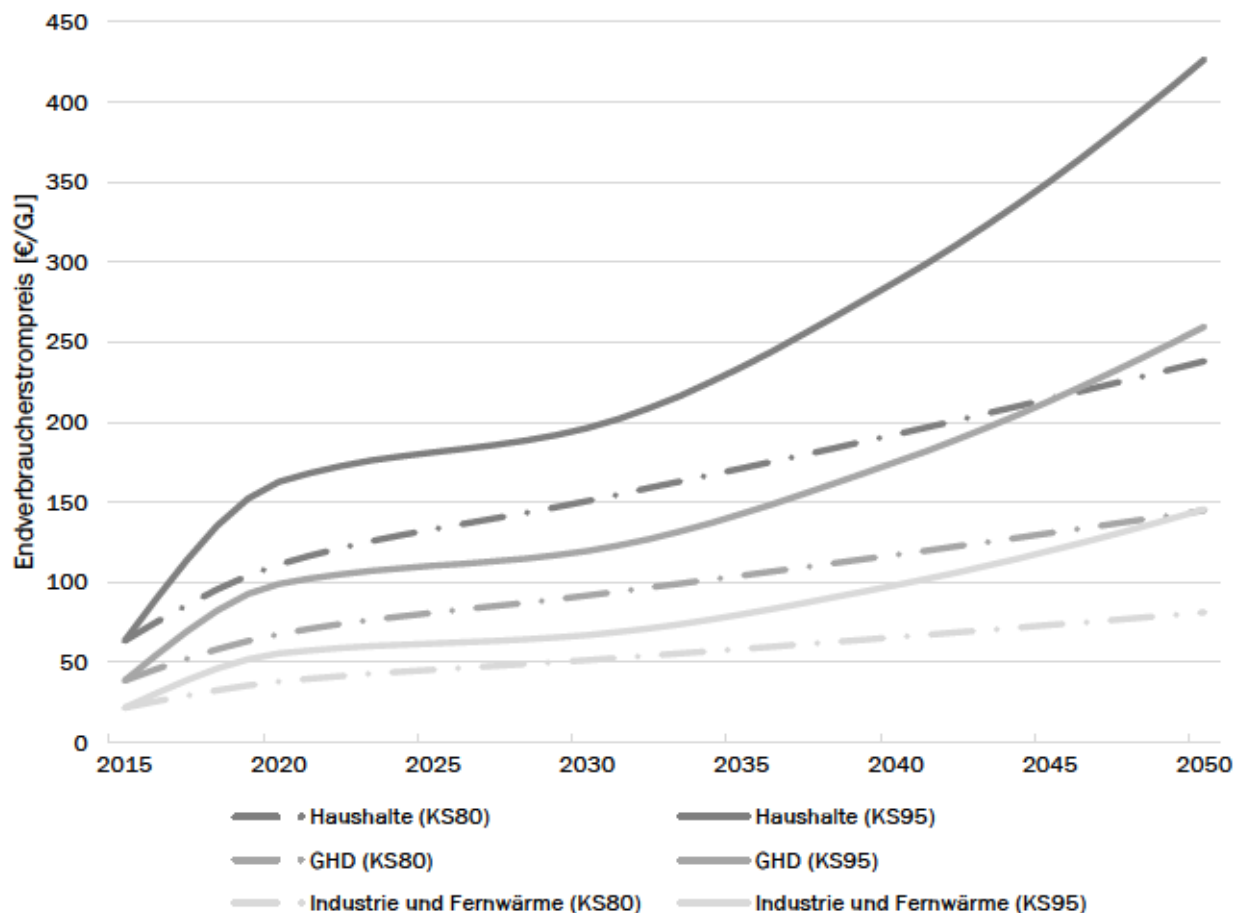


Abbildung 10 Strompreisentwicklung für Verbrauchergruppen

Ein hohes Preisniveau innerhalb der „Klimaschutzszenarien 2050“ (Repenning et al. 2015) führte dazu, dass sich effiziente Technologien eher in den Markt diffundieren. Ein starker Preisanstieg wird hervorgerufen durch die benötigte Erzeugung aus teuren Backup-Turbinen, welche in Stunden mit geringem Dargebot erneuerbaren Energien und bei einer gleichzeitig hohen Nachfrage preissetzend im KS80 Szenario sind. Im KS95 Szenario steigen die Endverbraucherpreise deutlich an. Zwar wirken erneuerbare Energien grundsätzlich preissenkend. Basierend auf einem Verzicht auf Kohleverstromung werden jedoch zum Teil deutliche Backup-Leistungen benötigt die zu einem entsprechenden Anstieg des Strompreises führen.

- **Preisentwicklung für Rohöl, Steinkohle und Erdgas**

Der Trend für die auf dem Weltmarkt gehandelten Primärenergieträger hängt von vielen Faktoren ab. Dabei ist die Entwicklung eines Rohölpreisszenarios bis 2050 unter anderem von der Marktmacht der OPEC, sowie den weltweit verfolgten energie- und umweltpolitischen Strategien einzelner Länder und zunehmend auch von Finanzmärkten abhängig. Unter der Einflussnahme unsicherer Erwartungen über künftige Entwicklungen hat die Volatilität von Handelspreisen deutlich zugenommen.



Bereits innerhalb des „Klimaschutzszenario 2050“ (Repenning et al. 2015) wurden ausgewählte Preisprojektionen mehrerer Institutionen dargestellt. Dabei zeigte sich eine große Bandbreite über die Entwicklung von Ölpreisprojektionen. Für die Betrachtung des „Klimaschutzszenarios 2050“ wurde sich für eine Studie der Energy Information Administration aus dem Jahr 2013 (U.S. Energy Information Administration 2013) entschieden.

Werden die kontinentaleuropäischen Erdgaspreise historisch mit den Rohölpreisen verglichen, so ist auffällig, dass beide ähnlich gefolgt sind, wenn auch mit unterschiedlichen Dynamiken. Eine zeitliche Entwicklung bis zum Jahr 2050 wurde innerhalb der Studie vom Öko-Institut durchgeführt (Matthes 2010). Dabei wurde der Zusammenhang in einem Erklärungsmodell entwickelt, mit dem die Grenzübergangspreise für Erdgas- und Steinkohle über die Rohölpreise modelliert wurden. Unter Außerachtlassung vereinzelter Ausnahmen, ist es möglich sowohl Erdgas- und Steinkohlepreise seit Mitte der 1990er Jahre über die Rohölpreise valide zu erklären (Repenning et al. 2015).

Die in jüngster Zeit einsetzende intensive Diskussion über die massive Gewinnung von unkonventionellen Erdgas mittels Fracking in den USA führte zu einem niedrigen Importbedarf von Liquefied Natural Gas (LNG) auf dem hiesigen Markt (International Gas Union 2016). Vor dem Hintergrund, dass ein massiver Ausbau der Förder- und Transportlandschaft für LNG sattgefunden hat, werden ursprünglich für den amerikanischen Zielmarkt gedachte LNG-Mengen auf Märkte in Europa und Asien umgelenkt. Folge dessen ist ein Überangebot und demzufolge ein niedriges Preisniveau. Steigende Importe von LNG (International Gas Union 2016) sind zu sehen. Somit ist die Bandbreite von Preisbildungsmechanismen im unterschiedlichen Umfang vorhanden (International Energy Agency 2013; European Commission 2010b).

Vor diesem Hintergrund wird für das Projekt der Grundsatz verfolgt, dass die in der Vergangenheit ermittelten statistischen Zusammenhänge für die Preisentwicklung von Rohöl auf der einen Seite und Erdgas und Steinkohle auf der anderen Seite durch Nutzung eines Dämpfungskoeffizienten ergänzt werden, der den zukünftigen Entwicklungen dieser beiden Energieträgerpreise der IEA (2013) zugrunde liegt.



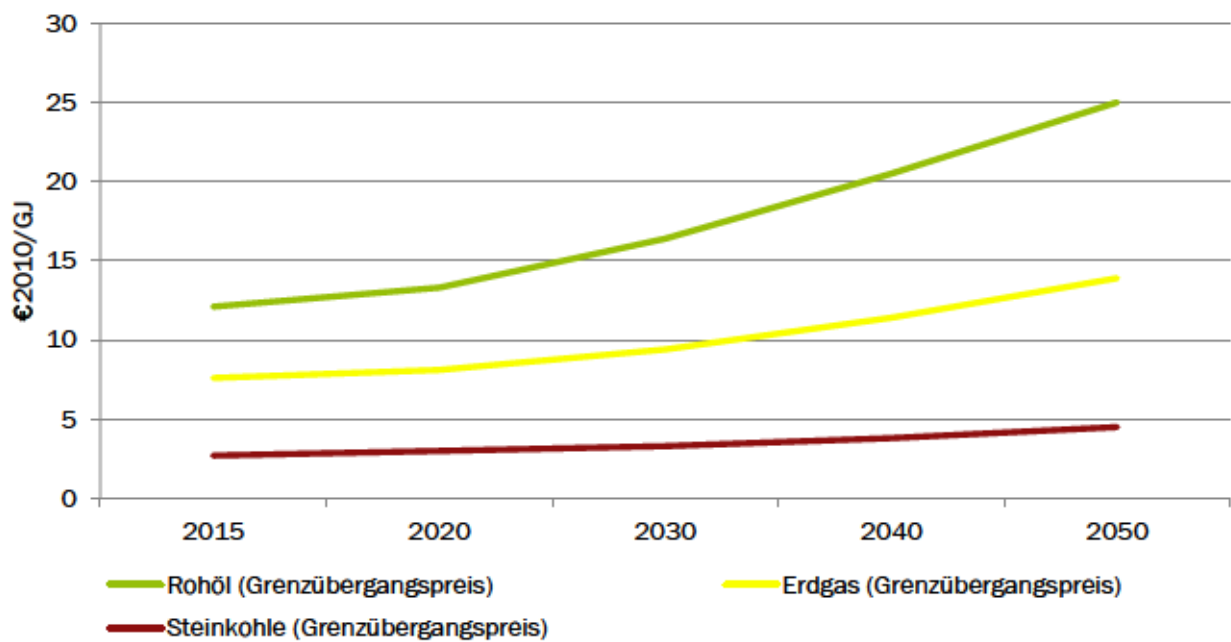


Abbildung 11 Annahme für die Entwicklung des Weltmarktpreises für Rohöl sowie für europäische Erdgas und Steinkohle (Repenning et al. 2015)

Abbildung 11 veranschaulicht den Einfluss des in der Studie (Repenning et al. 2015) eingeführten Dämpfungsfaktors und den Preis treibenden Effekt der Wechselkursannahme. Die neue Langfristszenarien (Pfluger et al. 2017a) zeigen andere Werte für Erdgas, sie wurden als Sensitivität im Modell berücksichtigt.

Aufbauend auf den Strompreisentwicklungen ist es notwendig Energiepreise für alle 3 Sektoren basierend auf Entwicklungstendenzen zu Erdgas aus den „Klimaschutzszenario 2050“ des Öko-Instituts für Endverbraucher abzuleiten. Analog zur Ermittlung der Endverbraucherstrompreise wurden die Endverbrauchergaspreise für die einzelnen Teilmärkte in BioPlanW mittels des Monitoringberichts der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt 2018) für das Basisjahr 2015 ermittelt. Da keine EEG-Umlage oder ähnliches für Gaspreise vorhanden ist, war es auch nicht nötig diese herauszurechnen. Die entwickelte Methodik wird für die Endverbrauchergaspreisentwicklungen angewendet und in Abbildung 12 dargestellt. Die einzelnen Teilmärkte sind in der Publikation von Jordan M. (Jordan et al. 2019) beschrieben und im Rahmen der Datenpublikation von Lenz V. und Jordan M. (Lenz und Jordan 2019) mit Informationen unteretzt.

### Endverbrauchergaspreisentwicklung je Teilmarkt

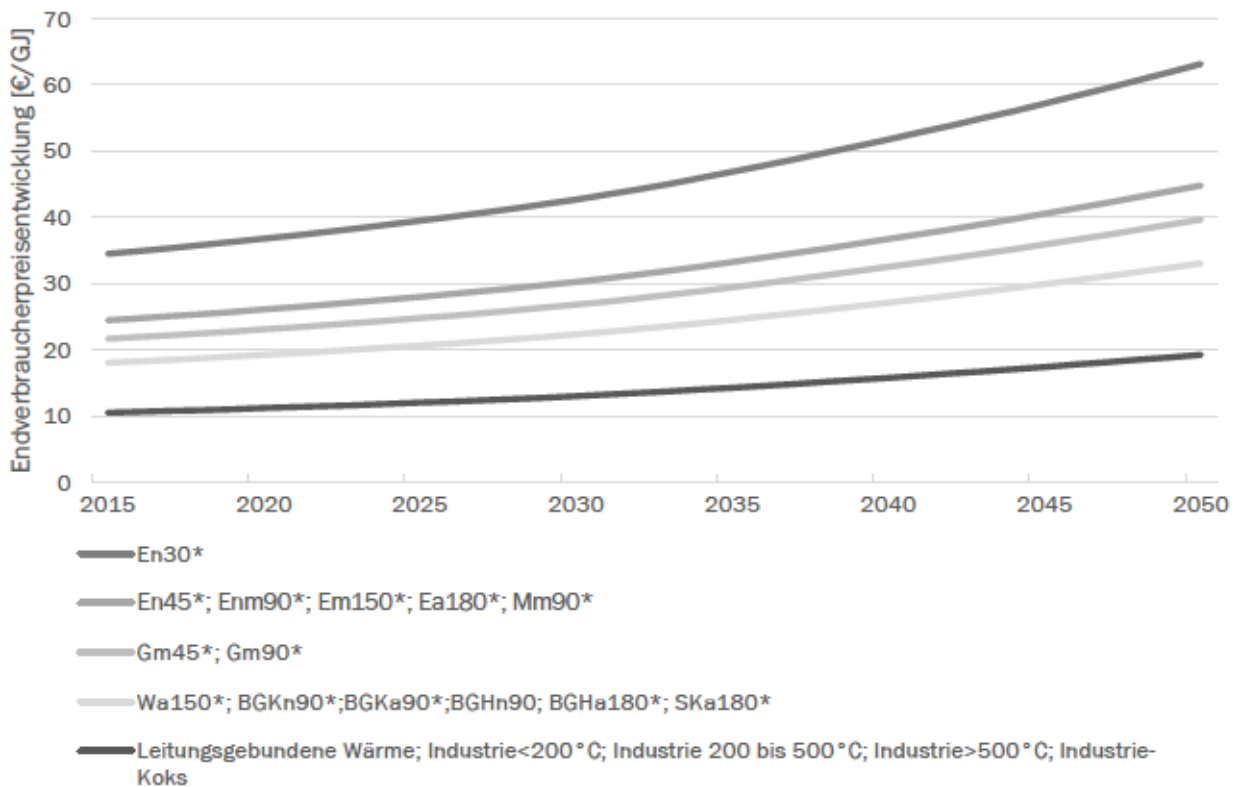


Abbildung 12 Endverbrauchergaspreisentwicklung je Teilmarkt bis 2050

Innerhalb der Szenarien findet keine Variation der Preisentwicklungen statt.

#### Zusammenfassung der Referenzpreise

Tabelle 4 beinhaltet alle Referenzpreisentwicklungen bis zum Jahr 2050 (ohne Endverbraucherpreisentwicklungen).

Tabelle 4 Referenzpreisentwicklung fossiler Energieträger in den Szenarien (Repenning et al. 2015):

| Produkt    | Einheit                 | 2015 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|------------|-------------------------|------|------|------|------|------|
| Rohöl      | \$/bbl                  | 94   | 103  | 128  | 160  | 195  |
| Rohöl      | €/t                     | 495  | 545  | 674  | 840  | 1026 |
| Erdgas     | €/MWh (H <sub>0</sub> ) | 24,7 | 26,3 | 30,7 | 37,1 | 45,1 |
| Steinkohle | €/t SKE                 | 78   | 87   | 97   | 111  | 133  |
| Rohöl      | €/GJ                    | 12,1 | 13,3 | 16,4 | 20,5 | 25,0 |
| Erdgas     | €/GJ                    | 7,6  | 8,1  | 9,4  | 11,4 | 13,9 |
| Steinkohle | €/GJ                    | 2,7  | 3,0  | 3,3  | 3,8  | 4,5  |
| Braunkohle | €/GJ                    | 1,7  | 1,7  | 1,7  | 1,7  | 1,7  |

Anmerkung: Alle Preisangaben als reale Preise (Basis 2010); alle Angaben beziehen sich auf den unteren Heizwert falls nicht anders angegeben

- **Biomassepotenziale und Preisentwicklung**

Die Annahmen zu historischen und zukünftigen Biomassepotenzialen unterliegen gewissen Schwierigkeiten in der Bemessung, was zu hohen Bandbreiten führt. Ausgehend von einem rein technologischen Potenzialbegriff verringert sich durch Naturschutzaspekte und Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion das technisch-ökonomisch-ökologische Potenzial. In Abbildung 13 ist das Biomassepotenzial in verschiedenen Studien dargestellt. Die Spannweite des Einsatzes von Anbaubiomasse ist beispielsweise sehr groß und bewegt sich zwischen 1,5 und 4,2 Mio. ha in 2050.

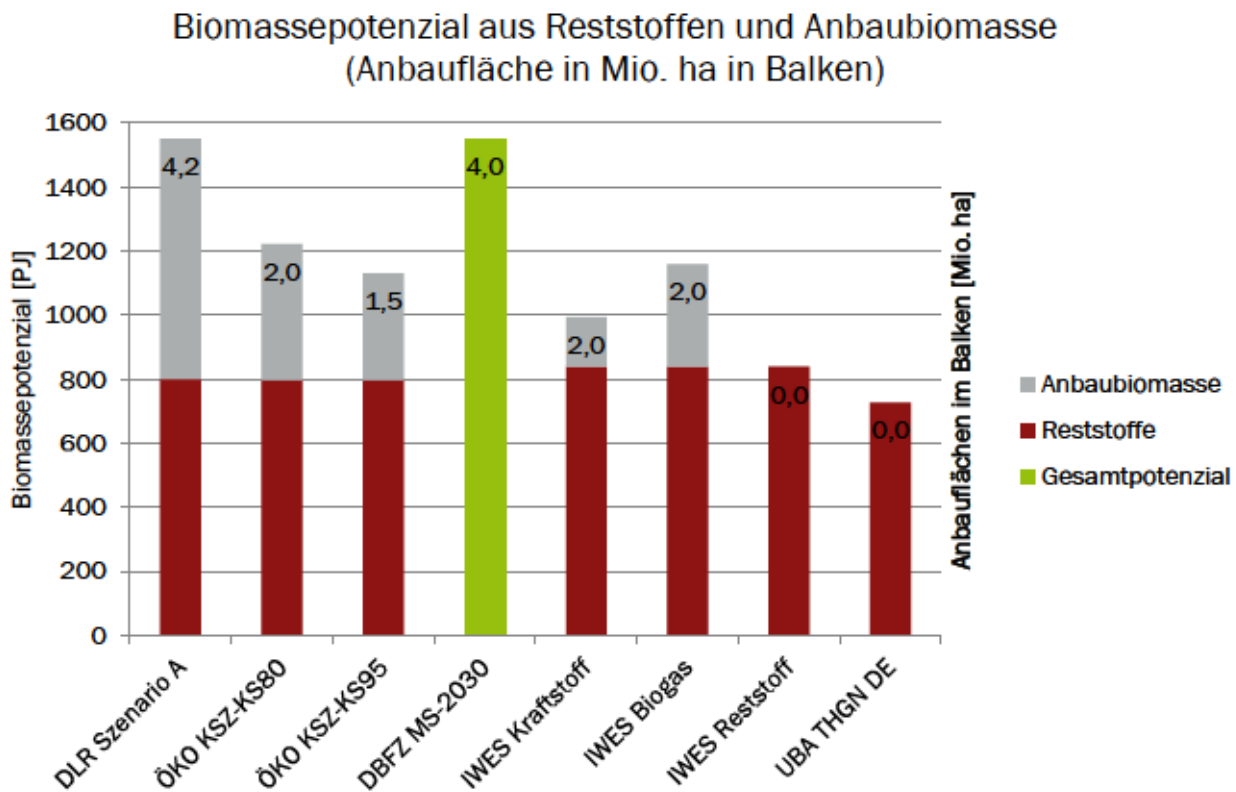


Abbildung 13 Biomassepotenzial in verschiedenen Studien (Nitsch et al. 2010; Repenning et al. 2015; Umweltbundesamt 2019; Thrän 2015)

Im Projekt BioplanW wurden ca. 1.000 PJ<sup>3</sup> Rest- und Abfallstoffe und 2,0 Mio. ha Anbaubiomasse für 2050 angenommen. Der Import von Biomassen wird nicht berücksichtigt.

Die Produktkategorien Briketts, Pellets und Hackschnitzel können aus verschiedenen Biomassearten (Reststoffe, ggf. auch Anbaubiomasse) gewonnen werden (Abbildung 18). Diese sind mit unterschiedlichen Kosten verbunden und resultieren in einer Art Angebotskurve für die Oberkategorien. Flüssige bzw. ölhaltige Biomassearten werden nicht betrachtet und dementsprechend auch keine Technologien welche diese einsetzen.

Für die Produktkategorien sind Basispreise vorhanden mit der Ausnahme der Kategorien Mist/Gülle, Reststoffe sonstiger Flächen sowie Bioabfall, für welche Annahmen getroffen werden müssen. Da der Logistikaufwand sich zwischen den drei Kategorien ähnelt, wird der gleiche Preis für alle angenommen. Für Bioabfall wird zudem angenommen, dass die heutigen Stoffströme komplett in Biogasanlagen umgelenkt werden statt kompostiert zu werden.

Die Preisentwicklungen für Biomasse sind historisch steigend aber variabel (Abbildung 14). In Szenarien welche Anbaubiomasse für die energetische Nutzung enthalten, wäre es aufgrund der implizit geringeren Nachfrage aus anderen Sektoren logisch anzunehmen, dass die Preise weniger steigen als in den anderen Szenarien. Eine Steigerung sollte trotzdem unterstellt werden.

<sup>3</sup> Es wird dabei vom Primärenergieträgerpotenzial ausgegangen.



Für die einzelnen Kategorien wäre die höchste relative Steigerung den weniger bearbeiteten Biomassen (Hackschnitzel, Stroh, Gülle/Mist) zu unterstellen. Der Vorschlag zur Methodik ist, dass der Preis für Hackschnitzel für die anderen Holzprodukte (Briketts, Pellets, Scheitholz) als Referenz angenommen wird, mit einem Aufschlag analog zu dem Preisunterschied im Anfangsjahr (wie auch in Abbildung 15 historisch zu sehen ist). Für Stroh und Gülle/Mist wird die gleiche jährliche Steigerung wie für Hackschnitzel angenommen, für Stroh wird aber der Anfangspreis 50% höher gesetzt.

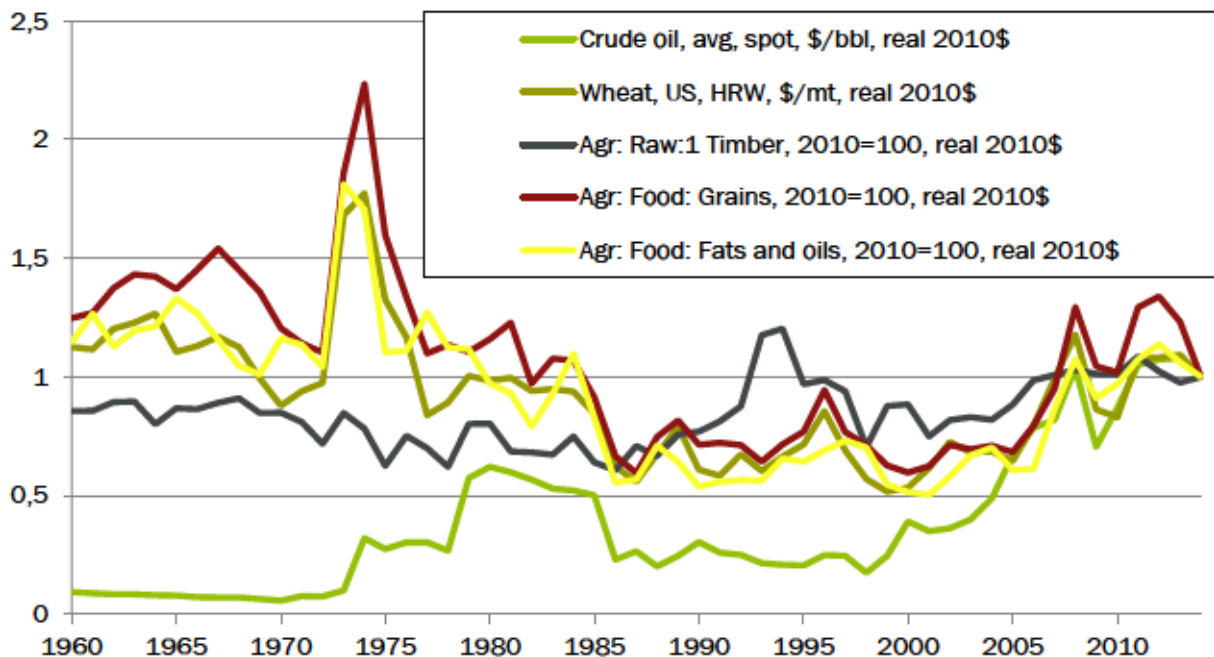


Abbildung 14 Globale Preisentwicklung ausgewählter Rohstoffe. In den letzten ca. 30 Jahren können Preissteigerungen beobachtet werden, die auch im Durchschnitt zugenommen haben. Quelle: (World Bank 2016) und (Millinger und Thrän 2016)

Anbaubiomasse im Modell besteht derzeit aus Mais, Zuckerrübe, Pappel, Miscanthus, Silphie, Ackergras, Dauergrünland und Sorghum. Die in den Szenarien festgelegte Anbaufläche, welche für die Wärmebereitstellung zur Verfügung steht, dient als Begrenzung für den Anbau, mit der Ausnahme, das Dauergrünland von Grünlandflächen stammt und somit durch diese begrenzt ist und keine Anbaufläche belegt. Welche Biomassearten auf der Fläche angebaut werden, wird Modellintern entschieden. Für die Preisentwicklung wird eine Methode nach (Millinger und Thrän 2016) benutzt, wobei die Biomasseart Weizen als Benchmark dient, um die Preise der anderen zu bestimmen. Grundvoraussetzung bei der Methode ist im Vergleich zu Weizen den gleichen Gewinn pro Hektar Anbaufläche zu erzielen. Aufgrund der unterschiedlichen Erträge und Anbaukosten resultiert eine differenzierte (Mindest-) Preissetzung im Vergleich zum Referenzrohstoff. Für KUP (Pappel) wird der Preis mit einem Risikozuschlag von 80% auf die aktuellen KUP-Preise angepasst. Dieser Zuschlag nimmt ab, bis der KUP-Markt völlig etabliert ist (in den Abbildungen wird 2035 angenommen). Dauergrünland konkurriert nicht mit den anderen Anbaubiomassearten. Es wird angenommen, dass der Preis hierfür mit 2/3 der Basissteigerung steigt.

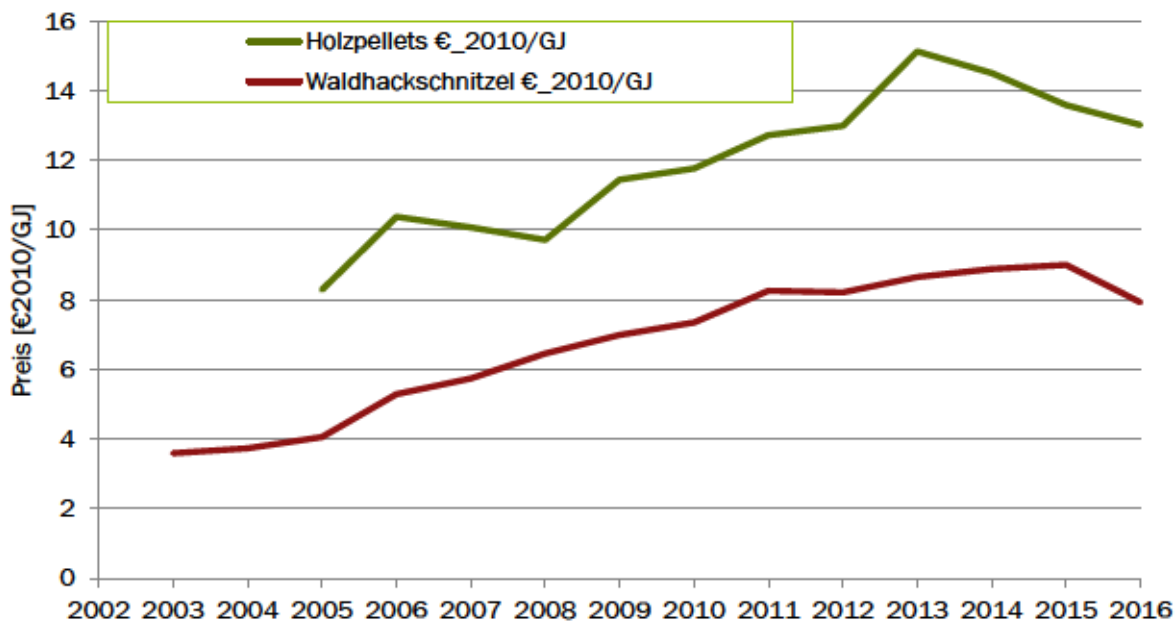


Abbildung 15 Reale Preisentwicklung für zwei Kategorien der Holzprodukte. Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Daten von (Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. 2018)

Die Preisentwicklungen der Rohstoffe unter 3% bzw. 5% jährlicher Steigerung der Referenzrohstoffe wie oben beschrieben sind in Abbildung 16 bzw. Abbildung 17 graphisch dargestellt und für die Hauptjahre in Tabelle 5 aufgeführt.

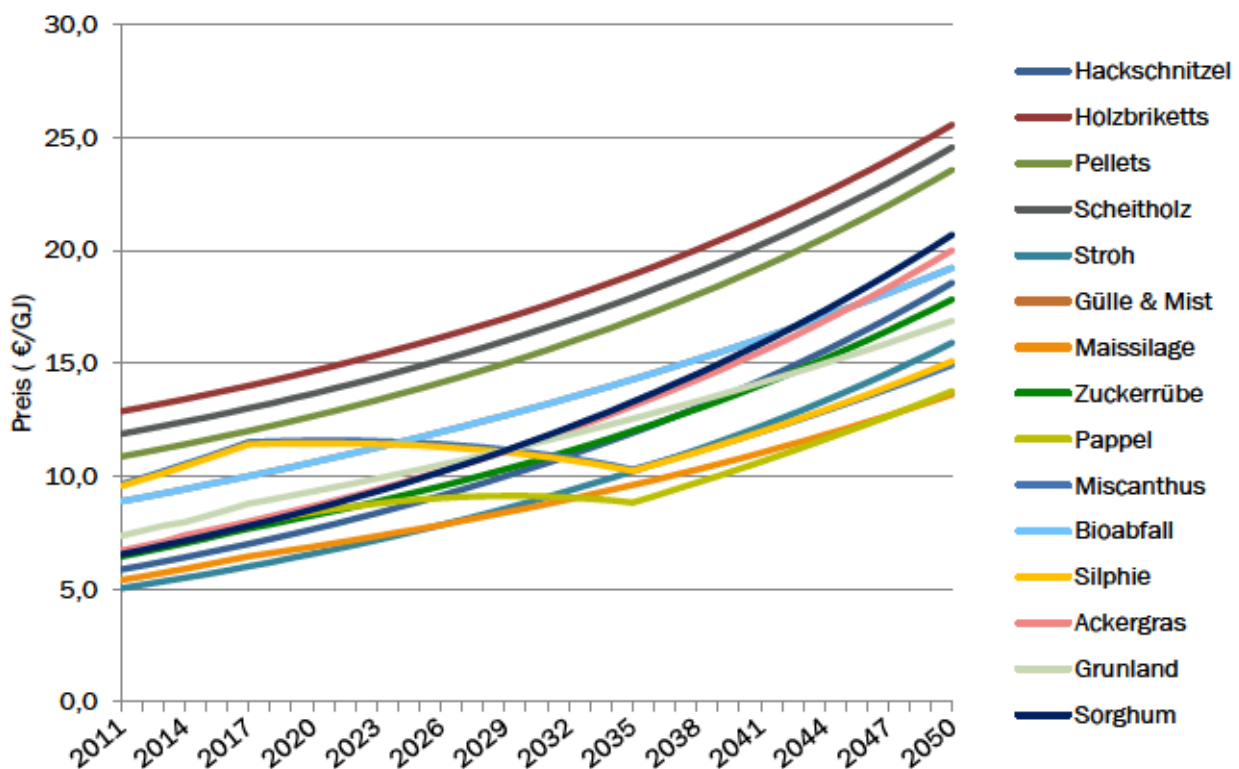


Abbildung 16 Annahme zur Preisentwicklung [€/GJ] bei 3%/a Preissteigerung der Referenzrohstoffe

Die Preisentwicklung unterschiedlicher Biomassen variiert innerhalb der Szenarien. Dabei werden in den Szenarien mit Anbauflächen für Energiepflanzen schwache Preissteigerungen (Abbildung 16) und in Szenarien ohne Anbau von Energiepflanzen erhöhte Preissteigerungen (Abbildung 17) angenommen.

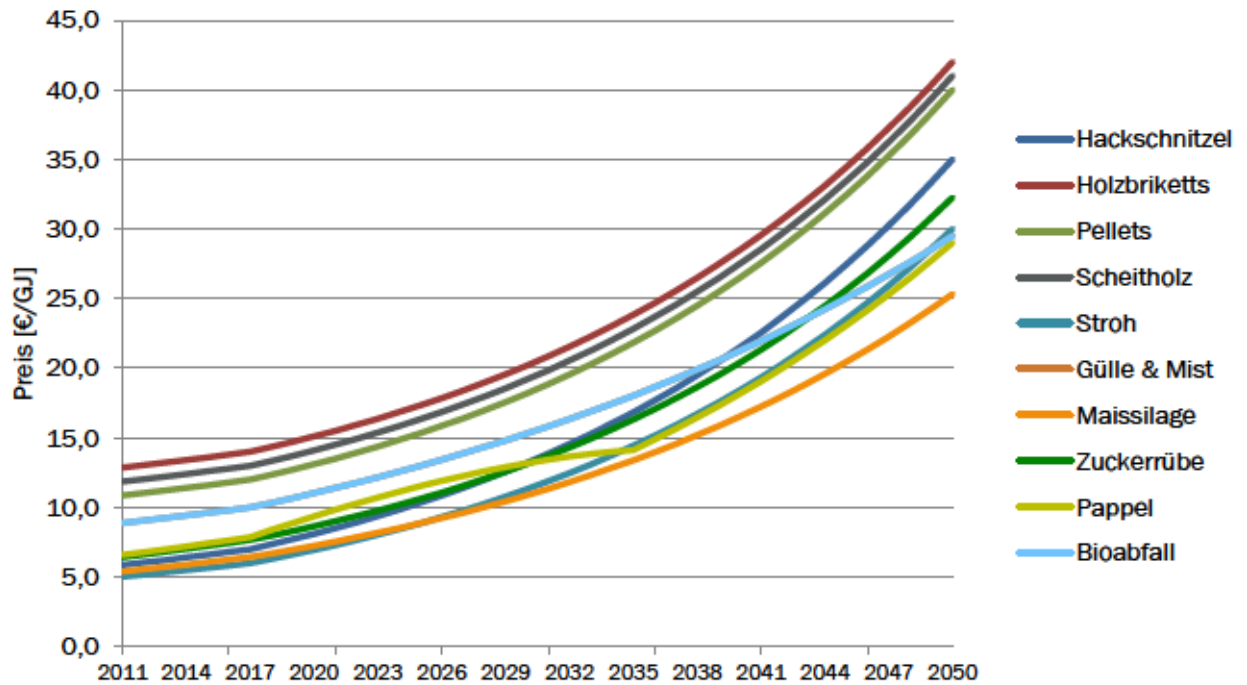


Abbildung 17 Annahme zur Preisentwicklung [€/GJ] bei 5%/a Preissteigerung der Referenzrohstoffe

Tabelle 5 Zusammenfassung der Biomassekategorien und Preisentwicklungen in den Szenarien. In den Szenarien mit Anbaufläche steigt der Preis des Referenzrohstoffs um 3 %/a, in den Szenarien ohne Anbaufläche um 5 %/a.

| in €/GJ                                     | Szenarien mit Anbaufläche |      |      |      |      |      | Szenarien ohne Anbaufläche |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------------|---------------------------|------|------|------|------|------|----------------------------|------|------|------|------|------|
|                                             | Entwicklung 3 %           |      |      |      |      |      | Entwicklung 5 %            |      |      |      |      |      |
|                                             | 2015                      | 2017 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 | 2015                       | 2017 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
| Reststoffe                                  |                           |      |      |      |      |      |                            |      |      |      |      |      |
| Scheitholz                                  | 12,6                      | 13,0 | 13,6 | 16,3 | 19,8 | 24,6 | 12,3                       | 13,0 | 14,1 | 19,2 | 27,5 | 41,0 |
| Hackschnitzel                               | 6,6                       | 7,0  | 7,6  | 10,3 | 13,8 | 18,6 | 6,3                        | 7,0  | 8,1  | 13,2 | 21,5 | 35,0 |
| Holzbriketts                                | 13,6                      | 14,0 | 14,6 | 17,3 | 20,8 | 25,6 | 13,3                       | 14,0 | 15,1 | 20,2 | 28,5 | 42,0 |
| Pellets                                     | 11,6                      | 12,0 | 12,6 | 15,3 | 18,8 | 23,6 | 11,3                       | 12,0 | 13,1 | 18,2 | 26,5 | 40,0 |
| Stroh                                       | 5,7                       | 6,0  | 6,6  | 8,8  | 11,8 | 15,9 | 5,4                        | 6,0  | 6,9  | 11,3 | 18,4 | 30,0 |
| Reststoffe sonst. Flächen                   | 9,6                       | 10,0 | 10,6 | 12,9 | 15,8 | 19,2 | 9,4                        | 10,0 | 11,0 | 15,3 | 21,3 | 29,5 |
| Gülle & Mist                                | 9,6                       | 10,0 | 10,6 | 12,9 | 15,8 | 19,2 | 9,4                        | 10,0 | 11,0 | 15,3 | 21,3 | 29,5 |
| Biogas aus Abfällen, Industrie, Klärschlamm | 9,6                       | 10,0 | 10,6 | 12,9 | 15,8 | 19,2 | 9,4                        | 10,0 | 11,0 | 15,3 | 21,3 | 29,5 |
| Anbau                                       |                           |      |      |      |      |      |                            |      |      |      |      |      |
| Maissilage                                  | 6,1                       | 6,4  | 6,9  | 8,6  | 10,8 | 13,6 |                            |      |      |      |      |      |
| Zuckerrübe                                  | 7,2                       | 7,7  | 8,3  | 10,6 | 13,7 | 17,8 |                            |      |      |      |      |      |
| Pappel                                      | 7,4                       | 7,9  | 8,4  | 9,1  | 10,3 | 13,8 |                            |      |      |      |      |      |
| Silphie                                     | 9,6                       | 11,4 | 11,5 | 11,0 | 11,6 | 15,1 |                            |      |      |      |      |      |
| Ackergras                                   | 6,7                       | 8,0  | 8,7  | 11,4 | 15,1 | 20,0 |                            |      |      |      |      |      |
| Grünland                                    | 7,4                       | 8,8  | 9,3  | 11,4 | 13,8 | 16,9 | 7,8                        | 9,3  | 10,3 | 14,3 | 19,9 | 27,6 |
| Sorghum                                     | 6,7                       | 8,0  | 8,8  | 11,8 | 15,9 | 18,6 |                            |      |      |      |      |      |
| Miscanthus                                  | 10,8                      | 11,5 | 11,6 | 11,1 | 11,7 | 14,9 |                            |      |      |      |      |      |

- Biomassepotenziale in den Szenariendefinitionen

In Abbildung 18 sind mögliche Produktionspfade der Biomassen dargestellt.



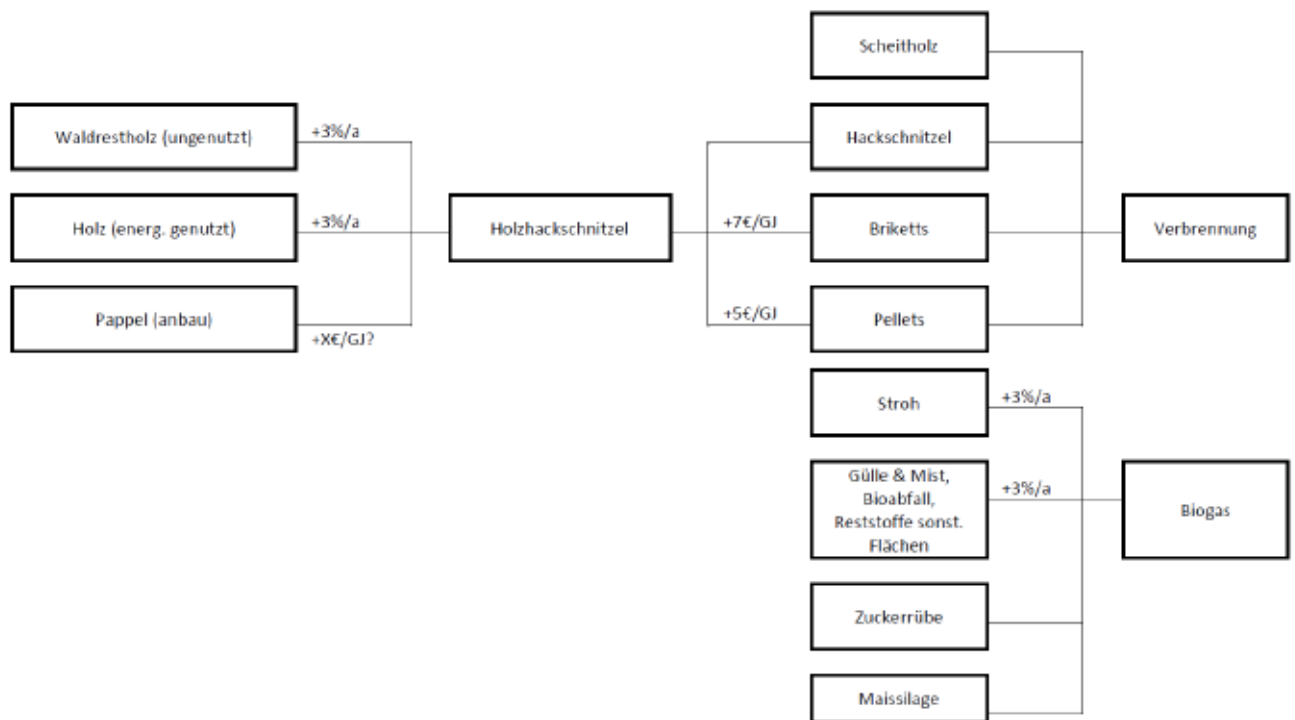


Abbildung 18 Zuordnung der möglichen Produktionspfade

Basierend auf werden die Verlaufskurven in den Szenarien bestimmt.

Tabelle 6 Zeitliche Entwicklung des erschlossenen Potenzials bis zum Jahr 2050 (80% Szenario)

| Erschlossenes Potential abzgl. stoffliche Nutzung 0-2-5% (80% Szenario) |                   |       |        |        |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------|--------|--------|
| Endenergie [PJ]                                                         | 2015 <sup>4</sup> | 2020  | 2030   | 2050   |
| Summe Reststoffe                                                        | 586,9             | 690,0 | 1069,0 | 1036,5 |
| Holz (Summe)                                                            | 505               | 563   | 735    | 712,5  |
| Scheitholz                                                              | 150               | 150   | 150    | 150    |
| Waldrestholz                                                            | 0                 | 31    | 203    | 180,5  |
| Holz (energetisch genutzt)                                              | 355               | 382   | 382    | 382    |
| Stroh                                                                   | 0,6               | 7     | 138    | 134    |
| vergärbare Reststoffe                                                   | 81,3              | 120   | 196    | 190    |
| Anbau volles Potential [Mio ha] <sup>5</sup>                            | 2,4               | 2,3   | 2,156  | 1,9    |
| Anbau Potential linear gegen Null [Mio ha]                              | 2,4               | 1,8   | 1,176  | 0      |

<sup>4</sup> die Nutzung in 2011 wird durch die Anzahl der installierten Anlagen in 2011 bestimmt, Stoffliche Nutzung gleichverteilt abgezogen in allen Kategorien

<sup>5</sup> Stofflicher Anteil bereits abgezogen

Tabelle 7 Zeitliche Entwicklung des erschlossenen Potenzials bis zum Jahr 2050 (95% Szenario)

| Erschlossenes Potential abzgl. stoffliche Nutzung 0-4-10% (95% Szenario) |                   |      |       |      |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|-------|------|
| Endenergie [PJ]                                                          | 2015 <sup>e</sup> | 2020 | 2030  | 2050 |
| Summe Reststoffe                                                         | 586,9             | 690  | 1047  | 982  |
| Holz (Summe)                                                             | 505               | 563  | 720   | 675  |
| Scheitholz                                                               | 150               | 150  | 150   | 150  |
| Waldrestholz                                                             | 0                 | 31   | 188   | 143  |
| Holz (energetisch genutzt)                                               | 355               | 382  | 382   | 382  |
| Stroh                                                                    | 0,6               | 7    | 135   | 127  |
| vergärbare Reststoffe                                                    | 81,3              | 120  | 192   | 180  |
| Anbau volles Potential [Mio ha] <sup>7</sup>                             | 2,4               | 2,3  | 2,112 | 1,8  |
| Anbau Potential linear gegen Null [Mio ha]                               | 2,4               | 1,8  | 1,152 | 0    |

Tabelle 8 Zeitliche Entwicklung der stoffl. Nutzung in den Teilmärkten (80% Szenario)

| Szenario: 80%, stoffliche Nutzung 0-2-5% |       |       |       |       |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Angabe in %                              | 2015  | 2020  | 2030  | 2050  |
| Verkehr Reststoffe                       | 15,00 | 15,00 | 20,00 | 30,00 |
| Anteil Energetische Wärme & Strom        | 85,00 | 85,00 | 78,00 | 65,00 |
| Unter Berücksichtigung stoffl. Abzug     | 85,00 | 85,00 | 76,44 | 61,75 |

Tabelle 9 Z Zeitliche Entwicklung der stoffl. Nutzung in den Teilmärkten (95% Szenario)

| Szenario: 95%, stoffliche Nutzung 0-4-10% |       |       |       |       |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Angabe in %                               | 2015  | 2020  | 2030  | 2050  |
| Verkehr Reststoffe                        | 15,00 | 15,00 | 30,00 | 70,00 |
| Anteil Energetische Wärme & Strom         | 85,00 | 85,00 | 66,00 | 20,00 |
| Unter Berücksichtigung stoffl. Abzug      | 85,00 | 85,00 | 63,36 | 18,00 |

<sup>e</sup> die Nutzung in 2011 wird durch die Anzahl der installierten Anlagen in 2011 bestimmt, Stoffliche Nutzung gleichverteilt abgezogen in allen Kategorien

<sup>7</sup> Stofflicher Anteil bereits abgezogen

- **Rest- und Abfallstoffe**

Bei vergärbaren Reststoffen setzt sich das Potenzial für Biomasse aus Bioabfall aus den in der Studie (Brosowski et al. 2015) beschriebenen Kategorien 27 - 36 zusammen. Für Klärschlamm wurden die Kategorien 36 - 43 zusammengefasst und für Industriereststoffe die Kategorien 65 - 93.

- **Anbaubiomasse**

Basierend auf Abbildung 13 wird als „Mittelwert“ angenommen, dass Energiepflanzen auf einer Fläche von 2 Millionen Hektar angebaut und als energetische Biomasse genutzt werden können. Der Energieertrag ist demzufolge von der angebauten Biomasse abhängig. Als Sensitivität werden 1 Mio. ha sowie 3 Mio. ha zusätzlich betrachtet.

Basierend auf den Kernaussagen der definierten politischen Zielsetzungen zur Effizienzsteigerung, Ressourcenschonung und Berücksichtigung der Landnutzung bis zum Jahr 2050, rückt zunehmend die Agrar- und Landwirtschaft nicht nur national sondern auch international in den Fokus (siehe COP21 (United Nations Framework Convention on Climate Change 19.10.2016)). Hinsichtlich der zukünftigen Ressourcenschonung wird davon ausgegangen, dass heimische Biomassepotentiale bevorzugt verwendet werden sollen und die Ernährungssicherung erhalten bleiben soll. Schlussfolgernd kann festgestellt werden, dass die Kaskadennutzung von Biomassepotentialen zu bevorzugen ist als auch weitere Importe zu vermeiden sind. Innerhalb der Szenarien wird von unterschiedlichen Grundannahmen bei den Biomassepotentialen ausgegangen. Grundsätzlich wird das Ziel verfolgt Biomasseimporte zu vermeiden und heimische Potentiale zu mobilisieren und zu nutzen.

Der Verbrauch von Flächen für Siedlung und Verkehr trägt jedoch zu einer weiteren Verschärfung der aktuellen Flächenkonkurrenzen bei, so liegt dieser bei ca. 69ha/Tag bei einer Zielsetzung von 30ha/Tag im Jahre 2020 und gemäß Klimaschutzplan 2050 Netto null im Jahre 2050 (Bundesregierung 2016; Umweltbundesamt 2018).

Für eine deutliche Reduzierung der aktuellen Flächeninanspruchnahme wären Maßnahmen eines gezielten Flächenrecyclings unabdingbarer Bestandteil einer nachhaltigen Flächenpolitik, also eine Wiedereingliederung ehemals genutzter Flächen in Wirtschafts- bzw. Naturkreisläufe zu forcieren. Die Bezifferung des bundesweiten Brachflächenbestandes ist allerdings schwierig, da entsprechende Brachflächenkataster nicht umfänglich vorliegen. Schätzungen des Umweltbundesamtes beliefen sich jedoch hinsichtlich des bundesweiten Brachflächenbestandes im räumlichen Zusammenhang zum Siedlungsraum auf ca. 150.000ha (Umweltbundesamt 2017b). Im Rahmen einer standardisierten Befragung des BBSR ergaben sich Innenentwicklungspotenziale in Deutschland nach Berücksichtigung von Korrekturschätzungen von 165.000ha (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2014).

Diese Brachflächenpotentiale ließen sich wiederum auch für den Anbau von Biomasse nutzen, so wären insbesondere Dauerkulturen wie schnellwachsende Baumarten ein geeignetes Element, um den Anbau einer nachwachsenden Ressource mit zahlreichen Synergiewirkungen zu verbinden.

- **Wärmebedarf**

Der Wärmebedarf einzelner Sektoren (Private Haushalte und Gewerbe-Handel-Dienstleistung) wurde aufgrund der Projektstruktur von BioplanW und Bio-Strom-Wärme aus (Koch et al. 2018) des Öko-Instituts genutzt.

- **Wärmenachfrage Industrie**

Tabelle 10 zeigt die Entwicklung des Wärmeverbrauchs der Industrie in Deutschland zwischen 2005 und 2014. Prozesswärme nimmt mit 87% bis 90% den überwiegenden Teil der Wärmenachfrage ein. Der Bedarf an Raumwärme und Warmwasser entspricht nur 9% bis 12% bzw. 1% des Gesamtverbrauchs. Über zehn Jahre hinweg ist das Verhältnis sehr ähnlich.

Tabelle 10 Wärmebedarf in der Industrie in Deutschland (Kemmler et al. 2017)

| Gesamtenergieverbrauch               | 2005  | 2006  | 2007  | 2008  | 2009  | 2010  | 2011  | 2012  | 2013  | 2014  |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Raumwärme [TWh]                      | 55,6  | 53,3  | 50,9  | 54,3  | 51,1  | 59,9  | 48    | 53,6  | 57,6  | 46,6  |
| Warmwasser [TWh]                     | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     | 6     |
| Prozesswärme [TWh]                   | 446   | 449,6 | 473,8 | 462,6 | 408,6 | 466,3 | 484,9 | 467,2 | 454,9 | 453,9 |
| Summe [TWh]                          | 507,6 | 508,9 | 530,7 | 522,9 | 465,7 | 532,2 | 538,9 | 526,8 | 518,5 | 506,5 |
| Raumwärme [% von Gesamtverbrauch]    | 10,9  | 10,4  | 9,5   | 10,3  | 10,9  | 11,2  | 8,9   | 10,1  | 11,1  | 9,2   |
| Warmwasser [% von Gesamtverbrauch]   | 1,1   | 1,1   | 1,1   | 1,1   | 1,2   | 1,1   | 1,1   | 1,1   | 1,1   | 1,1   |
| Prozesswärme [% von Gesamtverbrauch] | 87,8  | 88,3  | 89,2  | 88,4  | 87,7  | 87,6  | 89,9  | 88,6  | 87,7  | 89,6  |

Um Werte für die zukünftige Entwicklung des industriellen Wärmebedarfs abzuleiten wurden die Langfristszenarien des DLR (Nitsch et al. 2012) genutzt. Darin wurde die Entwicklung der Wärmenachfrage der Industrie für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme in 5-Jahres-Schritten bis 2050 dargestellt. In anderen Studien wurde die Wärmenachfrage der Industrie nur vereinfacht behandelt oder zusammen mit dem GHD-Sektor betrachtet, da geeignete Daten für eine detaillierte Betrachtung des Industriesektors fehlen (Repenning et al. 2015). Die Langfristszenarien gehen davon aus, dass die gesamte Wärmenachfrage der Industrie auf Grund von Effizienzerhöhung auf 412 TWh in 2030 und auf 354 TWh in 2050 sinkt.

Der relative Anteil an Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme entspricht im weiteren Verlauf der Modellierung den Anteilen zwischen 2005 und 2014.

Der größte Teil der industriellen Wärmenachfrage entfällt auf die Prozesswärme. (Nitsch et al. 2012) bezieht sich auf (Nitsch et al. 2010), wonach dort eine Reduktion um 30% des Energiebedarfs eher im unteren technisch-ökonomisch machbaren Bereich liegt.



Die Nutzungsarten der Prozesswärme unterscheiden sich je nach Temperaturbereich stark. Nach einer Literaturanalyse wurden in 2008 in der Industrie 208,8 TWh an Wärme unter 200 °C und 301,2 TWh an Wärme oberhalb von 200 °C benötigt, im Jahr 2013 entsprechend 190,5 TWh bzw. 330,8 TWh (Kemmler et al. 2017; Umweltbundesamt 2012). Es zeichnete sich anhand historischer Daten für die Prozesswärme in niedrige (<200 °C) und hohe Temperatur (> 200 °C) ein Verhältnis von 40:60 ab. Ausgehend von der berechneten zukünftigen Wärmenachfrage aus der DLR 2012 Studie und der 40:60 Aufteilung der Prozesswärme ergeben sich die Entwicklungen wie in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt.

Innerhalb der DLR wurde die Betrachtung einer THG-Reduktion von 80-95% durchgeführt, allerdings entsteht kein Impact im Industriesektor.

Die beheizte Nutzfläche in Nichtwohngebäuden nimmt in den DLR 2012 Szenarien bis 2020 zu und sinkt anschließend auf 1.430 Mio. m<sup>2</sup> in 2050. Es wird weiterhin angenommen, dass die Sanierungsrate beim Gebäudebestand auf 2% steigt. Die Sanierungsrate für Nutzflächen wird in den Sektoren GHD, Industrie und Wohngebäude als gleich angenommen. Durch die höhere Neubaurate im Nutzgebäudesektor kann jedoch schneller ein niedriger Endenergieverbrauch für Raumwärme realisiert werden (Mittelwert 2050: 25 kWh/m<sup>2</sup> a) (Nitsch et al. 2012).

Die Industrie benötigt in 2050 laut DLR etwa 354 TWh an Wärme, unabhängig vom Szenario 80% oder 95% THG Minderung.

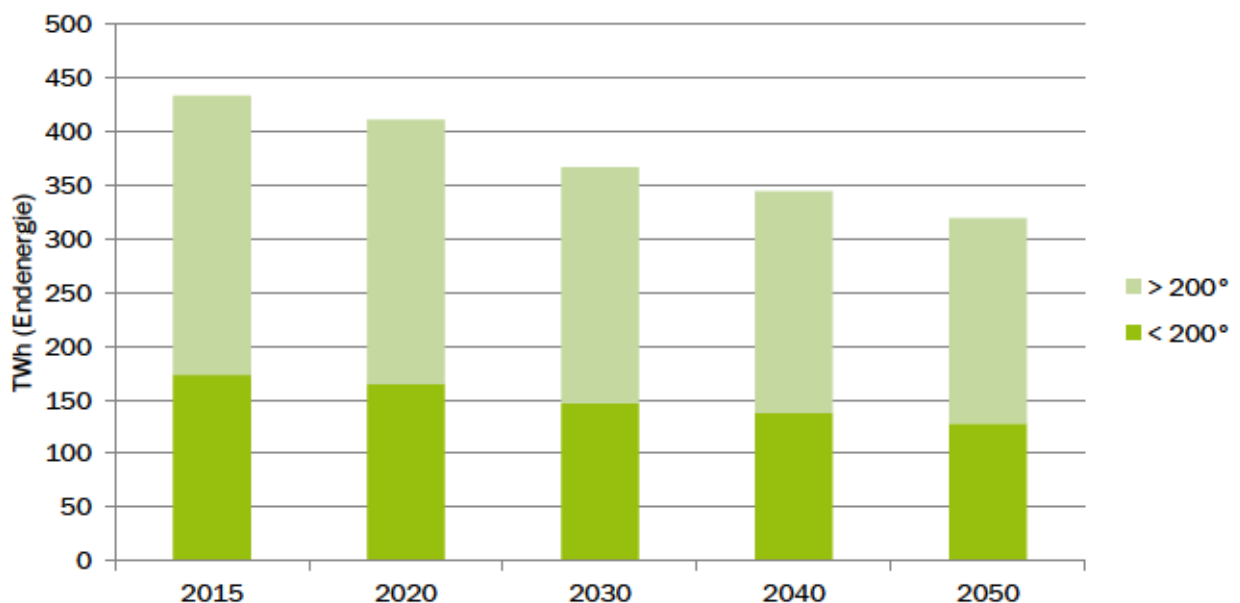


Abbildung 19 Entwicklung der Prozesswärmenachfrage in der Industrie. Eigene Berechnung nach Nitsch et al. 2012

Die Raumwärme- und Warmwassernachfrage wird nicht den beiden Teilmärkten im Industriebereich zugeordnet. Es findet dort nur eine Betrachtung der Prozesswärme statt. Warmwasser und Raumwärme wird dem GHD-Sektor zugeordnet.

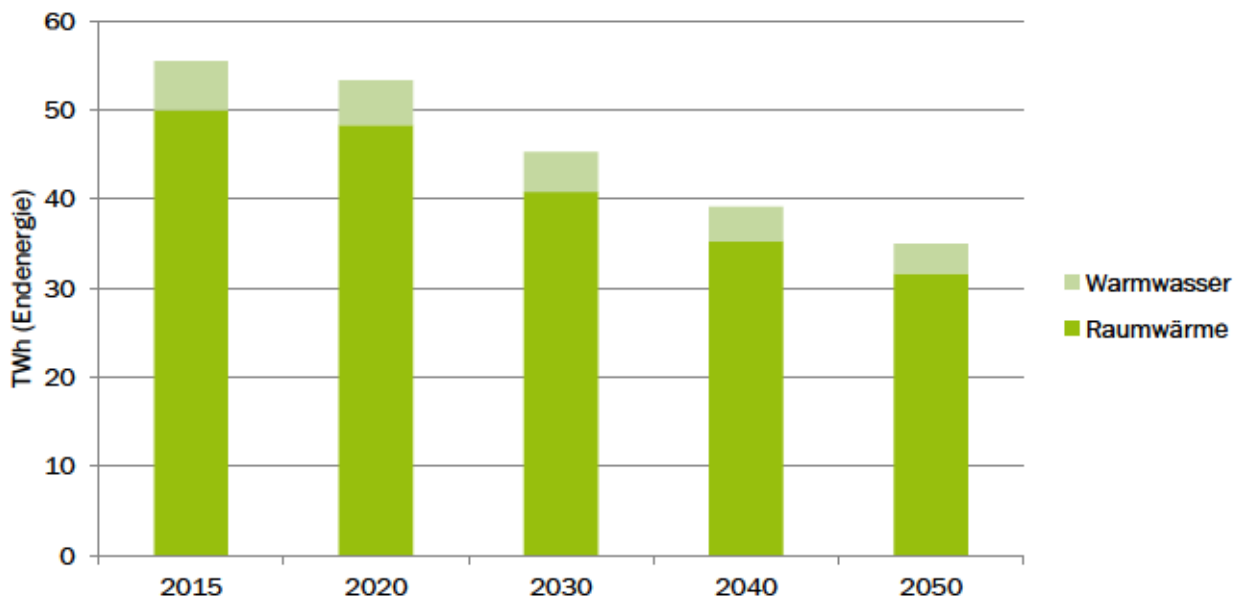


Abbildung 20 Entwicklung der Raumwärme- und Warmwassernachfrage in der Industrie. Eigene Berechnung nach Nitsch et al. 2012

### 2.1.2 Biowärme-Technologien – Charakterisierende Eigenschaften und Entwicklungsoptionen im Vergleich anderen EE-Wärme-Optionen (AP2)

Das Ziel dieses APs ist die Definition und Charakterisierung der marktrelevantesten Biowärme-Technologien<sup>8</sup> und Ableitung ihres zukünftigen technologischen Entwicklungspotenzials zur (stromnetzstabilisierenden) Wärmeversorgung auf Basis von kostengünstiger Biomasse unter Berücksichtigung der Marktverbreitung anderer EE-Wärme-Optionen.

Aufbauend auf den in AP1 definierten Teilmärkten und deren erwarteter Entwicklungen im Hinblick auf den Restwärmebedarf und dessen Anforderungsprofilen wurden die heute und voraussichtlich zukünftig marktrelevantesten Biowärme-Technologien identifiziert.

Da die Relevanz und Entwicklung der Biowärme-Technologien stark von der Entwicklung von Energieeffizienzmaßnahmen und der Entwicklung anderer EE-Optionen im Wärmebereich (PtX, Wärmepumpen, Elektrodenkessel, Solarthermie, Geothermie, Nutzung von Abwärme) abhängt, wurden diese alternativen Optionen in groben Zügen beschrieben und für die folgenden Arbeitspakete abgebildet.

Die techno-ökonomischen Parameter und Technologieoptionen zur Biowärme wurden mit dem Projektteam des Öko-Instituts im Rahmen (Koch et al. 2018) diskutiert und abgestimmt und vereinheitlicht. Dabei hat das Öko-Institut Annahmen zur Verbesserung des Gebäudewärmebedarfs in seinen Berechnungen zur Ermittlung des zukünftigen Wärmebedarfs eingeschlossen und bei den dem Projektkonsortium zur Verfügung gestellten Daten berücksichtigt. Insofern war eine eigenständige Optimierung über Dämmmaßnahmen nicht Inhalt der Simulation. Die sich ändernden

<sup>8</sup> z. B. Einzelraumfeuerungen mit und ohne Wassertasche, Festbrennstoffkessel, verschiedene Biomasse-KWK-Lösungen, Wärmenutzung von Biomethan oder Pflanzenöl, Optionen der Kombination mit Pufferspeichern.

Wärmebedarfsmengen sind jedoch in der zunehmenden oder abnehmenden Relevanz einzelner Teilmärkte wiederzuerkennen.

Aufbauend auf den Erfahrungsberichten der Bundesregierung zum Einsatz erneuerbarer Wärme und zur Wirkung des EEWärmeG sowie des MAP, den Statistiken des BMWi/UBA zum Stand der erneuerbaren Energien und eigenen Daten wurde die derzeitige Relevanz der verschiedenen Biowärme-Technologien – auch im Vergleich zu anderen EE-Wärmeoptionen und der Wärmebedarfseinsparung – aufgezeigt.

Durch die Auswertung der relevanten Forschungsaktivitäten – insbesondere des DBFZ zu Intelligenten Biomasseheiztechnologien – (Förderdatenbanken, Gespräche mit den einschlägigen Forschungseinrichtungen) wurden mögliche in der Zukunft relevante Biowärme-Technologien identifiziert und zusammen mit den Bekannten in einer Übersicht zusammengestellt (siehe Jordan et al. 2019). Bei der Beschreibung der Biowärme-Technologien wurde auch die Möglichkeit, Wärmenetze als Kurzzeitwärmepufferspeicher für eine Steigerung und Integration bedarfsgerechter Strombereitstellung zu nutzen, mitberücksichtigt.

Im engen Austausch mit AP3 und AP4 wurden am Anfang des Projektes die für die Modellierung und Bestimmung der Auswirkungen notwendigen Parameter festgelegt. Zu diesen Parametern gehören Kostenstrukturen inkl. Investitionsaufwendungen (ggfs. Lernkurven), Technologiereife/ Markteintritt, Kundennutzen. Daneben werden aber auch Parameter zur ökologischen Effizienz in die Betrachtung einfließen: THG-Emissionen, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, Partikel (als Gesamtstaub nach Methodenhandbuch, sowie PM 2,5), PAK, Lärmbelastung.

Die notwendigen Daten wurden anhand von Literaturwerten, im Austausch mit anderen Forschungseinrichtungen und aus eigenen technologischen Entwicklungsprojekten zusammengetragen und verifiziert und in einer Datenveröffentlichung in einem öffentlich zugänglichen Repositorium abgelegt (siehe Lenz und Jordan 2019).

Um die Anzahl an Biowärme-Technologie-Optionen überschaubar zu halten, wurden die Zwischenergebnisse der Datenerhebung dazu genutzt, diejenigen Optionen auszuwählen, die auf kostengünstige und vor allem auch zukünftig nachhaltig verfügbare Biomassepotenziale zurückgreifen, die besonders effizient in der Umwandlung der Biomasse sind, d.h. eine hohe Effektivität im Sinne einer Systemintegration aufweisen und dabei möglichst emissionsfrei/-arm sind. Die so ausgewählten Biowärme-Technologien wurden in 52 Steckbriefen (Fokus On 2020 – Systemlösungen im Wärmesektor – 52 Modellkonzepte für eine Klimaneutrale Wärme) bezüglich der für die im Projekt notwendigen charakterisierenden Parameter beschrieben.

### 2.1.3 Modellierung der Teilmärkte „Wärme“ (AP3)

Um den optimalen Einsatz von Bioenergie im Wärmesektor Modell gestützt zu ermitteln, wurde im Rahmen des Projektes zunächst der Wärmesektor in 19 Teilmärkte differenziert, siehe 2.1.1. Jeder Teilmarkt hat ähnliche Eigenschaften in Bezug auf den Wärmebedarf, Infrastruktur und benötigter Anlagenkapazität. Innerhalb eines jeden Teilmarktes wurden mögliche Technologiekonzepte beschrieben. Dabei wurden mindestens eine fossile Referenztechnologie, mögliche Bioenergie-technologien und mindestens eine alternative erneuerbare Technologie definiert. Einen nennenswerten Neuwert haben die zusätzlich beschriebenen Biomasse Hybridsysteme, welche nach



dem aktuellen Kenntnissstand bisher noch nicht in einer Energiesystemanalyse betrachtet wurden. Zu jedem Technologiekonzept wurden detaillierte technische, ökonomische und ökologische Daten recherchiert, welche als Eingangsgrößen in das Modell einfließen, siehe Kapitel 2.1.2.

Der Wettbewerb zwischen den Technologien über die verschiedenen Teilmärkte wurde mittels eines linearen Optimierungsmodells dargestellt. Dabei wurde eine Gesamtsystemkostenoptimierung von 2015 bis 2050 unter Erfüllung der definierten Klimaziele in den verschiedenen Szenarien durchgeführt. Das verfügbare Biomassepotential wurde kostenoptimal unter den verschiedenen Teilmärkten Modell endogen eingesetzt und die dafür benötigten Wärmetechnologiesysteme optimal ausgewählt. Das Modell ist in einer jährlichen Auflösung umgesetzt. Eine Heizungstechnologie besteht oft aus mehreren Modulen. Die Lebensdauer jedes Moduls wird im Modell berücksichtigt und entsprechend anfallende Investitionen getätigt. Wenn Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen zum Einsatz kommen, wird die Vergütung für den generierten Strom als Nebenprodukt verrechnet. Die Schnittstelle zum Stromsektor wurde basierend auf den Ergebnissen der Energieszenarien von Repenning et al. 2015 und dem Monitoringbericht der Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt in das Modell integriert. Als Ergebnis liegen, ausgehend von den im Jahr 2015 eingesetzten Biomassemengen und Technologiesystemen, in den vier Szenarien kostenoptimale Transformationspfade bis zum Jahr 2050 vor. Eine detaillierte Beschreibung der Methode zur Modellierung, der Verknüpfung mit dem Stromsektor sowie der möglichen Rohstoff- und Technologiepfade findet sich in Jordan et al. 2019.

Im Rahmen des Projektes wurden vier Szenarien gerechnet. Diese bilden jeweils die obere und untere Grenze in Bezug auf das Reduktionsziel (80 % bzw. 95 % Treibhausgas Reduktion in 2050) und der Verfügbarkeit von Biomasse für den Wärmesektor ab. Dabei wird von dem in Deutschland verfügbaren Reststoffpotential (Brosowski et al. 2015) und dem Flächenpotential für Energiepflanzen jeweils ein größerer und kleinerer Anteil dem Wärmesektor zugeordnet.

In Anhang A sind die Modellierungsergebnisse der vier Szenarien ausführlich grafisch dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass auf Holz basierte Biomassetechnologien im Sektor Private Haushalte sehr wettbewerbsfähig sind. Das verfügbare Biomassepotential wird ab ca. 2030 in allen Szenarien komplett ausgeschöpft. Die Produktion von Biomethan ist jedoch ohne staatliche Förderung in allen Szenarien nicht rentabel und verschwindet in kürzester Zeit vom Markt. Im Sektor private Haushalte setzen sich mittelfristig, im Rahmen des zulässigen Potentials, vor allem Pellet WKK Technologien in Kombination mit einer Wärmepumpe und PV-Anlage in verschiedenen Teilmärkten durch. Mit ansteigenden Strompreisen, wie es aktuelle Energieszenarien projizieren, bieten diese Hybridysteme im Modell das kosteneffizienteste THG Einsparpotenzial für den Biomasseeinsatz. In den Szenarien mit einem hohen Biomassepotential nehmen zusätzlich Scheitholzöfen in Kombination mit einer Wärmepumpe signifikante Marktanteile ein. Langfristig in den 95% Reduktionsszenarien, ist die Biomasse jedoch am wettbewerbsfähigsten in den Hochtemperatur Industrieanwendungen in Form von Hackschnitzeln. Ab dem Jahr 2040-2045 verlagert sich die Biomassenutzung fast komplett vom Haushaltssektor in die Industrie. Mangels eingeschränkter erneuerbarer Alternativen für Prozesswärme, wurde für die fast vollständige Dekarbonisierung des Wärmesektors der Einsatz von Biomasse in der Prozesswärme als kostengünstigste Option ermittelt. In den 80% Szenarien ist dies nicht der Fall. Die verfügbare Fläche für Anbaubiomasse wird in allen Szenarien fast ausschließlich mit Miscanthus kultiviert. Im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen haben sich Biomassetechnologien in keinem Szenario als wettbewerbsfähig erwiesen. Eine detaillierte Beschreibung und Analyse der Ergebnisse aus den 95% Reduktionsszenarien befindet sich in (Jordan et al. 2019).



Des Weiteren wurde eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um zu bestimmen welche Unsicherheiten der Modelleingangsparameter einen signifikanten Einfluss auf die Modellierungsergebnisse haben. Dazu wurde die Varianz basierte Sensitivitätsmethode von Sobol' angewendet. Die Methode hat den Vorteil, dass nicht nur der Einfluss einzelner Parameter betrachtet wird, sondern zusätzlich deren Interaktion quantifiziert wird. Insgesamt wurden die Unsicherheiten von 32 Eingangsparametern untersucht. Dazu wurden 34.000 Modellläufe durchgeführt und anschließend statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass nur 3 Parameter die Technologiewahl signifikant beeinflussen: Die zukünftige Entwicklung des Strompreises, des Gaspreises und das definierte Klimaziel. Zwei weitere Parameter, das Biomassepotential und der Zinssatz, haben verstärkende Einflüsse auf die Marktanteile, beeinflussen aber nicht die Wahl der Technologie. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein Lösungsraum für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit von Bioenergie-technologien im Wärmesektor unter unsicheren Entwicklungen erstellt. Der Lösungsraum verdeutlicht, dass der Einsatz von Biomasse in Hochtemperaturanwendungen in der Industrie das robusteste Ergebnis unter den untersuchten Unsicherheiten ist. Wohingegen die Pellet WKK Hybrid Systeme nur bei stark steigenden Strompreisen wettbewerbsfähige Optionen darstellen. Eine detaillierte Beschreibung der angewandten Methode zur Sensitivitätsanalyse und der untersuchten Unsicherheiten in den Eingangsparametern sowie eine Darstellung und Analyse der Ergebnisse zur Sobol' Methode und des Lösungsraumes befinden sich in Jordan et al. 2020.

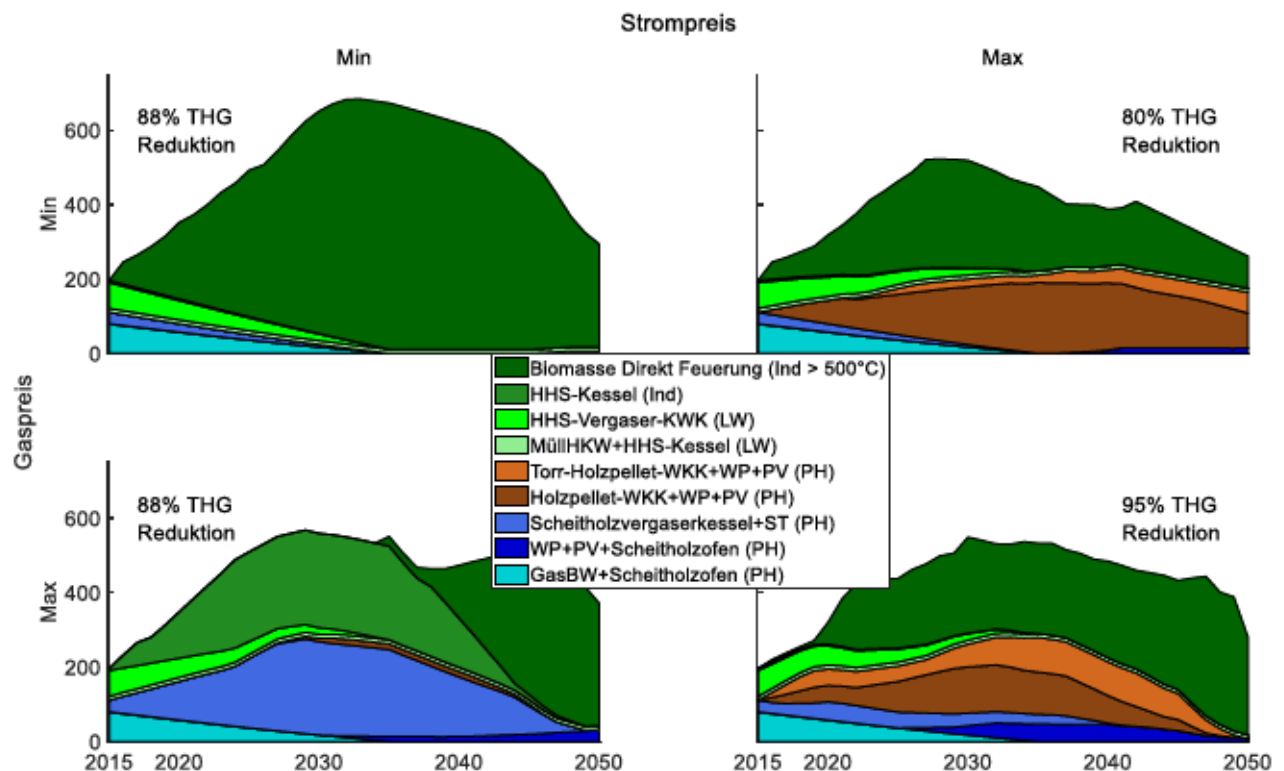


Abbildung 21 Lösungsraum für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit von Bioenergie-technologien im Wärmesektor unter unsicheren Entwicklungen

In den einzelnen Szenarien, wurde die Art der Energiepflanzen zur Kultivierung auf verfügbarer landwirtschaftlicher Fläche im Optimierungsmodell bestimmt. Die Verortung der Mengen wurde mit dem räumlichen Landnutzungsmodell LandSHIFT durchgeführt. Die ermittelten Flächenbedarfe in den

einzelnen Szenarien wurden an das LandShift Modell übergeben. Im Modell LandShift werden diese Bedarfe räumlich verortet bzw. die Möglichkeit der Verortung geprüft. In einem iterativen Prozess wurden dann die Durchschnittserträge im Optimierungsmodell angepasst und die ermittelten Flächenbedarfe wieder zurück übergeben.

#### 2.1.4 Analyse der Auswirkungen (AP4)

Das Arbeitspaket vier beschäftigte sich mit der Bewertung der betrachteten Einzeltechnologien, sowie der Gesamteffekte für die definierten Szenarien und Teilmärkte. Dabei wurden aus dem AP4 Kennzahlen zu ökologischen und ökonomischen Indikatoren der betrachteten Technologien bereitgestellt. Diese Kennzahlen konnten in BENSIM wiederum als Grundlage für die Ermittlung der optimalen Lösung für die Teilmärkte und Szenarien verwendet werden. Teile der, aus AP 4 bereitgestellten Kennzahlen zur Technologiebewertung sind in den erarbeiteten Technologiesteckbriefen enthalten.

Neben der Bereitstellung von Grundlagen für die Technologiebeschreibung in AP 2 und der Modellierung der Teilmärkte in AP 3, beschäftigte sich das AP 4 im Schwerpunkt mit möglichen Folgeeffekten aus den Entwicklungen in den modellierten Teilmärkten. Dazu zählen Effekte durch Landnutzungsänderungen in Folge veränderter Nachfragen nach nachwachsenden Rohstoffen und damit verbundene Treibhausgasemissionen durch Veränderungen im Kohlenstoffbestand auf den betroffenen Flächen. Zu diesem Zweck, erfolgte auf Basis der Modellierungsergebnisse aus dem AP 3 zunächst eine Verortung der Bereitstellung der notwendigen Biomassen mit dem Landnutzungsmodell LandSHIFT.D.

Im Rahmen von BioplanW wurde LandSHIFT.D für die Studienregion Deutschland angepasst und gegenüber der u.a. im Meilensteine-Projekt verwendeten globalen Modellversion erweitert. Diese Erweiterung umfasst zum einen die Darstellung der Landnutzung auf einem hochaufgelösten Raster mit einer Zellgröße von 250m (anstatt ~7x7 km in der globalen Version). Zum anderen wurden Kurzumtriebsplantagen (Pappel) und Miscanthus als neue Energiepflanzen eingeführt. Für die Simulationsstudien wird das Modell im Startjahr 2015 u.a. mit Satellitendaten zur Landbedeckung (CORINE Landcover CLC 2012, Büttner et al. 2014) und Daten zur Agrarflächennutzung auf Landkreisebene, die vom Thünen Institut bereitgestellt wurden, initialisiert (Offermann et al. 2018).

Die Schnittstelle zu BENSIM wurde dahingehend erweitert, dass ein wechselseitiger Datenaustausch stattfindet. Auf der einen Seite verortet LandSHIFT.D die Nachfrage nach den verschiedenen Typen von Biomasse, auf der anderen Seite gibt es Informationen über das verfügbare Flächenangebot an BENSIM zurück, um Auswirkungen auf die Produktionskosten von Biomasse detaillierter abbilden zu können.

Als Ergebnis der Verortung des Biomasseanbaus mittels LandSHIFT.D wurden Rasterkarten generiert und im Folgeschritt vom DBFZ als Grundlage der Emissionsbewertung für die modellierten Landnutzungsänderungseffekte verwendet. Die Bewertung erfolgte auf Basis eines empirischen Modellansatzes (IPCC Tier 1; siehe Humpenöder et al. 2013) zur Abschätzung der Auswirkungen der Landnutzungsänderungen auf die biologische Kohlenstoffspeicherung in Böden und Vegetation. Die so ermittelten Emissionen wurden in die THG-Bilanzierung der betrachteten Technologien integriert. Zudem liefern sie Informationen zu regionalen Schwerpunkten und etwaigen Vorzugsregionen, welche für die Regional- und Landschaftsplanung relevant sein können.

#### 2.1.4.1 Ergebnisse der Modellierung der Flächenentwicklung mit LandSHIFT

Die Gesamtfläche von Miscanthus und Pappel in Deutschland im Jahr 2015 beträgt 11.130 ha (nach BENSIM). Die Modellierung der zeitlichen Entwicklung erfolgt auf Bundeslandebene. Die 2015er Gesamtfläche von Miscanthus und Pappel wurden dazu mit den verfügbaren bundeslandspezifischen Statistiken von 2009/2010 (nach Aust 2012 bzw. Schütte 2011) entsprechend verteilt. Die Stadtstaaten Berlin, Bremen und Hamburg weisen erwartungsgemäß keine Nutzflächen für Miscanthus und Pappel auf. Agrarkulturen werden in LandSHIFT.D primär auf Brachflächen und nicht unter Naturschutz stehende Flächen verortet. Dies ist somit konform zur Szenarienannahme „die heimische Biomassepotentiale von Brachflächen zu nutzen“ und damit natürliche Vegetationsflächen zu schützen.

Des Weiteren wurden mit LandSHIFT.D verschiedene Ausprägungen der Landnutzung bis zum Jahr 2050 berechnet. Als Eingabedaten für das Modell wurden die vier von BENSIM berechneten Szenarien zur Energiepflanzenproduktion (Miscanthus und Pappel) mit Annahmen zur Entwicklung der übrigen Agrarproduktion und von Ernteerträgen verknüpft. Bis 2027 wurden die zuletzt genannten Daten direkt aus der Thünen-Baseline (Offermann et al. 2018) übernommen. Für den Zeitraum bis 2050 erfolgte eine statistische Extrapolation der Trends zwischen 2015 und 2027. Die daraus resultierenden vier Szenarien wurden dann mit je drei Varianten zum Flächenschutz kombiniert:

- 1) Szenarien mit Schutz von Waldflächen,
- 2) Szenarien mit Schutz von Wald und Grünlandflächen,
- 3) Szenarien mit Schutz von Wald und Grünlandflächen plus 10% Naturflächenerhalt in landwirtschaftlich genutzten Zellen.

Die zunehmend ambitionierteren Maßnahmen zum Naturschutz in den drei Varianten führen demzufolge zu einer reduzierten Verfügbarkeit von Fläche, die landwirtschaftlich genutzt werden kann. Während Variante 1 nur die Umwandlung von Wald in landwirtschaftliche Nutzung ausschließt, erweitert Variante 2 diese Vorgabe um ein Verbot zum Umbruch von Grünland. Variante 3 schließlich geht davon aus, dass zusätzlich landwirtschaftliche Flächen selbst extensiver bewirtschaftet werden, z.B. in Form von Ökolandbaus oder einer stärker auf Naturflächen- und Artenschutz ausgerichteten herkömmlichen Landwirtschaft.



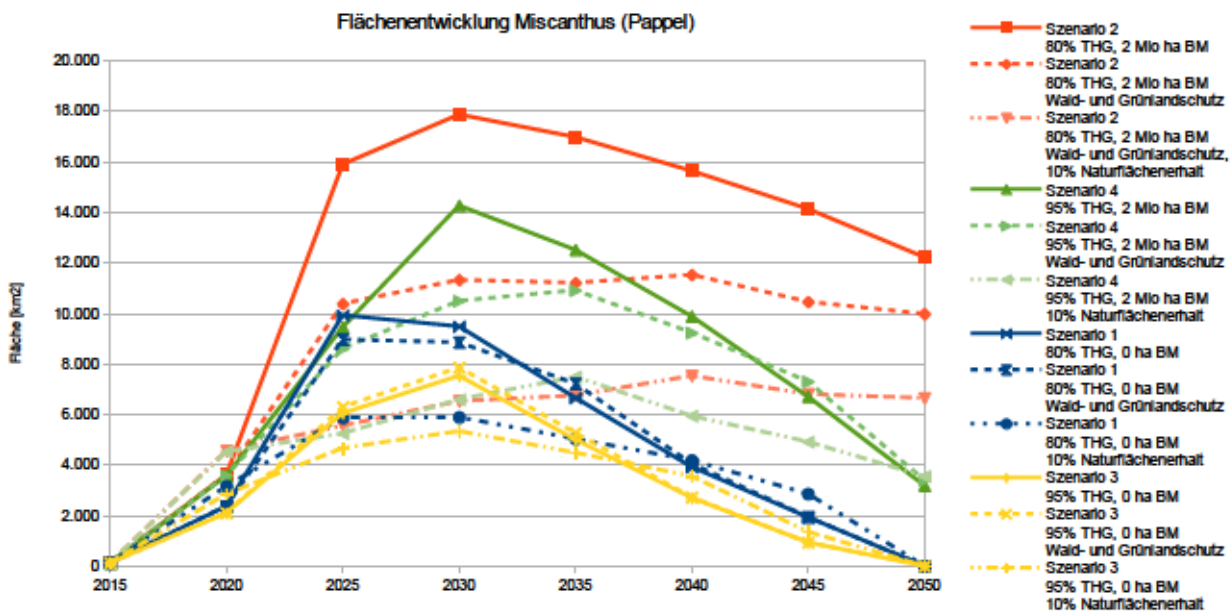


Abbildung 22 Entwicklung der Anbaufläche von Miscanthus und Pappel zwischen 2015 und 2050 unter den Szenario-Annahmen, berechnet mit LandSHIFT.D

Abbildung 22 zeigt die Entwicklung der berechneten Flächeninanspruchnahme durch Miscanthus und Pappel zwischen 2015 und 2050 für Deutschland in aggregierter Form für die unterschiedlichen Szenarien. Die Ergebnisse spiegeln im Wesentlichen den Verlauf der von BENSIM berechneten Produktionsentwicklung dieser Energiepflanzen wider. Nach einem starken Anstieg der Nutzung in den ersten Jahren des Untersuchungszeitraums ergibt sich das Maximum im Jahr 2030. Danach geht die Flächeninanspruchnahme aufgrund geringerer Nachfrage oder vermehrtem Konkurrenzdruck in allen Szenarien zurück, in den Szenarien 1 und 3 gibt es bis 2050 keine Nachfrage mehr.

Es zeigt sich allerdings deutlich, dass die notwendigen Flächen bis zum Peak-Jahr 2030 lediglich für die Szenarien mit der Variante „Waldschutz“ in Gänze zur Verfügung stehen (durchgezogene Linien), während dies für die ambitionierteren Varianten zum Flächenschutz nicht der Fall ist. Dies drückt sich in den jeweils geringeren genutzten Flächen für diese Szenarien aus (gestrichelte und gepunktete Linien). In Szenario 4 verringert sich die Nachfrage bis 2050 dann soweit, dass in allen drei Ausprägungen die nachgefragte Fläche für Energiepflanzen im Jahre 2050 zugewiesen werden kann. Lediglich in Szenario 2 kann die Nachfrage weiterhin nur in der Variante „Waldschutz“ bedient werden.

Im Folgenden wird für das Peak-Jahr 2030 eine Betrachtung der Landnutzungsänderungen in den 4 Szenarien mit der Variante „Waldschutz“, unter denen die von BENSIM berechneten Anbaufläche für Energiepflanzen erfolgreich zugewiesen werden konnte, vorgenommen, um mögliche Flächenkonkurrenz zu identifizieren. Abbildung 22 zeigt, dass der größte Teil der Anbaufläche auf bestehender Kulturbrache realisiert wird. An zweiter Stelle liegt die Konversion von Grünland. Eine Umnutzung von anderen Wechselkulturen findet nur in sehr geringem Umfang statt. An dieser Stelle liegt demnach keine gravierende Konkurrenz zu anderen Nutzungen vor. Wie schon angedeutet, verändert sich diese Situation gravierend durch die Einführung von ambitionierten Schutzziele.



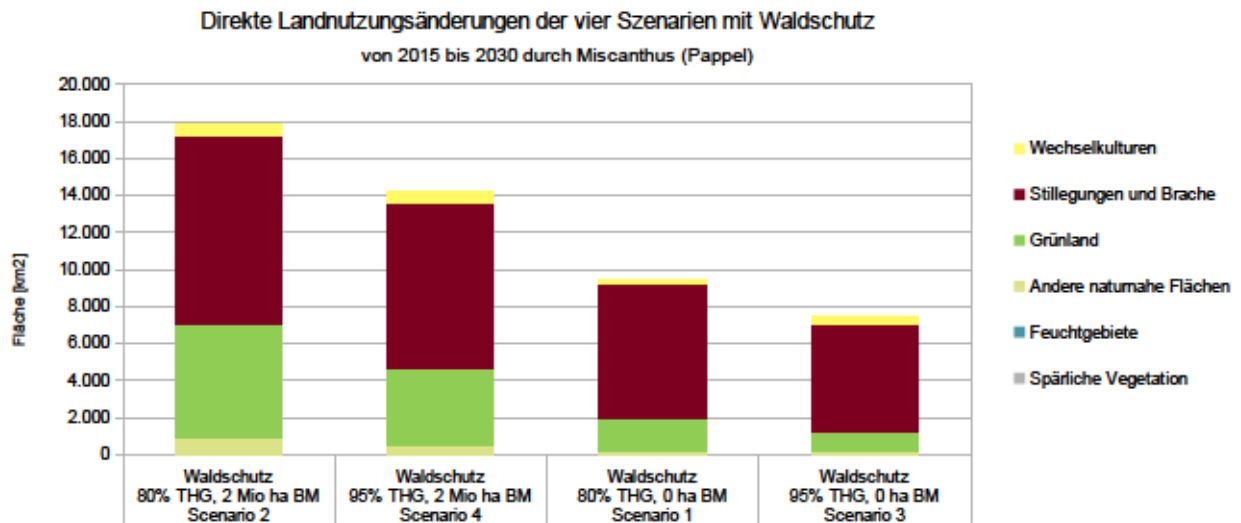


Abbildung 23 Direkte Landnutzungsänderungen der 4 Szenarien für die Kategorie Waldschutz

Ergebnisse einer genaueren Analyse, warum es zu diesen Fehlflächen kommt sind exemplarisch für Szenario 2 in Abbildung 23 dargestellt. Zwei Effekte sind zu unterscheiden: Zunächst sind Fehlflächen bedingt durch die Modellstruktur von LandSHIFT.D, das auf Bundeslandebene arbeitet. Nicht verfügbare Fläche in einem Bundesland kann aktuell nicht in ein anderes Bundesland mit noch vorhandenem Flächenpotenzial „verschoben“ werden. Dieser Effekt wird in Abbildung 23 deutlich in der Variante Wald- und Grünlandschutz. Hier muss in folgenden Projekten eine Erweiterung des Modelldesigns erfolgen. Im Gegensatz dazu, zeigt sich unter Variante 3 sehr deutlich, dass die dort getroffenen Annahmen zum Flächenschutz und die dadurch erzeugte Reduzierung der insgesamt für landwirtschaftliche Nutzung verfügbaren Flächen eine Zuordnung der Energiepflanzen nicht in vollem Umfang zulassen. Anbaupotenziale und Naturschutz sollten daher in kommenden Arbeiten in stärkerem Maße schon bei der Entwicklung der Szenarien integriert betrachtet werden.

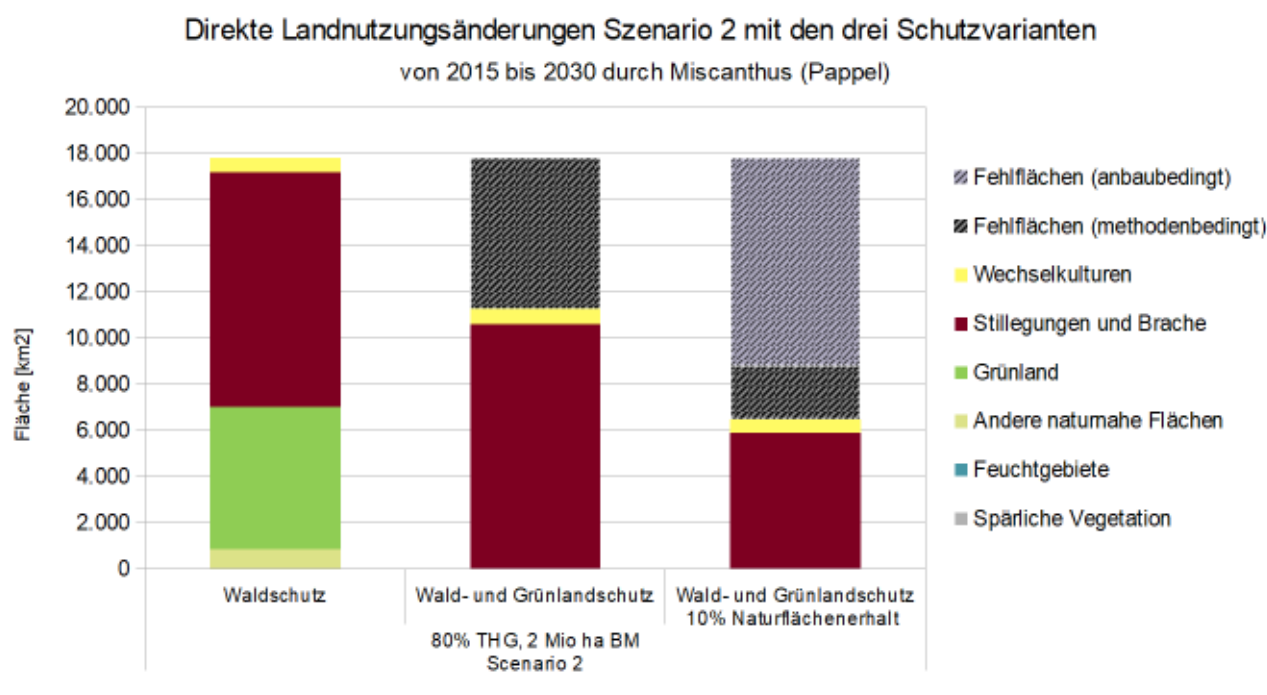


Abbildung 24 Direkte Landnutzungsänderungen unter des Szenario 2 für die drei Schutzausprägungen

#### 2.1.4.2 THG-Emissionen aus Landnutzungsänderungen

Die Verortung der Biomasseproduktion zur Bedienung der Nachfrage für die modellierten Teilmärkte ist der Ausgangspunkt für die Berechnung möglicher THG-Emissionen aus dem Umbruch von Flächen bzw. aus der Veränderung von Flächennutzungen. Für die modellierten Landnutzungsänderungen aus dem vorangegangenen Arbeitsschritt wurden im folgenden THG-Emissionsbilanzen aufgestellt. Diese Bilanzen berücksichtigen die, durch die Landnutzungsänderungen induzierten Änderungen der gespeicherten Kohlenstoffmenge auf der jeweiligen Fläche. Die Ergebnisse können Hinweise auf notwendige Schutzmechanismen zur Vermeidung negativer LUC Effekte sein. In Kombination mit den Ergebnissen von LandSHIFT.D können zudem HOT-SPOT-Regionen identifiziert werden.

##### Einleitung und Zielstellung

Landnutzungsänderungen im Rahmen dieses Berichtes bezeichnen größere Umbrüche von Flächen, mit dem Ziel des Anbaus nachwachsender Rohstoffe. Die Ausgangsflächen können dabei natürliche Flächen, Grünland, Brachflächen oder Waldflächen sein. Ebenfalls betrachtet wurde der Wandel von landwirtschaftlichen Flächen, auf denen in Fruchtfolgen einjährige Kulturen und Feldfrüchte angebaut wurden, hin zu Flächen mit mehrjährigen Kulturen. Konsequenz dieses Wandels kann eine Änderung der insgesamt in Boden und Vegetation gespeicherten Kohlenstoffmenge sein. Diese Änderung wird im Folgenden für die in Kapitel 2.1.4.1 modellierten Szenarienergebnisse berechnet.

##### Methode

Die Treibhausgasemissionen aus den direkten Landnutzungsänderungen wurden mit Hilfe des von der EU Kommission anerkannten BIOGRACE Tool – Harmonised Calculations of Biofuels Greenhouse Gas Emissions in Europe (BioGrace 2014) – ermittelt. Die Berechnung mit Hilfe des Tools basiert auf den

Leitlinien für die Berechnung des Kohlenstoffbestands im Boden der Europäischen Kommission (2010/335/EU) (European Commission 2010a), welche die Regeln in Anhang V der Erneuerbaren Energien Richtlinie 2009/28/EG (European Commission 2009) ergänzen. Grundsätzlich findet hier die Methode der IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Tier 1 aus dem Jahr 2006 (Eggleston et al. 2006) Anwendung. Gemäß der Methode wird angenommen, dass sämtliche Kohlenstoffbestände in lebender Biomasse und toter organischer Substanz bei der Umwandlung der Fläche verloren gehen, also als THG-Emission zu betrachten sind. Dementsprechend stellen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Landnutzungsänderung vereinfacht gesagt als Differenz der Kohlenstoffbestände der Bezugsflächennutzung und der Kohlenstoffbestände der Flächennutzung nach der Umwandlung dar, wie in nachfolgender Gleichung beschrieben:

$$e_i \left[ \frac{tCO_2}{ha * a} \right] = \left[ CS_R \left[ \frac{t C}{ha * a} \right] - CS_A \left[ \frac{t C}{ha * a} \right] \right] * 3,664 * 20[a]$$

$e_i$  = CO<sub>2</sub> Emissionen infolge von Landnutzungsänderungen

$CS_R$  = der mit der Bezugsfläche verbundene Kohlenstoffbestand je Flächeneinheit

$CS_A$  = der mit der tatsächlichen Nutzung verbundene Kohlenstoffbestand je Flächeneinheit

$CS_R$  = der mit der Bezugsfläche verbundene Kohlenstoffbestand je Flächeneinheit

Der mit der jeweiligen Flächennutzung verbundene Kohlenstoffbestand ergibt sich aus der Summe des organischen Kohlenstoffs im Boden (SOC) und dem Kohlenstoffbestand der Vegetation über und unter der Erdoberfläche.  $CS_i = (SOC + C_{VEG}) * A$

$SOC$  = organischer Bodenkohlenstoff

$C_{VEG}$  = Kohlenstoffbestand in über – und unterirdischer Vegetation

$A$  = Fläche

Die bestimmenden Faktoren zur Berechnung des im Boden enthaltenen organischen Kohlestoff zeigt die nachfolgende Gleichung.

$$SOC = SOC_{ST} * F_{LU} * F_{MG} * F_I$$

$SOC$  = organischer Kohlenstoff im Boden (gemessen als Masse an Kohlenstoff pro ha)

$SOC_{ST}$  = Standardwert für organischen Kohlenstoff in der Oberbodenschicht (0 – 30cm) (gemessen als Masse an Kohlenstoff pro ha)

$F_{LU}$  = Flächennutzungsfaktor für die Abweichung des Wertes für organischen Kohlenstoff

$F_{MG}$  = Bewirtschaftungsfaktor für die Abweichung des Wertes für organischen Kohlenstoff

$F_I$  = Inputfaktor für die Abweichung des Wertes für organischen Kohlenstoff

Unter Bezugnahme der gewählten Klimaregion und Bodenart können für die oben benannten Faktoren und Werte zur Bestimmung des organischen Kohlenstoffs im Boden, die in den Leitlinien 2010/335/EU (European Commission 2010a) angegebenen Werte angewendet werden. Die für die weiteren Berechnungen getroffenen Annahmen sind in Tabelle 11 dargestellt. Entsprechend der Klimaregion „Gemäßigt kühl /feucht“ und der Bodenart „Lehmboden, hohe Aktivität“ ergibt sich als Standwert für organischen Kohlenstoff in der Oberbodenschicht z. Bsp. ein Wert von 95 t C/ha. Die Faktoren für die Abweichung vom Standardbestand wurden in Abhängigkeit der Flächennutzung den jeweiligen Tabellen der Leitlinien entnommen.

Tabelle 11 Annahmen für die Berechnung der THG-Emissionen aus direkter Landnutzungsänderung

| Beschreibung                               |                        | Dauerkulturen                | Kulturflächen<br>(Brache, set-<br>aside) | Kulturflächen<br>(Wechselkulturen) | Grünland<br>(Grasland,<br>Weideland,<br>Feuchtland) |
|--------------------------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Klimaregion                                |                        | Gemäßigt kühl/<br>feucht     | Gemäßigt kühl/<br>feucht                 | Gemäßigt kühl/<br>feucht           | Gemäßigt kühl/<br>feucht                            |
| Bodenart                                   |                        | Lehmboden,<br>hohe Aktivität | Lehmboden,<br>hohe Aktivität             | Lehmboden, hohe<br>Aktivität       | Lehmboden,<br>hohe Aktivität                        |
| über- und unter-<br>irdische<br>Vegetation | $C_{VEG}$ (t C/ha)     | 43,2                         | 0                                        | 0                                  | 6,8                                                 |
| Standard<br>Bodenkohlenstoff               | $SOC_{ST}$<br>(t C/ha) | 95 <sup>a</sup>              | 95                                       | 95                                 | 95                                                  |
| Landnutzung                                | $F_{LU}$               | 1                            | 0,82                                     | 0,69                               | 1                                                   |
| Bodenbearbeitung                           | $F_{MG}$               | 1,15                         | 1,15                                     | 1                                  | 1                                                   |
| Kohlenstoffinput                           | $F_i$                  | 0,92                         | 0,92                                     | 1                                  | 1                                                   |

Die Werte für den Kohlenstoffbestand der Vegetation über und unter der Erdoberfläche  $C_{VEG}$  wurden ebenfalls den zitierten Leitlinien entnommen. Die in Tabelle 11 dargestellten Werte für  $C_{VEG}$  zeigen eine große Bandbreite von 43,2 t C/ha im Fall der Dauerkulturen bis 0 t C/ha für Brach- und Kulturflächen. Unter Einbeziehung der Berechnung des organischen Kohlenstoffs, würde sich z. Bsp. für eine Umwandlung einer Brachfläche in eine Dauerkulturfläche der mit der jeweiligen Flächennutzung verbundene Kohlenstoffbestand CS von 65t Kohlenstoff auf 144 t Kohlenstoff erhöhen.

<sup>a</sup> Tabelle 1, 2010/335/EU



## Ergebnisse

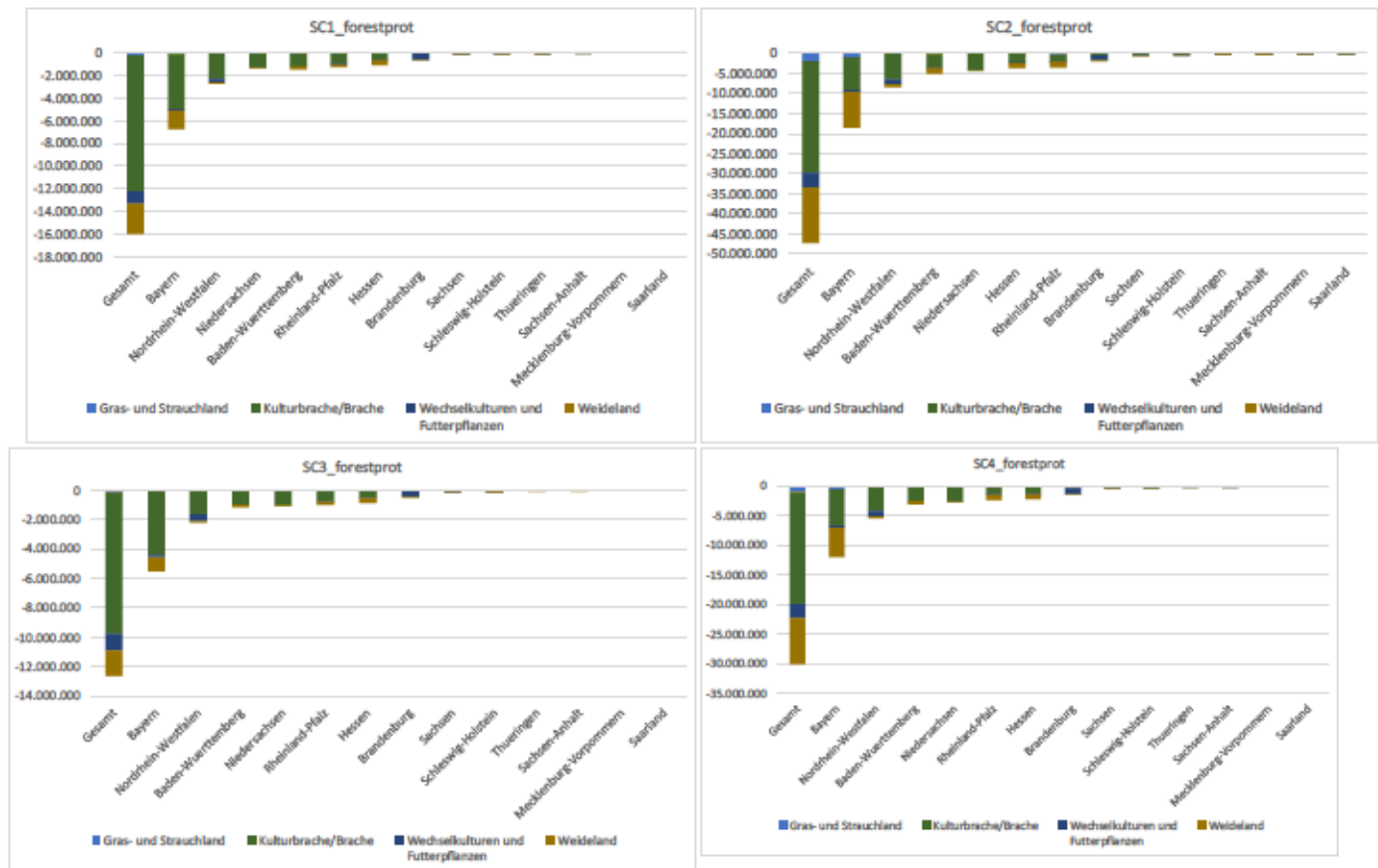
Unter Verwendung der in Tabelle 11 getroffenen Annahmen und den Ergebnisse der Modellierung der Landentwicklung mit LandSHIFT.D wurden für die 4 Szenarien die THG-Emissionen infolge Landnutzungsänderung ermittelt. Dabei wurden die Szenarien in jeweils folgenden 2 Kategorien betrachtet:

- Szenarien nur mit Waldschutz
- Szenarien mit Wald-, Naturflächenschutz und 10% Naturfläche pro Zelle

Im ersten Schritt wurden die Ergebnisse der vier Szenarien mit der Schutzkategorie Waldschutz berechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Abbildung 25 dargestellt. Die Ergebnisse bauen auf den Berechnungen des LandSHIFT.D Modell auf, d.h. die Höhe der modellierten Landnutzungsänderungen in den einzelnen Bundesländern wurde übernommen und die Landnutzungsänderungen in THG-Emissionen überführt. In der Folge, bestätigen die Ergebnisse zunächst die Hot-Spots, d.h. die Regionen mit den größten Landnutzungsänderungen sowie die Arten der Landnutzungsänderungen aus den Ergebnissen des LandSHIFT.D Modells. Die Höhe der THG-Emissionen variiert jedoch zwischen den Szenarien deutlich.

Die Landnutzungsänderungen aus der LandSHIFT.D Modellierung betreffen vor allem die Landnutzungskategorien (Kulturbrache/Brache), Weideland (je nach Szenarioausprägung) bzw. Landnutzungsänderungen innerhalb von landwirtschaftlichen Anbausystemen (zu Lasten anderer Feldfrüchte). Der deutliche Einfluss des in der Vegetation akkumulierten Kohlenstoffes spiegelt sich dabei in den Ergebnissen wieder. „Hot-Spot“ Regionen sind je nach Szenario bzw. Szenarioausprägung die Bundesländer: Bayern, Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen.

In der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die dargestellten THG-Emissionen für alle vier Szenarien negativ sind. Das heißt, durch die Landnutzungsänderungen, hin zu einem Anbau von Miscanthus/Pappel kommt es in allen Szenarien insgesamt zu Kohlenstoffanreicherungen und damit theoretisch auch zu THG-Einsparungen. In Kombination mit der Betrachtung der Art der betroffenen Flächen zeigt sich dabei aber auch, dass der Indikator THG-Emissionen als alleinige Bewertungsgröße unzureichend zu sein scheint, da der hohe Wert dieser Flächen für andere Schutzgüter wie bspw. die Biodiversität im Falle von Brachen nicht abgebildet werden kann. Eine alleinige Fixierung auf den Indikator THG-Emissionen kann somit auch zu Zielkonflikten bzw. Fehlentscheidungen bei der Entwicklung von Handlungsempfehlungen führen.

Szenarien nur mit Waldschutz (in t CO<sub>2</sub>-Äq./Jahr)Abbildung 25 CO<sub>2</sub> Emissionen infolge Landnutzungsänderungen der 4 Szenarien für die Kategorie Waldschutz in tCO<sub>2</sub>

Aufbauend auf den Ergebnissen der ersten Schutzkategorie zeigt Abbildung 26 die Ergebnisse der vier Szenarien mit verschärften Schutzkategorien für Waldflächen, Grasland und Ackerflächen.

Die Ergebnisse bestätigen grundsätzlich die Aussagen in Bezug auf regionale Hot-Spots aus Abbildung 25. Die Höhe der THG-(Einspar-)Effekte ist dabei beachtlich (~ 50 Mio. Tonnen gesamt im Szenario SC2\_forestprot). Bei der Bewertung der absoluten Höhe der ausgewiesenen Emissionen sind allerdings auch die methodischen Unsicherheiten des verwendeten IPCC Berechnungsansatzes zu beachten.

Erneut wird dabei deutlich, dass der Indikator THG-Einsparung für die Bewertung der Landnutzungsänderungen alleine nicht ausreichend ist. Landnutzungsformen wie Kulturbrache/Brache sind z.T. wichtige Flächen für den Erhalt der Biodiversität. Diese Effekte sind durch den Indikator THG-Einsparung nicht sichtbar.

**Ergebnisse Szenarien Waldschutz + Gras + Acker (in t CO<sub>2</sub>-Äq.)**

 Abbildung 26 CO<sub>2</sub> Emissionen infolge Landnutzungsänderungen der 4 Szenarien für die Kategorie Waldschutz in tCO<sub>2</sub>

Im Rahmen eines Workshops (WS) wurden die Modellierungsergebnisse (AP3) und Auswirkungen (AP4) diskutiert. Im Ergebnis erlauben die Arbeiten und Analysen im Arbeitspaket 4, neben der Bewertung von Kosten und Umwelteffekten, auch die Identifikation der effizientesten Kombinationen von Technologien und Biomassen in Bezug auf Kosten und Umwelteffekte in Rückspiegelung mit dem übrigen Energiesystem.

### 2.1.5 Maßnahmen, Handlungsempfehlungen und Ergebniskommunikation (AP5)

In diesem AP wurden die Potenziale und die Rolle der ausgewählten innovativen, effizienten und emissionsarmen Konzepte im zukünftigen Energiesystem und den Energiemärkten für Deutschland bewertet. Des Weiteren wurde der Beitrag der Konzepte zur Zielerreichung (THG-Emissionsminderung, Anteile EE) und die Hemmnisse für deren erfolgreiche Integration dargestellt. Empfehlungen sind in Form von Geschäftsmodellen, notwendigen Rahmenbedingungen und zu erreichenden Meilensteinen an Wirtschaft, Wissenschaft und Politik adressiert. Diese sollen vor allem die Ausgestaltung konkreter Maßnahmen, z.B. Gesetze, Verordnungen oder Förderprogramme unterstützen. Ein Workshop zur Diskussion der Empfehlungen wurde 2019 durchgeführt, um die Relevanz der Handlungsempfehlungen abzusichern. Es wurden Vorschläge für Notwendigkeiten von Technologieentwicklung, Anforderungen, Ziele und Zwischenziele einer erfolgreichen Entwicklung abgeleitet. Zu dem Workshop wurde das



Projektteam „100266738 Bio-Strom-Wärme“ vom Öko-Institut (Koch et al. 2018) sowie den wissenschaftlichen und politischen Begleitkreis eingeladen.

Ergebnisse sind innerhalb von Kapitel 2.4 und im Anhang A 1 dargestellt.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wurde von den Projektpartnern ausgestellt und an das PtJ Berlin versendet.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Biomasse spielt aktuell eine dominierende Rolle im Wärmesektor, die sich mit einem Anteil von 88 % an der erneuerbaren Wärmeerzeugung im Jahr 2014 (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2019) widerspiegelt. Auch künftig wird Biomasse im Wärmemarkt eine wichtige Rolle einnehmen (BMW i 2014b; BMW i/BMU (Hrsg.) 2010), Bekanntmachung „Energetische Biomassenutzung). Aufgrund der begrenzten Biomassepotenziale ist es jedoch wichtig, die kostengünstige Biomasse in effizienten, emissionsarmen und zukunfts- und wettbewerbsfähigen Umwandlungstechnologien einzusetzen, um die Energienachfrage im Zusammenspiel mit anderen erneuerbaren Energieträgern flexibel und intelligent decken zu können. Es stellt sich – auch vor dem Hintergrund begrenzter Ressourcen, Akzeptanzfragen und künftiger Kostenentwicklungen – daher die Frage, welche quantitative und qualitative Rolle die Biomasse inkl. KWK-Wärme und in Relation zu anderen EE-Wärmeoptionen in den Wärmemärkten der Zukunft einnehmen und wie diese möglichst kostengünstig, effizient und umweltfreundlich realisiert werden kann.

Es gibt zahlreiche Szenarien Studien über die Energiewende und erneuerbare Energien (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH 2018), andere die den Klimabeitrag modellieren (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung 2015). Es gibt aber nur wenige, die die Bioenergie in Details betrachten (Thrän 2015). Das Projekt Meilensteine 2030 (Thrän 2015) hat den Wärmesektor nicht in Detail betrachtet, aufgrund seiner Heterogenität. Aus diesem Hintergrund wurde das Projekt BioplanW speziell für den Wärmesektor und die Rolle Bioenergie initiiert.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Verwertbarkeit der Ergebnisse wurde in Kapitel 2 näher beschrieben. Ergebnisse und Handlungsempfehlungen wurden gezielt präsentiert und publiziert (siehe Literatur Kapitel 2.6). Die Ergebnisse stellen wesentliche und neue Handlungsempfehlungen für einen zukünftigen Umgang mit Biomasse dar. Die ökonomische Bewertung liefert Grundlagen für wirtschaftliche Bewertungen und gibt der Industrie wichtige Impulse für den zukünftigen Einsatz der Biomasse. Insgesamt wurden 3 Kernhandlungsempfehlungen formuliert die im Folgenden dargestellt sind.



# 47

# BIOPLANW

## MODELLKONZEPTE FÜR EINE KLIMANEUTRALE WÄRMEVERSORGUNG

### HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

#### 1 Einsatz von WKK-Technologien

- A. ERWARTUNGEN
- B. RAHMENBEDINGUNGEN
- C. HEMMNISSE
- D. FORSCHUNG, ENTWICKLUNG UND DEMONSTRATION
- E. MARKTUMSETZUNG

#### 2 Industrielle Wärmenutzung

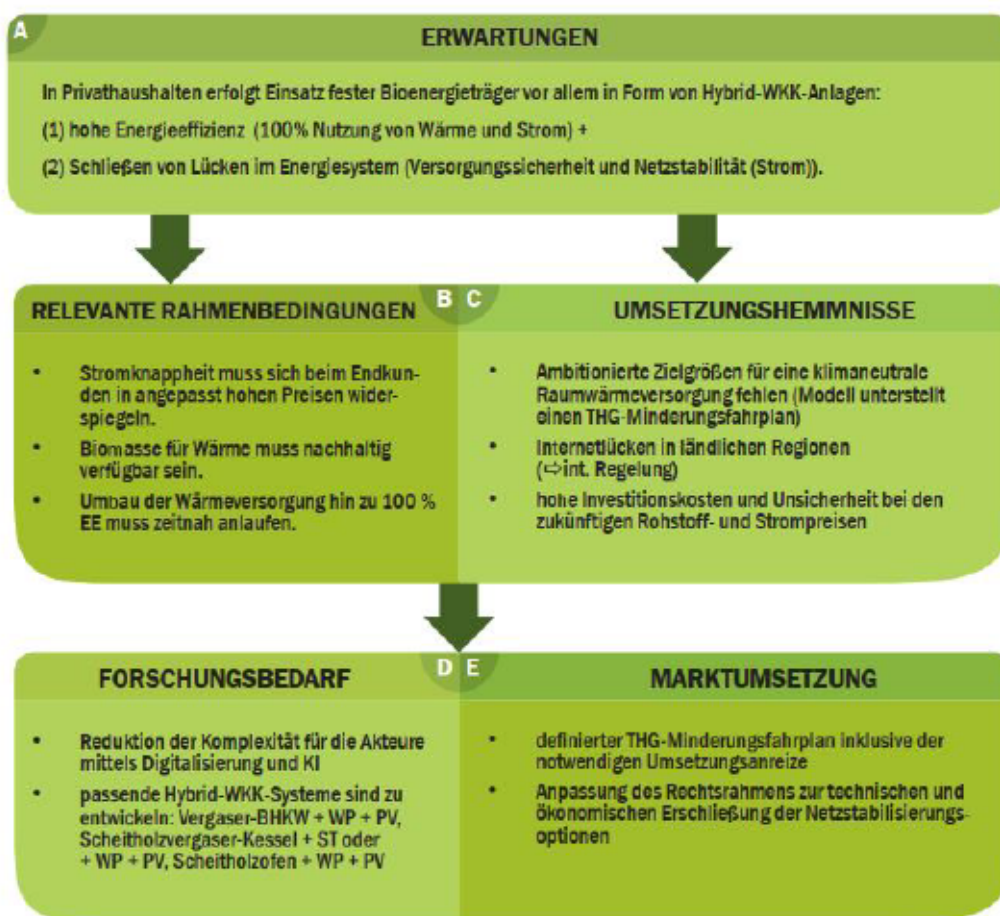
- A. ERWARTUNGEN
- B. RAHMENBEDINGUNGEN
- C. HEMMNISSE
- D. FORSCHUNG, ENTWICKLUNG UND DEMONSTRATION
- E. MARKTUMSETZUNG

#### 3 Bereitstellung von Festbrennstoffen

- A. ERWARTUNGEN
- B. RAHMENBEDINGUNGEN
- C. HEMMNISSE
- D. FORSCHUNG, ENTWICKLUNG UND DEMONSTRATION
- E. MARKTUMSETZUNG

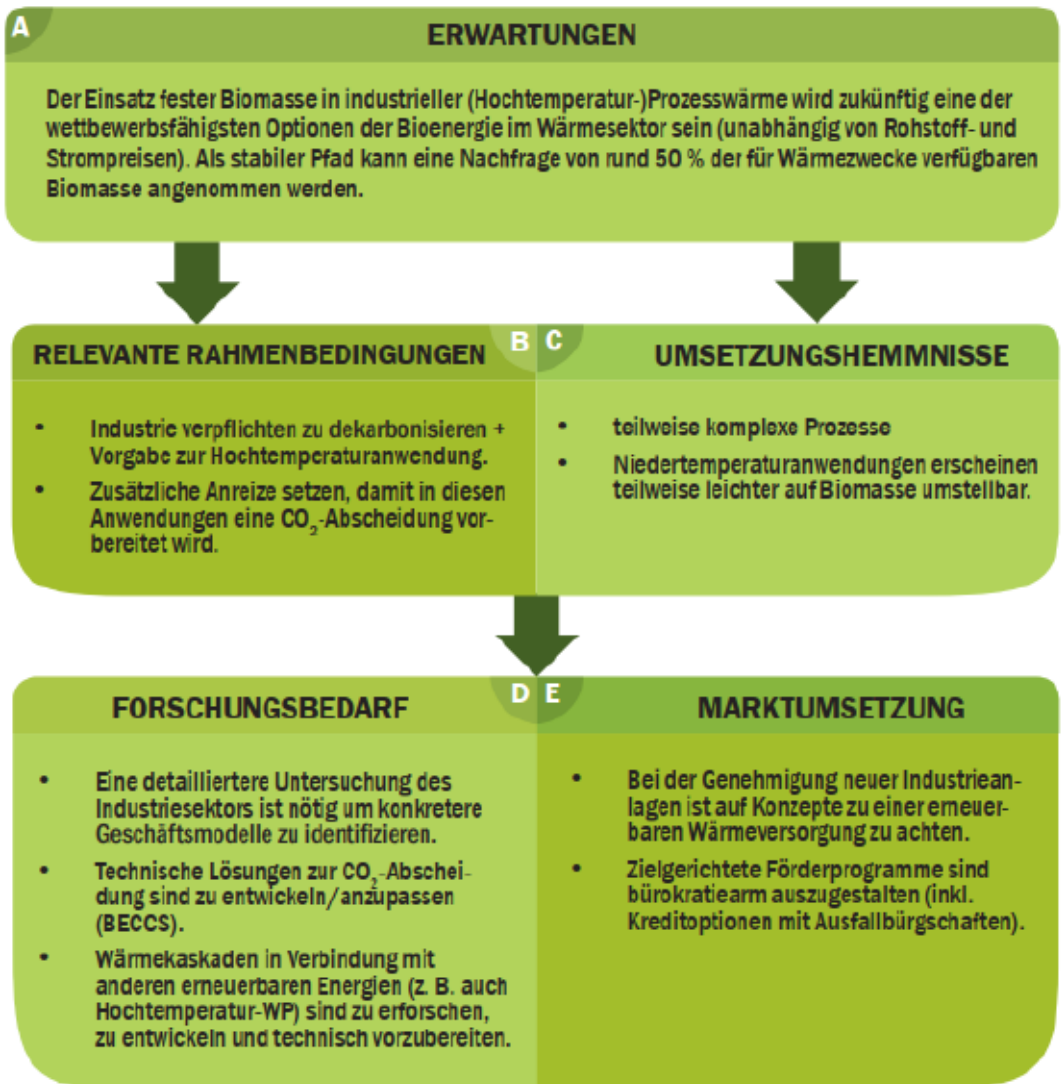
# 1

## EINSATZ VON WÄRME-KRAFT-KOPPLUNGSTECHNOLOGIEN (SMARTE STROM-WÄRME-SEKTORKOPPLUNG)



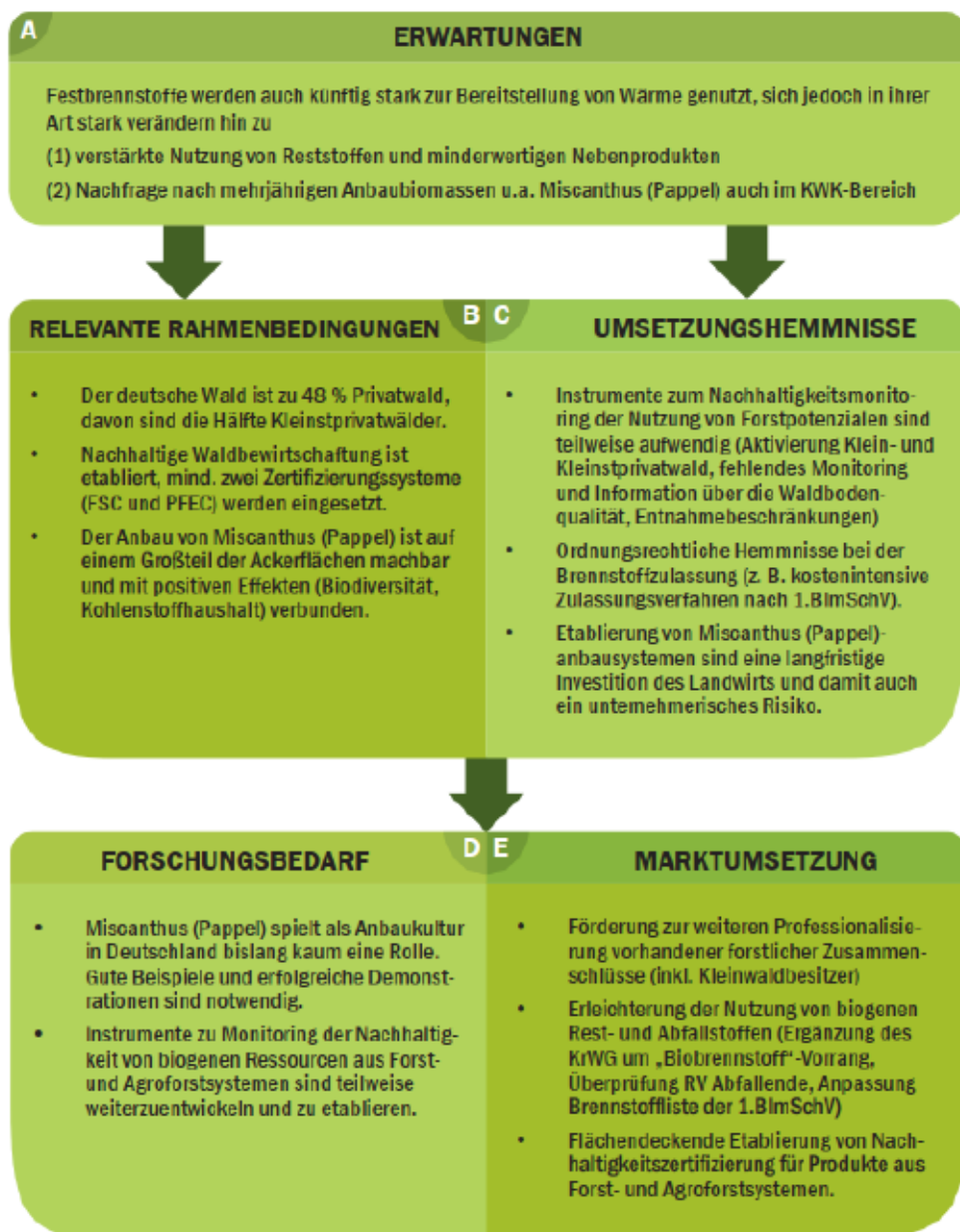
# 2

## INDUSTRIELLE WÄRMENUTZUNG



# 3

## BEREITSTELLUNG VON FESTBRENNSTOFFEN





## 2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Rahmen der Szenarienerarbeitung wurden die neue Leitstudie des BMWi mit im BioplanW Projekt integriert. Eine weitere Ausformulierung ist im AP1 beschrieben.

Unter anderem wurde während der Projektlaufzeit folgende Studien publiziert die im Projekt integriert wurden:

- Pfluger, B.; Tersteegen, B.; Franke, B. (2017b): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/langfrist-und-klimaszenarien.html>

## 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

- Partnerspezifisch:
  - **Partner:** Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH - DBFZ
  - Nora Szarka, Volker Lenz, Daniela Thrän. The crucial role of biomass-based heat in a climate-friendly Germany – A scenario analysis. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115859>
  - **Partner:** Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH - DBFZ, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung - UFZ
  - Volker Lenz, Matthias Jordan. Technical and economic data of renewable heat supply systems for different heat sub-sectors. <https://data.mendeley.com/datasets/v2c93n28rj> doi:10.17632/v2c93n28rj.1
  - Daniela Thrän, Volker Lenz, Diana Pfeiffer (Hrsg.) (2020): Focus on: Systemlösungen im Wärmesektor – 52 Modellkonzepte für eine Klimaneutrale Wärme. In: Fokusheft Energetische Biomassenutzung, Leipzig – ISSN 2192-1156 (im Druck)
  - Matthias Jordan, Volker Lenz, Markus Millinger, Katja Oehmichen, Daniela Thrän. Competitive Biomass Key Applications to Fulfill Climate Targets in the German Heat Sector: Findings from Optimization Modelling. *EUBCE Conference Proceedings*. <http://www.etaflorence.it/proceedings/?detail=16385> doi:10.5071/27thEUBCE2019-5BV.3.10
  - Matthias Jordan, Volker Lenz, Markus Millinger, Katja Oehmichen, Daniela Thrän. Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116194>
  - Lenz, Volker; Szarka, Nora; Jordan, Matthias; Thrän, Daniela, Submitted to Chemical Engineering & Technology, Manuscript ID ceat.202000077; Title: Status and perspectives of biomass use for industrial process heat, Date Submitted 12-Feb-2020
    - **Partner:** Helmholtz Zentrum für Umweltforschung - UFZ
  - Matthias Jordan, Markus Millinger, Daniela Thrän. Robust bioenergy technologies for the German heat transition: A novel approach combining optimization modeling with Sobol' sensitivity analysis. *Publication in Applied Energy in 02/2020*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114534>

- Workshops:
- Politischer Begleitkreis
  - Ergebnispräsentation – 21.08.2019 – Berlin – Titel: Politischer Begleitkreis zum Projekt BioplanW Systemlösungen Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen
  - Politischer Begleitkreis – 21.11.2017 – Leipzig – Vorstellung des Statement- und Hintergrundpapiers der AG Wärme im Förderprogramm Energetische Bioenergie im Wärmemarkt – Diskussion der politischen Handlungsempfehlungen für Bioenergie im Wärmemarkt
- Öffentliche Workshops
  - Sideworkshop zur 8. Status Konferenz: „BioplanW: 47 Modellkonzepte für eine klimaneutrale Wärmeversorgung – Ergebnispräsentation des BioplanW Projektes zu Systemlösungen Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen“ – 16.09.2019 – Leipzig
  - Ergebnisdarstellung Projekt Bio-Strom-Wärme und Technologien im Projekt BioplanW – 17.04.2018 – Leipzig
  - Workshop – 08.02.2017 – Leipzig - Szenarien 2050 – Projekte BioplanW und Bio-Strom-Wärme
- Konferenzbeiträge
  - **Projektpartner:** Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH - DBFZ, Universität Kassel - CESR, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung - UFZ
  - 7. Status Konferenz Energetische Biomassenutzung: „Szenarien und Modellierung des Wärmesektors in Deutschland bis 2050“ – 21.11.2017 – Leipzig
  - 8. Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung: „Systemlösungen Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen“ – 18.09.2019
  - EUBCE 2019 - Competitive biomass key applications to fulfill climate targets in the German heat sector: Findings from optimization modelling – 28.08.2019
  - 1. Deutsches Doktorandenkolloquium Bioenergie - The future role of bioenergy in the German heat sector in competition with other renewable technologies – 21.09.2018

### 3 Erfolgskontrollbericht

Der Erfolgsbericht wurde gesondert veröffentlicht.

## Abbildungsverzeichnis

|              |                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1  | Arbeitspakete und Vernetzung im geplanten Vorhaben.....                                                                                                                                                                            | 8  |
| Abbildung 2  | Arbeitspakete und Vernetzung im Projekt.....                                                                                                                                                                                       | 12 |
| Abbildung 3  | Kurzdarstellung der Szenarioplanung.....                                                                                                                                                                                           | 13 |
| Abbildung 4  | Szenario Achsen.....                                                                                                                                                                                                               | 14 |
| Abbildung 5  | Endenergieverbrauch Gebäude (Wärme) (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016).....                                                                                                                                       | 18 |
| Abbildung 6  | Annahme für Bevölkerungsentwicklung bis 2050 (Pfluger et al. 2017b).....                                                                                                                                                           | 21 |
| Abbildung 7  | Annahme für BIP Entwicklung 2010-2050 Quellen: (Repenning et al. 2015), Statistisches Bundesamt 15.01.2013.....                                                                                                                    | 22 |
| Abbildung 8  | Entwicklung der ETS-Preise in der EU-Energy Roadmap (European Commission 2011a).....                                                                                                                                               | 23 |
| Abbildung 9  | Annahmen für Treibhausgas-Emissionszertifikatspreise 2010-2050 (Repenning et al. 2015).....                                                                                                                                        | 24 |
| Abbildung 10 | Strompreisentwicklung für Verbrauchergruppen.....                                                                                                                                                                                  | 25 |
| Abbildung 11 | Annahme für die Entwicklung des Weltmarktpreises für Rohöl sowie für europäische Erdgas und Steinkohle (Repenning et al. 2015).....                                                                                                | 27 |
| Abbildung 12 | Endverbraucherpreisentwicklung je Teilmarkt bis 2050.....                                                                                                                                                                          | 28 |
| Abbildung 13 | Biomassepotenzial in verschiedenen Studien (Nitsch et al. 2010; Repenning et al. 2015; Umweltbundesamt 2019; Thrän 2015).....                                                                                                      | 30 |
| Abbildung 14 | Globale Preisentwicklung ausgewählter Rohstoffe. In den letzten ca. 30 Jahren können Preissteigerungen beobachtet werden, die auch im Durchschnitt zugenommen haben. Quelle: (World Bank 2016) und (Millinger und Thrän 2016)..... | 31 |
| Abbildung 15 | Reale Preisentwicklung für zwei Kategorien der Holzprodukte. Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Daten von (Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. 2018).....                                         | 32 |
| Abbildung 16 | Annahme zur Preisentwicklung [€/GJ] bei 3%/a Preissteigerung der Referenzrohstoffe.....                                                                                                                                            | 32 |
| Abbildung 17 | Annahme zur Preisentwicklung [€/GJ] bei 5%/a Preissteigerung der Referenzrohstoffe.....                                                                                                                                            | 33 |
| Abbildung 18 | Zuordnung der möglichen Produktionspfade.....                                                                                                                                                                                      | 35 |
| Abbildung 19 | Entwicklung der Prozesswärmenachfrage in der Industrie. Eigene Berechnung nach Nitsch et al. 2012.....                                                                                                                             | 39 |
| Abbildung 20 | Entwicklung der Raumwärme- und Warmwassernachfrage in der Industrie. Eigene Berechnung nach Nitsch et al. 2012.....                                                                                                                | 40 |
| Abbildung 21 | Lösungsraum für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit von Bioenergietechnologien im Wärmesektor unter unsicheren Entwicklungen.....                                                                                                  | 43 |
| Abbildung 22 | Entwicklung der Anbaufläche von Miscanthus und Pappel zwischen 2015 und 2050 unter den Szenario-Annahmen, berechnet mit LandSHIFT.D.....                                                                                           | 46 |

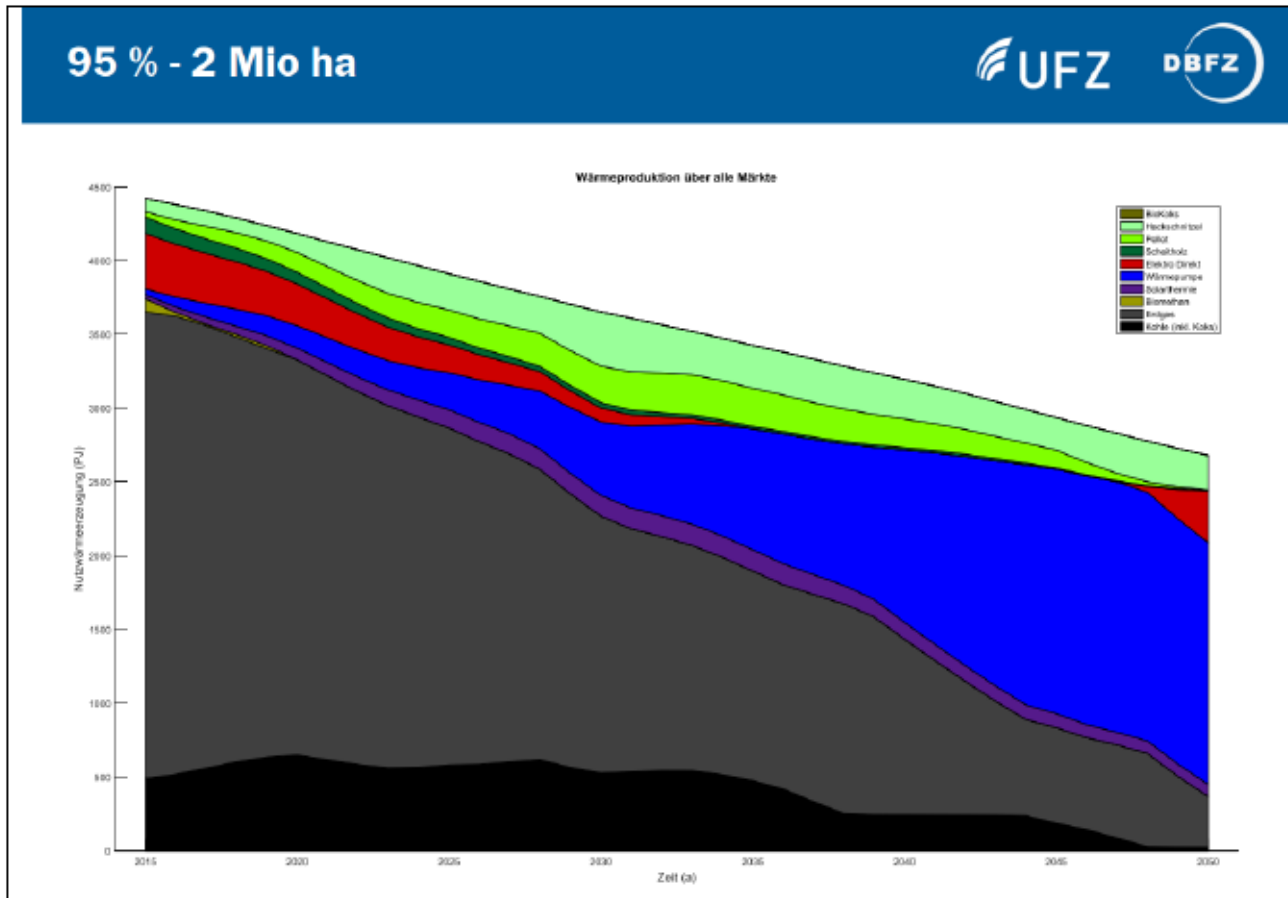
|              |                                                                                                                                     |    |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 23 | Direkte Landnutzungsänderungen der 4 Szenarien für die Kategorie<br>Waldschutz .....                                                | 47 |
| Abbildung 24 | Direkte Landnutzungsänderungen unter des Szenario 2 für die drei<br>Schutzausprägungen .....                                        | 48 |
| Abbildung 25 | CO <sub>2</sub> Emissionen infolge Landnutzungsänderungen der 4 Szenarien für die<br>Kategorie Waldschutz in tCO <sub>2</sub> ..... | 52 |
| Abbildung 26 | CO <sub>2</sub> Emissionen infolge Landnutzungsänderungen der 4 Szenarien für die<br>Kategorie Waldschutz in tCO <sub>2</sub> ..... | 53 |



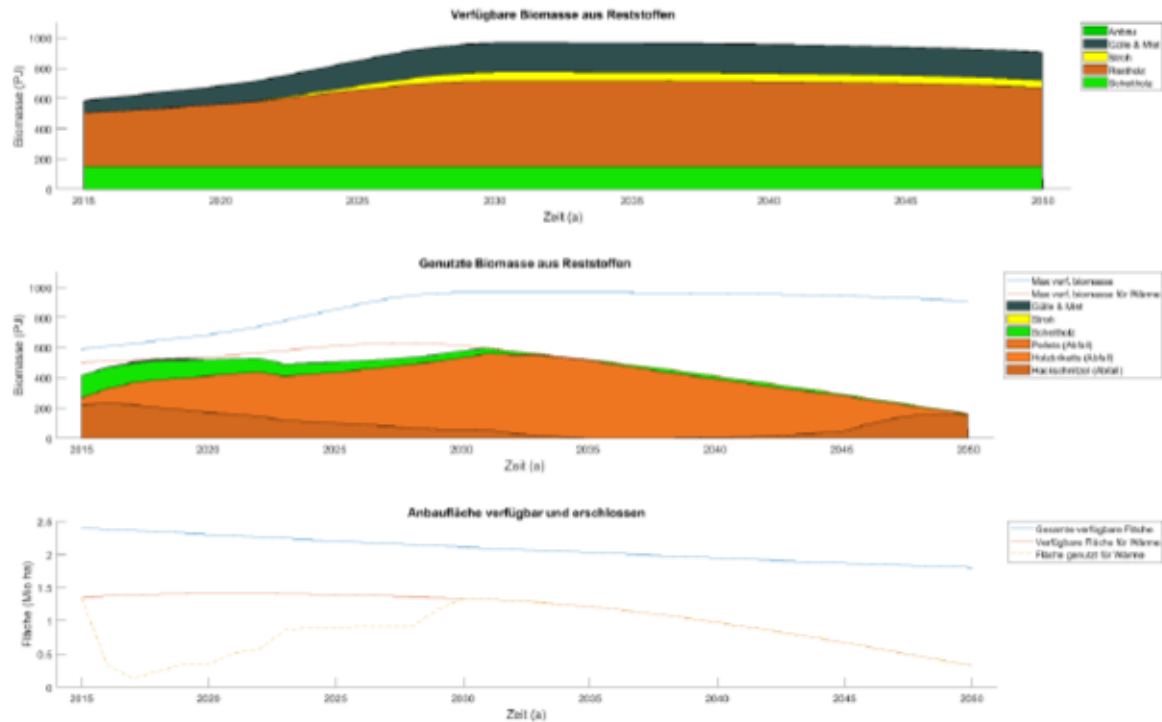
## Tabellenverzeichnis

|            |                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1  | Zieldatensatz des Energiekonzepts 2010 und EEG 2017 .....                                                                                                                                                          | 17 |
| Tabelle 2  | Erreichung der Ziele im Projekt Bioplan W .....                                                                                                                                                                    | 20 |
| Tabelle 3  | Angenommene Entwicklung der Bevölkerung bis 2050 (Pfluger et al. 2017b) .....                                                                                                                                      | 21 |
| Tabelle 4  | Referenzpreisentwicklung fossiler Energieträger in den Szenarien (Repenning et al. 2015): .....                                                                                                                    | 29 |
| Tabelle 5  | Zusammenfassung der Biomassekategorien und Preisentwicklungen in den Szenarien. In den Szenarien mit Anbaufläche steigt der Preis des Referenzrohstoffs um 3 %/a, in den Szenarien ohne Anbaufläche um 5 %/a ..... | 34 |
| Tabelle 6  | Zeitliche Entwicklung des erschlossenen Potenzials bis zum Jahr 2050 (80% Szenario) .....                                                                                                                          | 35 |
| Tabelle 7  | Zeitliche Entwicklung des erschlossenen Potenzials bis zum Jahr 2050 (95% Szenario) .....                                                                                                                          | 36 |
| Tabelle 8  | Zeitliche Entwicklung der stoffl. Nutzung in den Teilmärkten (80% Szenario) .....                                                                                                                                  | 36 |
| Tabelle 9  | Zeitliche Entwicklung der stoffl. Nutzung in den Teilmärkten (95% Szenario) .....                                                                                                                                  | 36 |
| Tabelle 10 | Wärmebedarf in der Industrie in Deutschland (Kemmler et al. 2017) .....                                                                                                                                            | 38 |
| Tabelle 11 | Annahmen für die Berechnung der THG-Emissionen aus direkter Landnutzungsänderung .....                                                                                                                             | 50 |

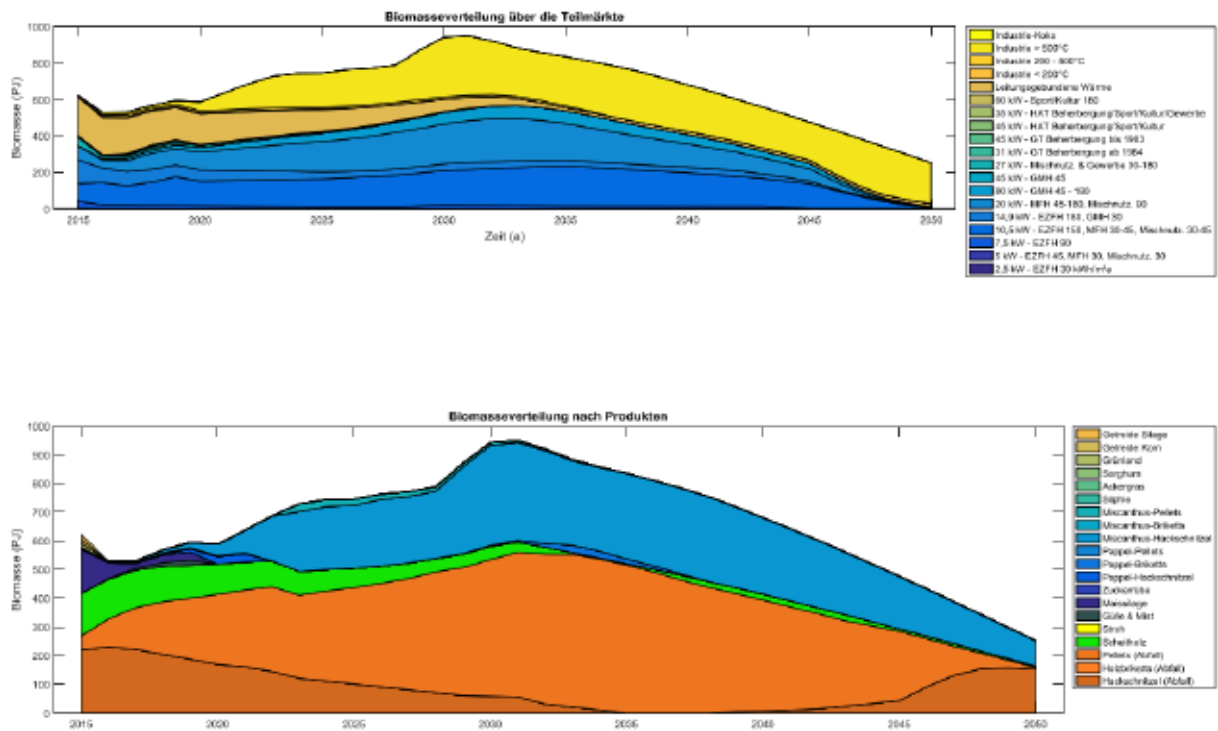
A 1 Anhang



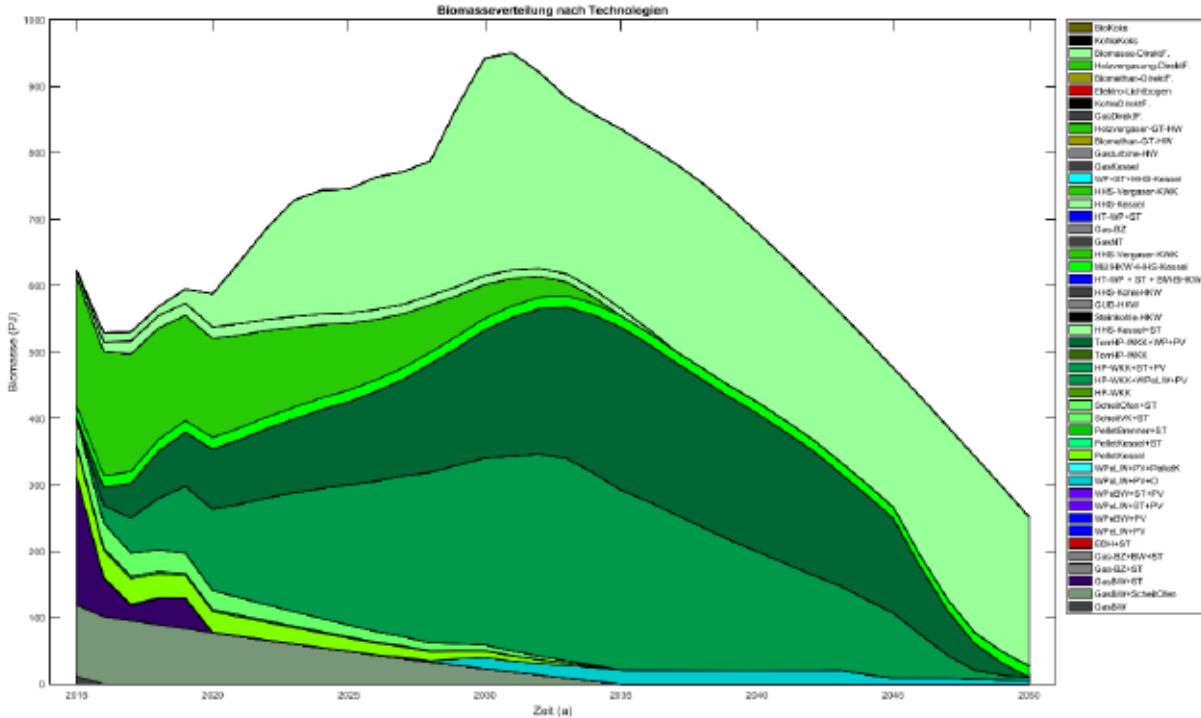
95 % - 2 Mio ha



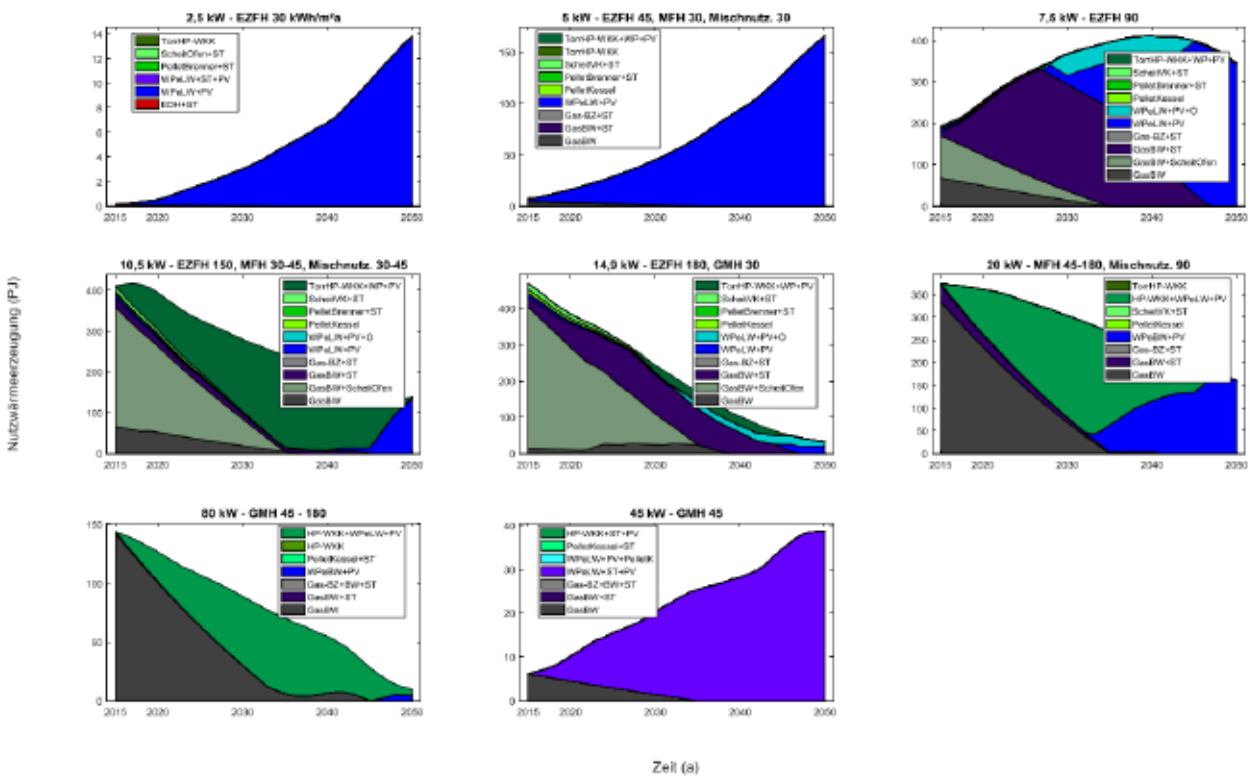
95 % - 2 Mio ha



95 % - 2 Mio ha

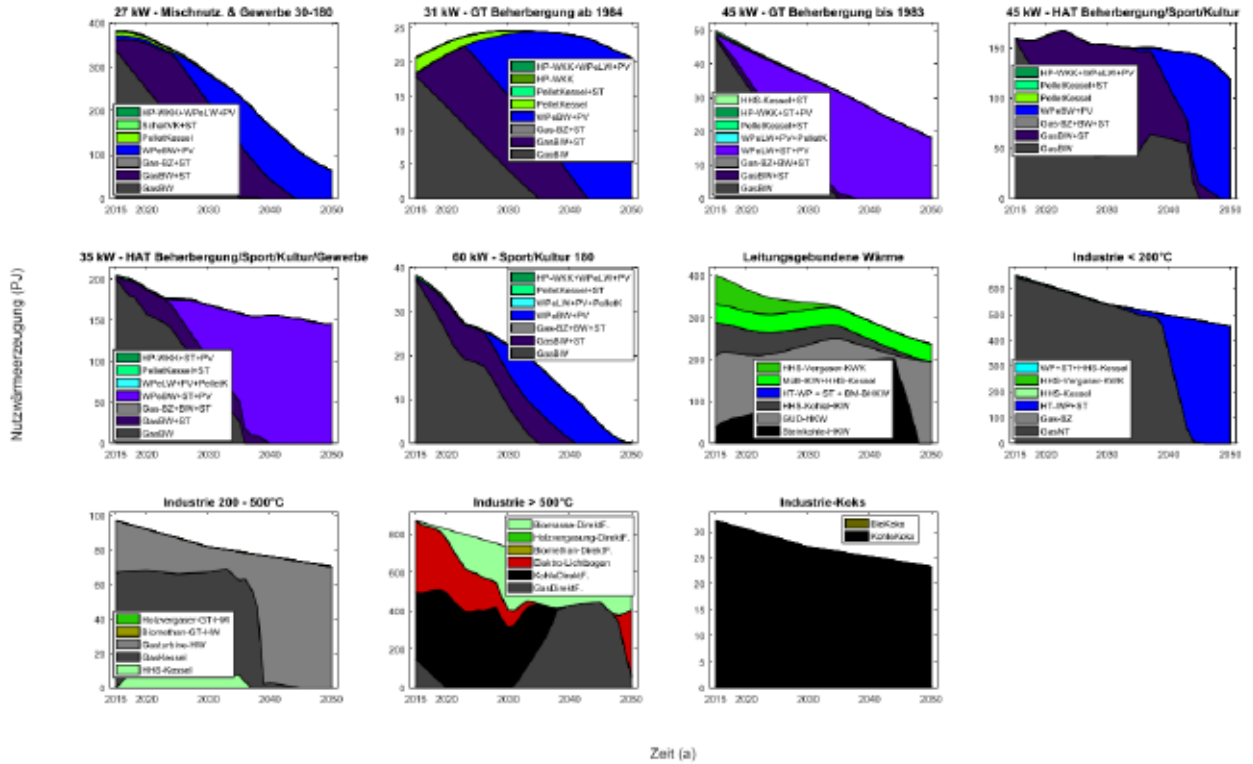


95 % - 2 Mio ha – Private Haushalte

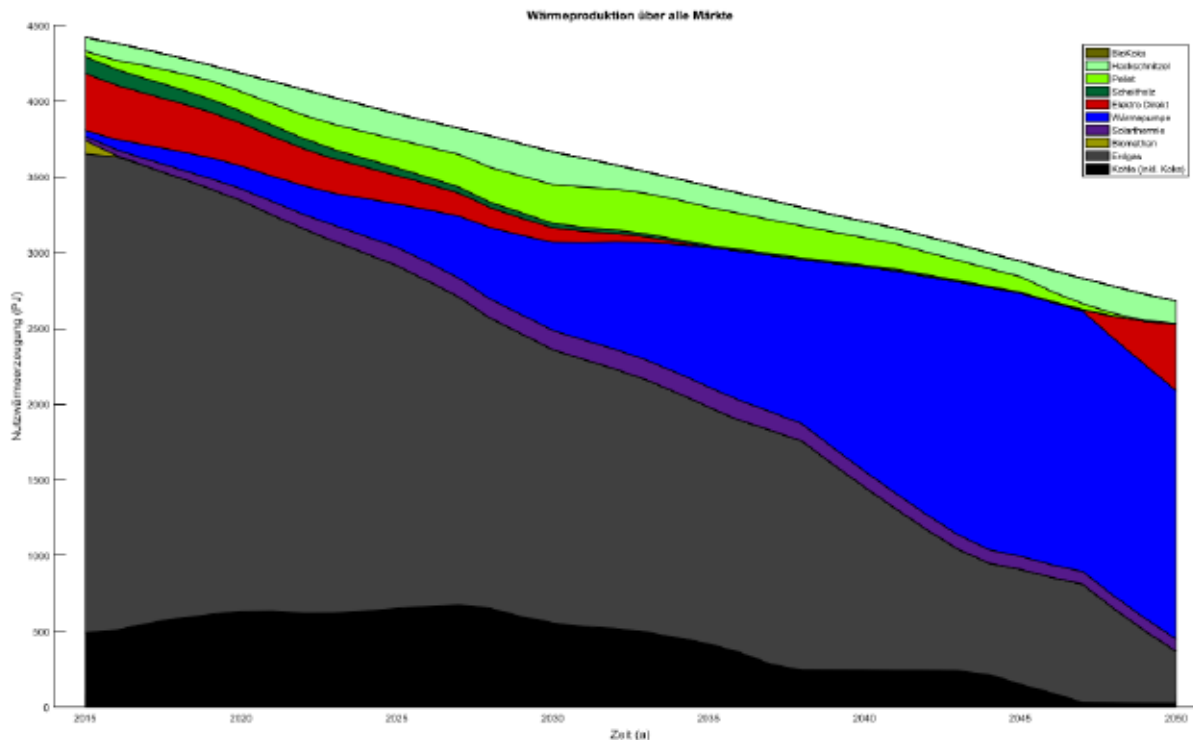




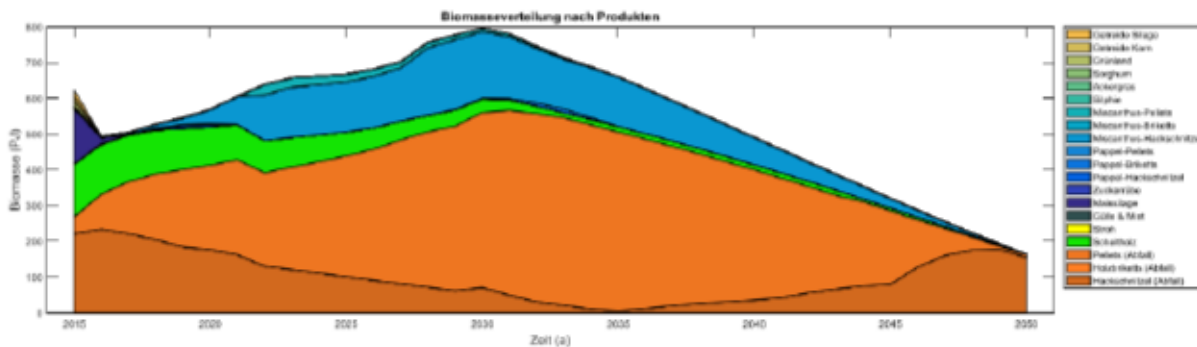
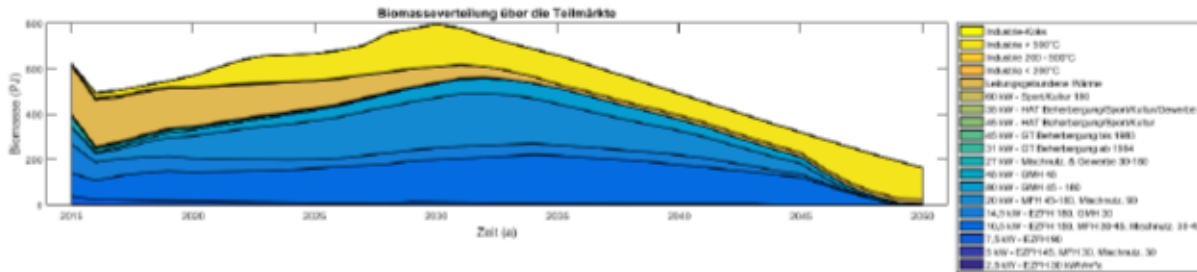
# 95 % - 2 Mio ha – GHD /Industrie



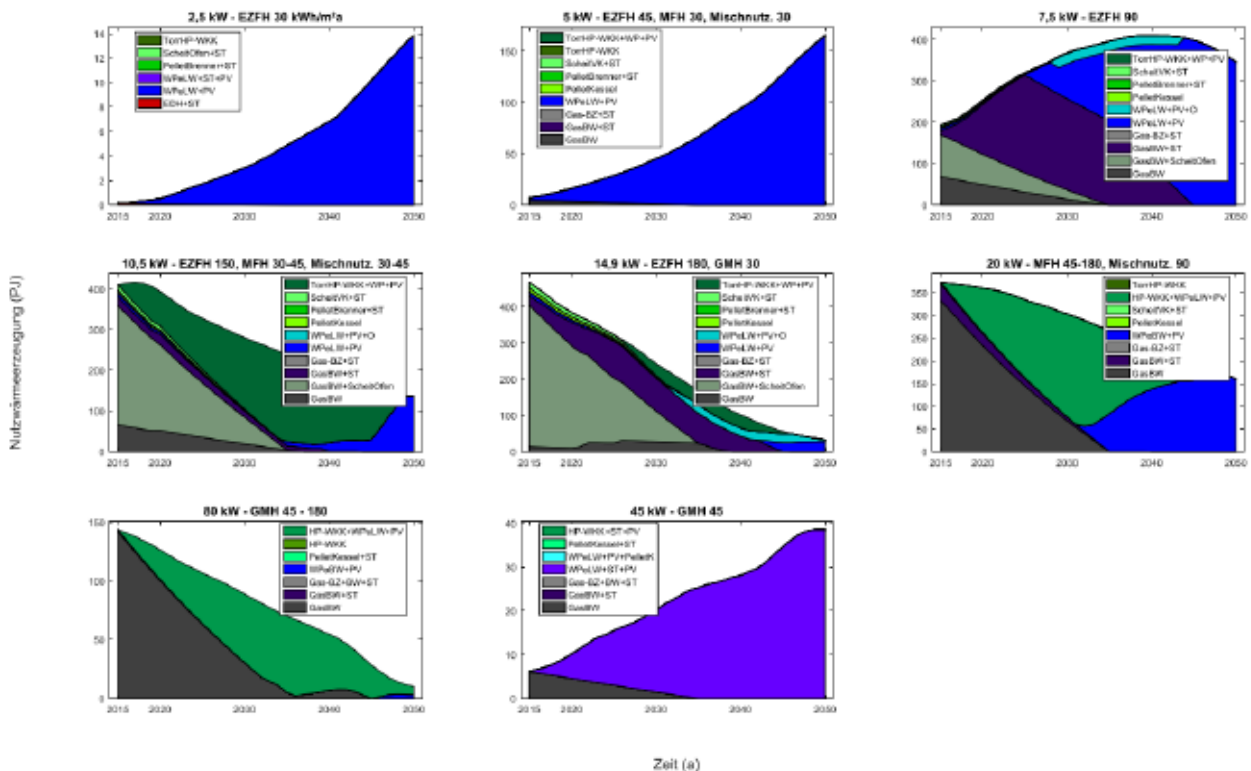
# 95 % - 0 ha



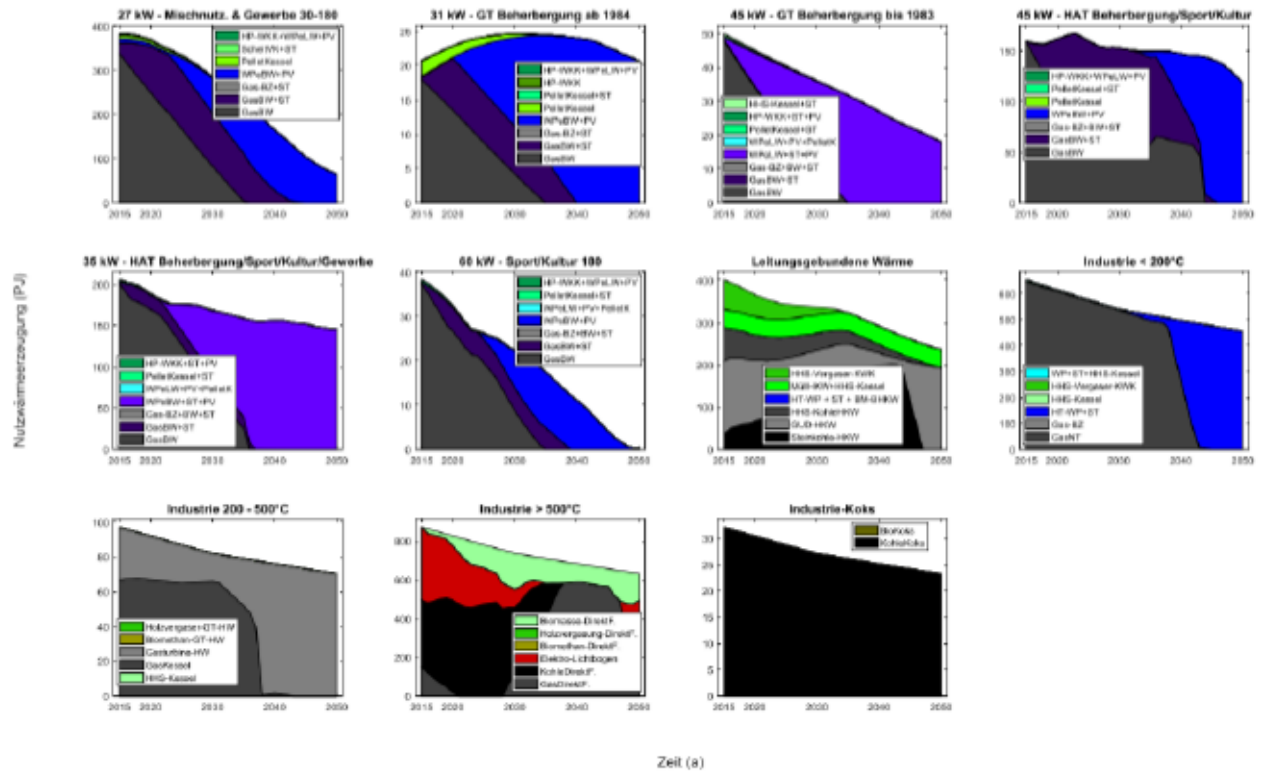
# 95 % - 0 ha



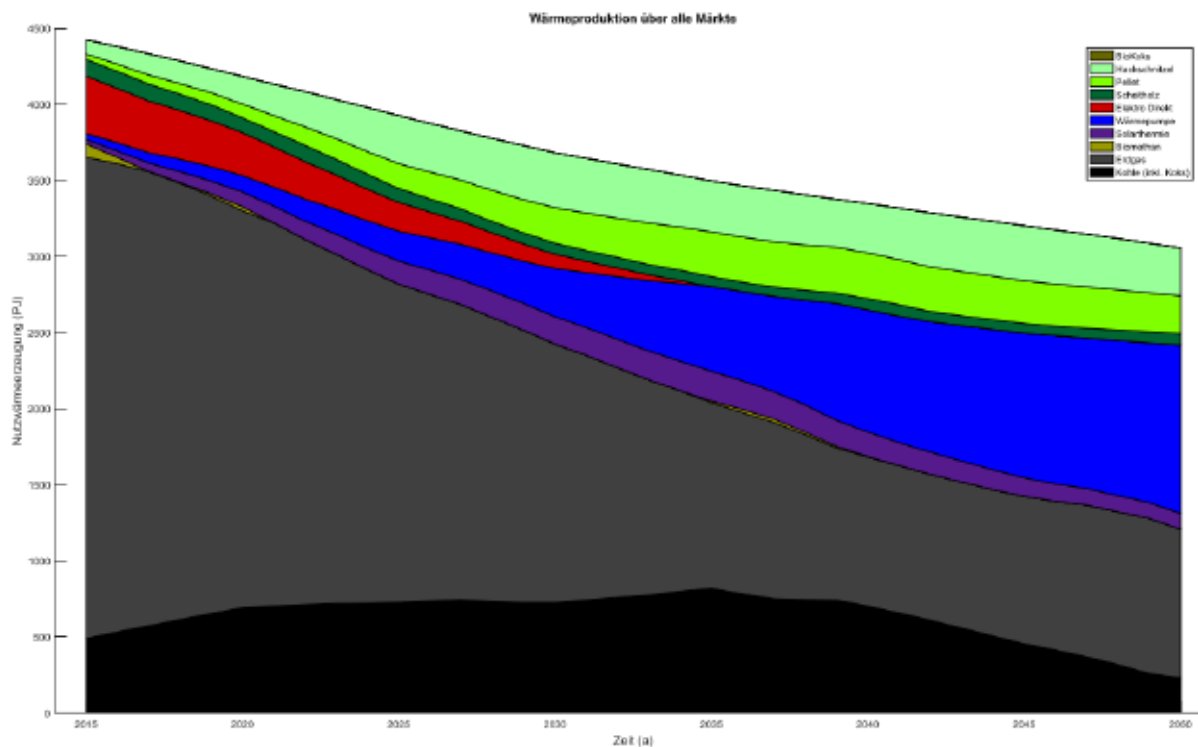
# 95 % - 0 ha – Private Haushalte



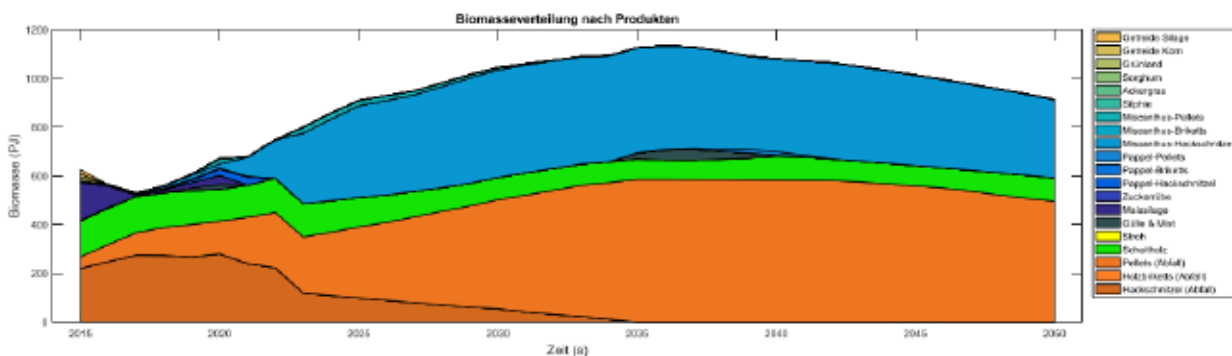
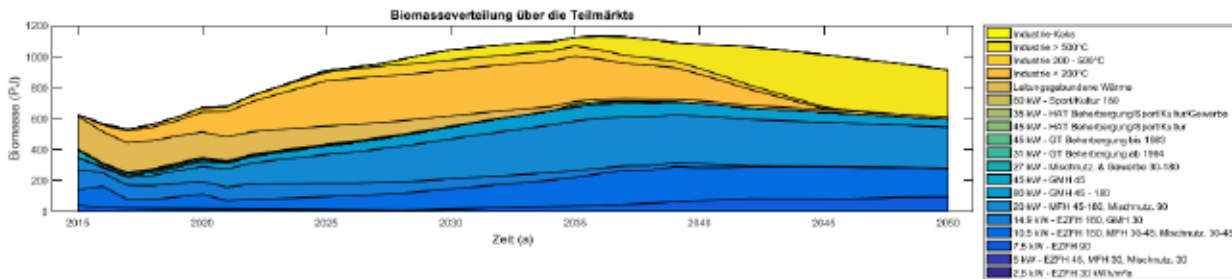
# 95 % - 0 ha - GHD / Industrie



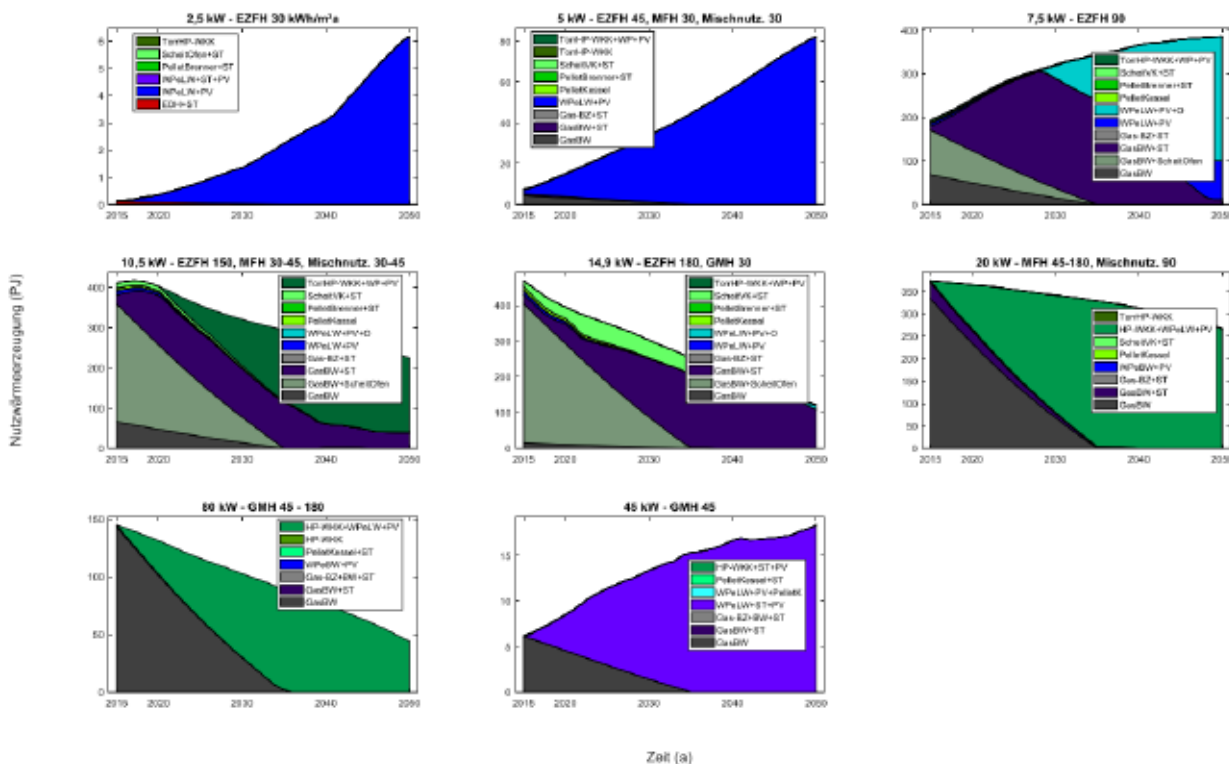
# 80 % - 2 Mio ha



# 80 % - 2 Mio ha

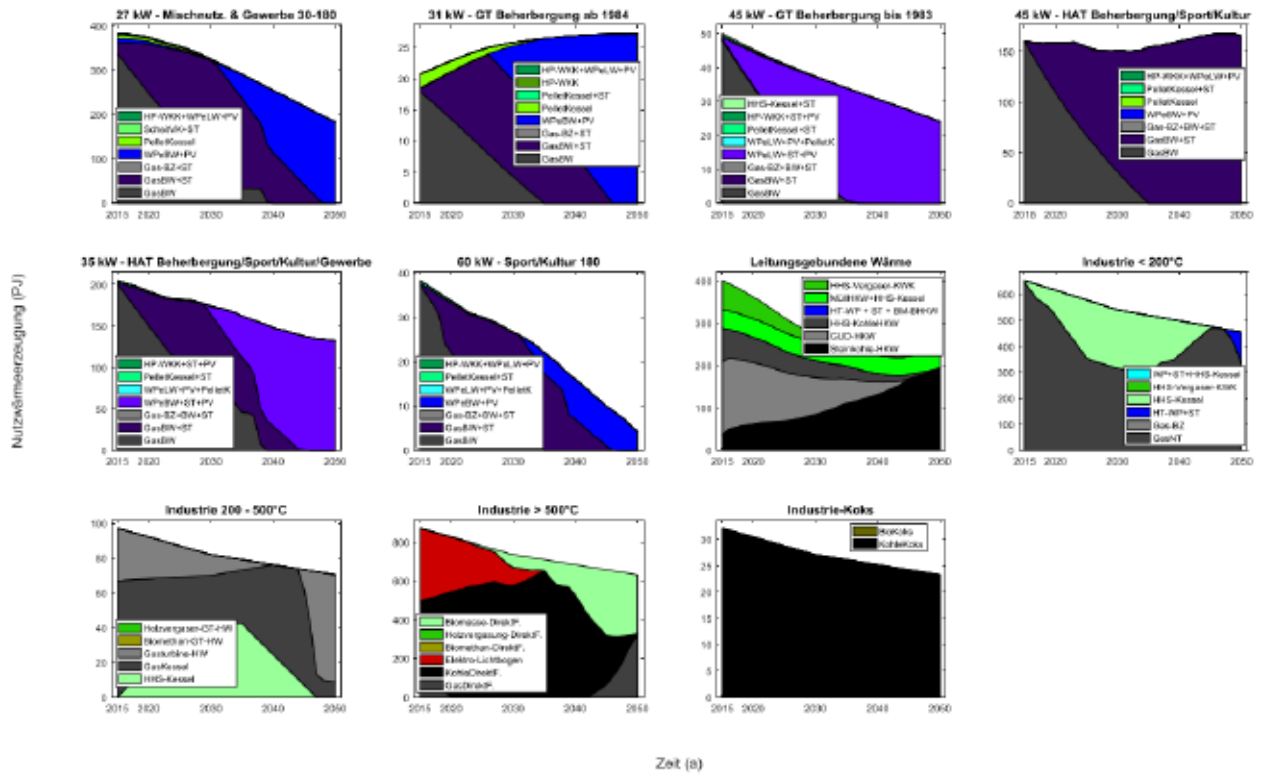


# 80 % - 2 Mio ha – Private Haushalte

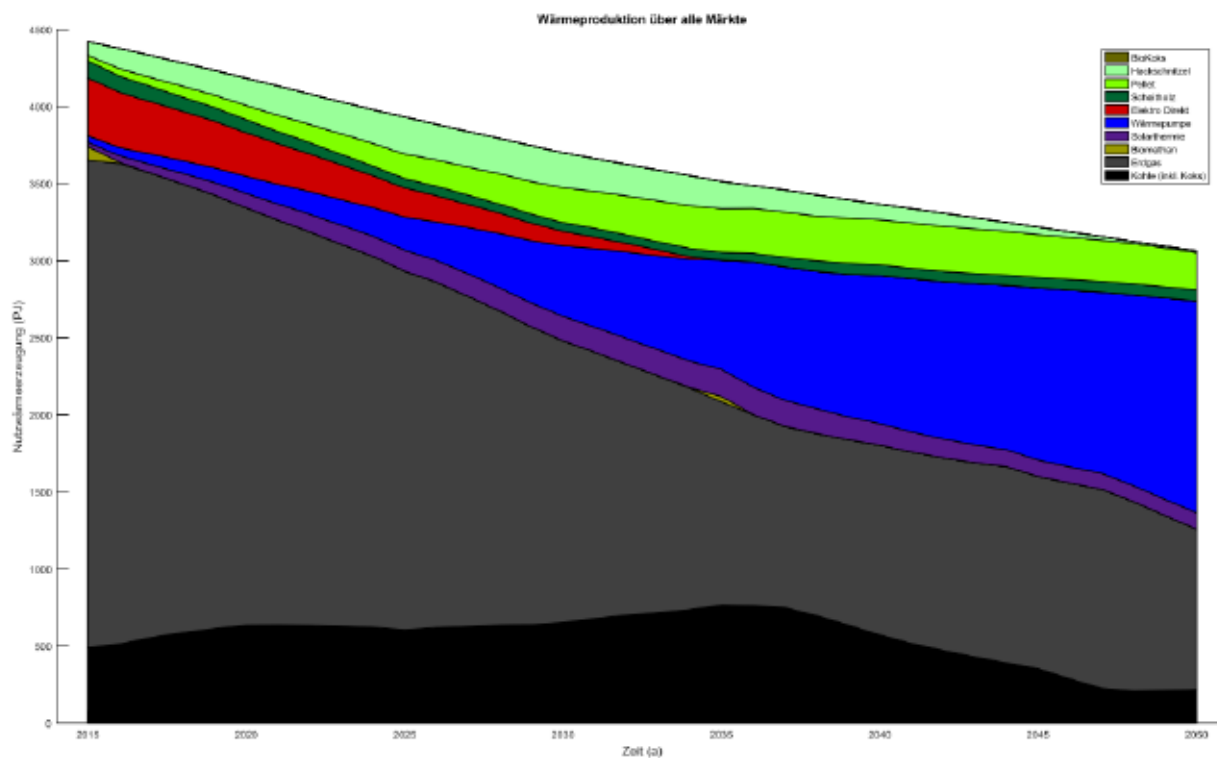




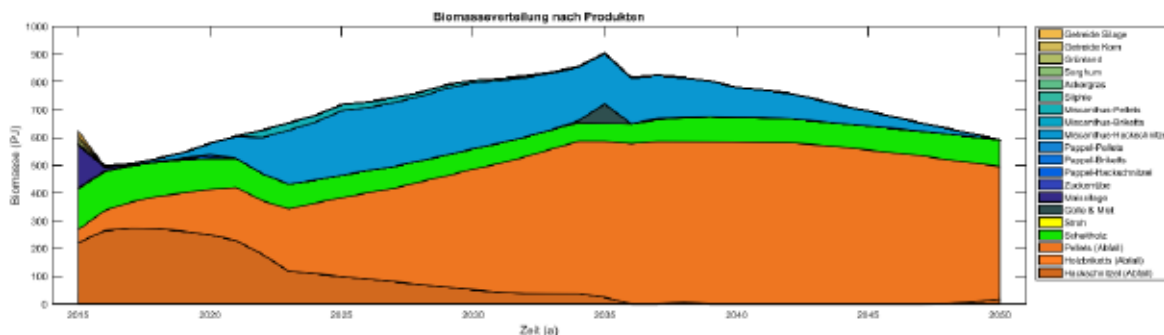
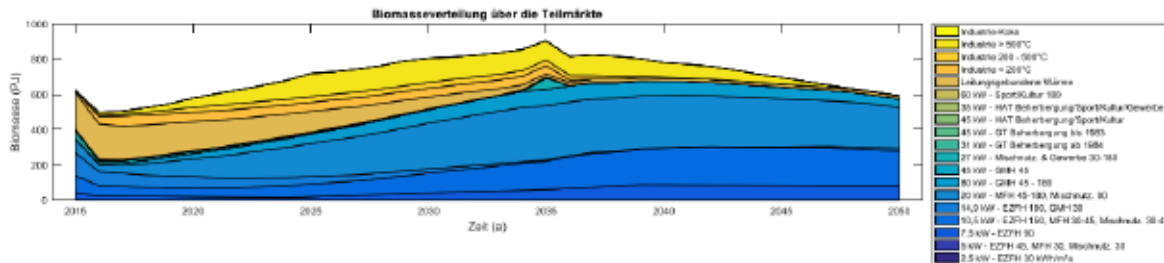
# 80 % - 2 Mio ha – GHD /Industrie



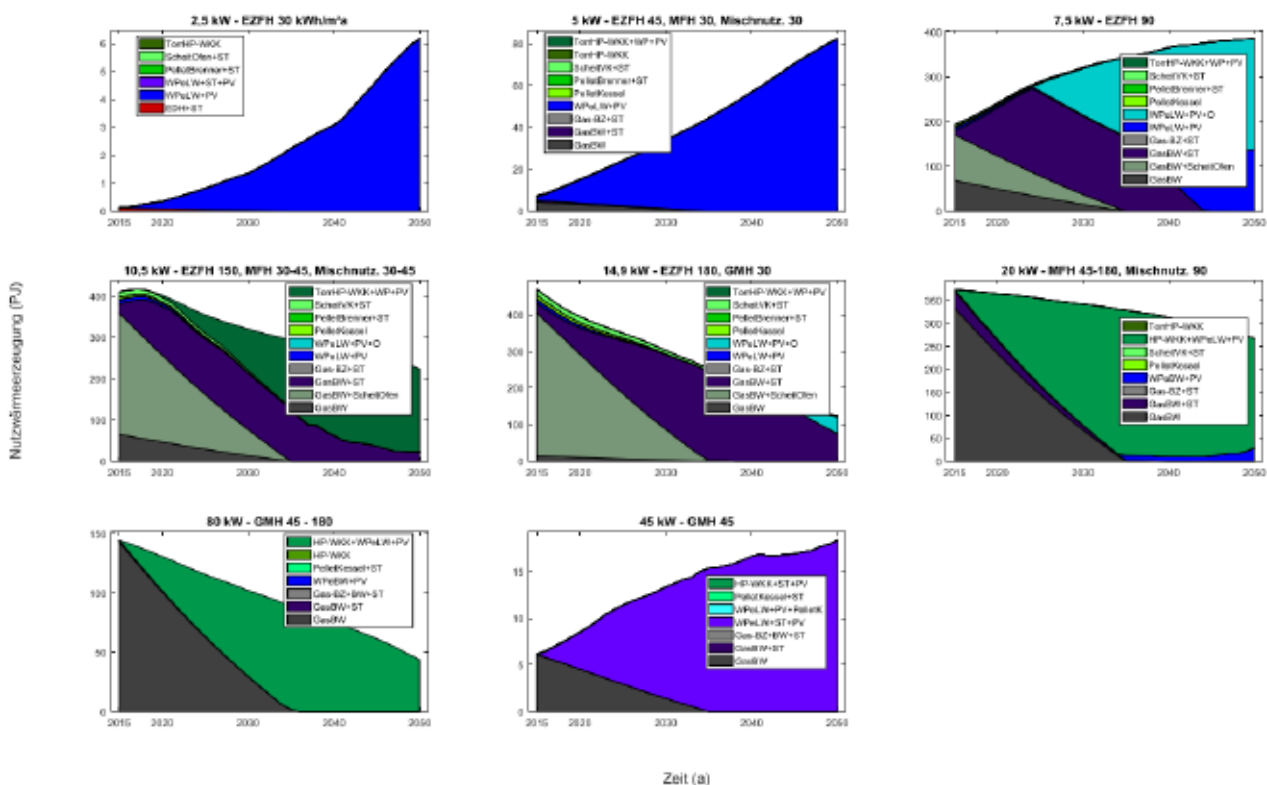
# 80 % - 0 ha



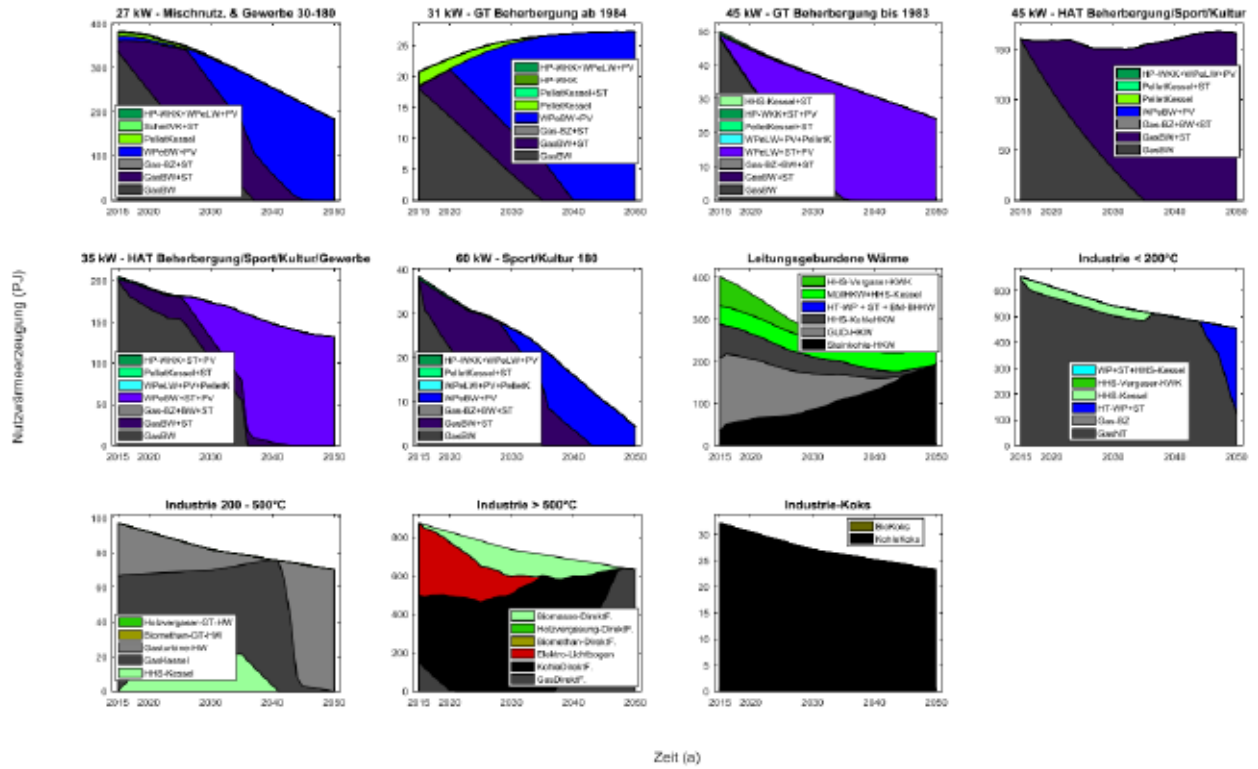
# 80 % - 0 ha



# 80 % - 0 ha – Private Haushalte



# 80 % - 0 ha - GHD / Industrie



## 4 Literaturverzeichnis

Aust, C. (2012): Abschätzung der nationalen und regionalen Biomassepotentiale von Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland. Dissertation. Universität Freiburg. Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaften. Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:25-opus-86309>.

Bigalke, U.; Armbruster, A.; Lukas, F.; Krieger, O.; Schuch, C.; Kunde, J. (2016): dena-Gebäudereport. Statistik und Analyse zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/8162\\_dena-Gebaeudereport.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaeudereport.pdf).

BioGrace (2014): Biograce GHG calculation tool 4d.

Brosowski, André; Adler, Philipp; Erdmann, Georgia; Thrän, Daniela; Mantau, Udo; Blanke, Christian (2015): Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen - Status quo in Deutschland. Schlussbericht zum Vorhaben : Laufzeit: 01.10.2014 bis 31.03.2015. Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Online verfügbar unter <https://edocs.tib.eu/files/e01fb16/855625422.pdf>.

Bundesanzeiger (15.04.2011): Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. In: *Bundesgesetzblatt*. Online verfügbar unter [http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBI&jumpTo=bgbl111s0619.pdf](http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl111s0619.pdf), zuletzt geprüft am 25.09.2017.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hg.) (2014): Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme - Innenentwicklungspotenziale. Innenentwicklungspotenziale in Deutschland – Ergebnisse einer bundesweiten Umfrage und Möglichkeiten einer automatisierten Abschätzung. Unter Mitarbeit von F. Dosch und G. Beckmann. Online verfügbar unter [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ReFo/Staedtebau/2011/UmsetzungInnenentwicklungspotenziale/01\\_Start.html?docId=438506&notFirst=true](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ReFo/Staedtebau/2011/UmsetzungInnenentwicklungspotenziale/01_Start.html?docId=438506&notFirst=true), zuletzt geprüft am 31.01.2019.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hg.) (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016): Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende - Berichtsjahr 2015. Kurzfassung. Online verfügbar unter [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=15](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=15), zuletzt geprüft am 07.09.2017.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.) (2019): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahre 2018. Unter Mitarbeit von Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg und Umweltbundesamt. Berlin. Online verfügbar unter



[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=8).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin. Online verfügbar unter [http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=3).

Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt (Hg.): Monitoringbericht 2016. Online verfügbar unter [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht2016.pdf?__blob=publicationFile&v=2), zuletzt geprüft am 09.08.2017.

Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt (Hg.) (2018): Bericht. Monitoringbericht 2018. Bonn. Online verfügbar unter [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht2018.pdf?__blob=publicationFile&v=6).

Bundesregierung (Hg.) (2016): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Neuauflage 2016. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/318676/3d30c6c2875a9a08d364620ab7916af6/2017-01-11-nachhaltigkeitsstrategie-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 31.01.2019.

Büttner, G.; Soukup, T.; Kosztra, B. (2014): CLC2012 Addendum to CLC2006 Technical Guidelines. Online verfügbar unter <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>.

Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (2018): Preisindizes. Holzbrennstoffe: Holzackschnitzel; Hackschnitzel aus KUP; Holzbriketts; Holzpellets. Online verfügbar unter [www.carmen-ev.de/infotohek/preisindizes](http://www.carmen-ev.de/infotohek/preisindizes), zuletzt geprüft am 02.03.2020.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (06.02.2017): dena-Gebäudereport. Sanierungsrate ist weiterhin viel zu gering. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.dena.de/de/newsroom/meldungen/2017/dena-gebaeudereport-sanierungsrate-weiterhin-viel-zu-gering/>, zuletzt geprüft am 25.09.2017.

Deutscher Bundestag (16.11.2001): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. EnEV. In: *Bundesgesetzblatt* 2001 (59), S. 3085–3102. Online verfügbar unter [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//%5B@attr\\_id=%27bgbl101s3085.pdf%27%5D#\\_\\_bgbl\\_\\_%2F%2F%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl101s3085.pdf%27%5D\\_\\_1487859360087](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//%5B@attr_id=%27bgbl101s3085.pdf%27%5D#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl101s3085.pdf%27%5D__1487859360087).

Deutscher Bundestag (07.08.2008): Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich. EEWärmeG, vom 20.10.2015. Online verfügbar unter [http://www.gesetze-im-internet.de/eew\\_rmeg/index.html](http://www.gesetze-im-internet.de/eew_rmeg/index.html).

Eggleston, S.; Buendia, L.; Miwo, K.; Ngara, T.; Tanabe, K. (2006): IPCC, 2006: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and other land use.

European Commission (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.

European Commission (2010a): Beschluss der Kommission über Leitlinien für die Berechnung des Kohlenstoffbestands im Boden für die Zwecke des Anhangs V der Richtlinie 2009/28/EG. (2010/335/EU).

European Commission (2010b): EU energy trends to 2030. Update 2009. Luxembourg: EUR-OP.

European Commission (2011a): Impact Assessment Accompanying the document Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Energy Roadmap 2050. Commission Staff Working Paper - Part 2/2. Brussels. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/sec\\_2011\\_1565\\_part2.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/sec_2011_1565_part2.pdf), zuletzt geprüft am 04.05.2017.

European Commission (2011b): Impact Assessment Accompanying the document Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Energy Roadmap 2050. Commission Staff Working Paper - Part 1/2. Brussels. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/sec\\_2011\\_1565\\_part1.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/sec_2011_1565_part1.pdf), zuletzt geprüft am 04.05.2017.

ewi Energy Research & Scenarios gGmbH (Hg.) (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Teil B - Gutachterbericht. Unter Mitarbeit von H. Hecking, J. Kruse, O. Hennes und T. et al. Wildgrube. Köln. Online verfügbar unter [https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads\\_Dateien/esd/9261\\_dena-Leitstudie\\_Integrierte\\_Energiewende\\_lang.pdf](https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf), zuletzt geprüft am 16.04.2019.

Helmholtz Zentrum für Umweltforschung GmbH (Hg.): BENSIM/BENOPT. Online verfügbar unter <https://www.ufz.de/index.php?de=37180>, zuletzt geprüft am 19.02.2020.

Herrmann, Hauke; Matthes, Felix Chr. (2012): Strengthening the European Union emissions trading scheme and raising climate ambition. Facts, Measures and Implications. Unter Mitarbeit von Felix Chr. Matthes. Hg. v. Öko-Institut. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/1484/2012-056-en.pdf>, zuletzt geprüft am 03.05.2017.

Humpenöder, F.; Schaldach, R.; Shayeghi, Y.; Schebek, L. (2013): Effects of land-use change on the carbon balance of 1st generation biofuels: An analysis for the European Union combining spatial modeling and LCA. In: *Biomass and Bioenergy* 56, S. 166–178. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.05.003.

Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme gGmbH (Hg.): BEniVer - Begleitforschung Energiewende im Verkehr. FKZ 03EIV116B. Online verfügbar unter <http://www.izes.de/de/projekte/beniver-begleitforschung-energiewende-im-verkehr>, zuletzt geprüft am 19.02.2020.

International Energy Agency (2013): World energy outlook 2013. Paris: IEA. Online verfügbar unter <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WE02013.pdf>.

International Gas Union (Hg.) (2016): 2016 World LNG Report. LNG 18 Conference & Exhibition Edition. Fornebu, Norway, zuletzt geprüft am 27.04.17.

Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (Hg.): Szenarien einer Bioökonomie 2050 - Potenziale, Zielkonflikte, Lösungsstrategien. Online verfügbar unter <https://www.thuenen.de/de/institutsuebergreifende-projekte/szenarien-einer-biooekonomie-2050-potenziale-zielkonflikte-loesungsstrategien/>, zuletzt geprüft am 19.02.2020.

Jordan, M.; Lenz, V.; Millinger, M.; Oehmichen, K.; Thrän, D. (2019): Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach. Art. 116194. In: *Energy* Volume 189, 2019.

Jordan, M.; Millinger, M.; Thrän, D. (2020): Robust bioenergy technologies for the German heat transition: A novel approach combining optimization modeling with Sobol' sensitivity analysis. In: *Applied Energy* 262. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114534.

Kemmler, Andreas; Straßburg, Samuel; Seefeldt, Friedrich; Anders, Natalia; Rohde, Clemens; Fleiter, Tobias et al. (2017): Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014. Endbericht. Umweltbundesamt (Climate Change, 01/2017). Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/datenbasis-zur-bewertung-von-1>, zuletzt geprüft am 11.08.2017.

Koch, M.; Hennenberg, K.; Haller, M.; Hesse, T. (2018): Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes. Online verfügbar unter [https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB114\\_Bericht\\_Bio-Strom-W%C3%A4rme.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB114_Bericht_Bio-Strom-W%C3%A4rme.pdf).

Lenz, V.; Jordan, M. (2019): Technical and economic data of renewable heat supply systems for different heat sub-sectors (DOI: 10.17632/v2c93n28rj.1). Online verfügbar unter <https://data.mendeley.com/datasets/v2c93n28rj/1>.

Matthes, Felix Chr. (2010): Energiepreise für aktuelle Modellierungsarbeiten. Regressionsanalytisch basierte Projektionen. Teil 1: Preise für Importenergien und Kraftwerksbrennstoffe. Öko-Institut e.V. Berlin.

Millinger, M. (2018): Systems assessment of biofuels: modelling of future cost and greenhouse gas abatement competitiveness between biofuels for transport on the case of Germany. Hg. v. Helmholtz Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ. Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät.

Millinger, M.; Meisel, K.; Budzinski, M.; Thrän, D. (2018): Relative greenhouse gas abatement cost competitiveness of biofuels in Germany. Art. 615. In: *Energies* (11(3)).



Millinger, M.; Meisel, K.; Thrän, D. (2019): Greenhouse gas abatement optimal deployment of biofuels from crops in Germany. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 69, S. 265–275.

Millinger, M.; Ponitka, J.; Arendt, O.; Thrän, D. (2017a): Competitiveness of advanced and conventional biofuels: Results from least-cost modelling of biofuel competition in Germany. In: *Energy Policy* 107, S. 394–402.

Millinger, M.; Tafarte, P.; Dotzauer,.; Oehmichen, K.; Kanngießer, A. et al. (2017b): BalanceE - Synergien, Wechselwirkungen und Konkurrenzen beim Ausgleich fluktuierender erneuerbarer Energien im Stromsektor und erneuerbare Optionen. Endbericht zu FKZ 0325705A, FKZ 0325705B und FKZ 0325705C. Hg. v. Helmholtz Zentrum für Umweltforschung, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH und Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT. Online verfügbar unter [https://www.ufz.de/export/data/2/226642\\_TIBKAT\\_1018603093.pdf](https://www.ufz.de/export/data/2/226642_TIBKAT_1018603093.pdf), zuletzt geprüft am 19.02.2020.

Millinger, M.; Thrän, D. (2016): Biomass price developments inhibit biofuel investments and research in Germany. The crucial future role of high yields. In: *Journal of Cleaner Production*, S. 1654–1663. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.175.

Nitsch, J.; Pregger, T.; Scholz, Y.; Naegler, T.; Sterner, M.; Gerhardt, N. et al. (2010): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - "Leitstudie 2010". BMU - FKZ 03MAP146. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik und Ingenieurbüro für neue Energien. Online verfügbar unter <http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/leitstudie2010.pdf>.

Nitsch, Joachim; Pregger, Thomas; Naegler, Tobias; Heide, Dominik; de Tena, Diego Luca; Trieb, Franz et al. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht BMU - FKZ 03MAP146. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik und Ingenieurbüro für neue Energien. Online verfügbar unter [http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal\\_2012\\_1/leitstudie2011\\_bf.pdf](http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf).

Offermann, F.; Banse, M.; Freund, F.; Haß, M.; Kreins, P.; Laquai, V. (2018): Thünen-Baseline 2017 – 2027: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen Report 56). Online verfügbar unter [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn059667.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn059667.pdf).

Öko-Institut e.V. (Hg.) (2018): Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes. Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (FKZ 03KB114). Unter Mitarbeit von M. Koch, K. Hennenberg, K. Hünecke, M. Haller und T. Hesse. Freiburg, Darmstadt. Online verfügbar unter [https://www.energetische-biomassennutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB114\\_Bericht\\_Bio-Strom-W%C3%A4rme.pdf](https://www.energetische-biomassennutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB114_Bericht_Bio-Strom-W%C3%A4rme.pdf), zuletzt geprüft am 12.04.2019.



- Öko-Institut e.V.; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Hg.) (2015): Klimaschutzscenario 2050 - 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. 2. Endbericht. Unter Mitarbeit von J. Repenning, L. Emele, R. Blanck, H. Böttcher, G. Dehoust und H. et al. Förster. Berlin, Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>, zuletzt geprüft am 28.05.2019.
- Pfluger, B.; Tersteegen, B.; Franke, B. (2017a): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung; Consentec GmbH; Institut für Energie- und Umweltforschung. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/langfrist-und-klimaszenarien.html>.
- Pfluger, B.; Tersteegen, B.; Franke, B. (2017b): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 1: Hintergrund, Szenarioarchitektur und übergeordnete Rahmenparameter. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-1-hintergrund-szenarioarchitektur-und-uebergeordnete-rahmenparameter.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-1-hintergrund-szenarioarchitektur-und-uebergeordnete-rahmenparameter.pdf?__blob=publicationFile&v=4).
- Prognos AG; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforshung mbH (Hg.) (2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Projekt Nr. 12/10. Unter Mitarbeit von M. Schlesinger, P. Hofer, A. Kemmler, A. Kirchner, S. Strassburg, D. Lindenberger et al. Basel/Köln/Osnabrück. Online verfügbar unter [https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2015/12/EWI\\_2010-08-30\\_Energieszenarien-Studie.pdf](https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2015/12/EWI_2010-08-30_Energieszenarien-Studie.pdf).
- Repenning, J.; Emele, L.; Hermann, H.; Jörß, W.; Blanck, R.; Loreck, C. (2015): Klimaschutzscenario 2050 – 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/2441/2015-598-de.pdf>.
- Repenning, J.; Matthes, F. C.; Blanck, R.; Emele, L.; Eichhammer, W.; Braungardt, S. et al. (2014): Klimaschutzscenario 2050. 1. Modellierungsrunde. Öko-Institut/Fraunhofer ISI.
- Schalldach, 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.
- Schalldach, R.; Meurer, K.H.E.; Jungkunst, H. F.; Nendel, C.; Lakes, T.; Gollnow, F. et al. (2018): A model-based assessment of the environmental impact of land-use change across scales in Southern Amazonia. In: *Regional Environmental Change* 18(1), S. 161–173.
- Schalldach, R.; Wimmer, F.; Koch, J.; Geisler, K.; Köchy, M. (2013): Model-based analysis of the environmental impacts of grazing management in Eastern Mediterranean ecosystems in Jordan. In: *Journal of Environmental Management* 127, S. 84–95.
- Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Lutz, Christian; Hofer, Peter; Kemmler, Andreas; Kirchner, Almut et al. (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Projekt Nr. 57/12 Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Endbericht. Prognos AG; EWI; GWS. Basel/Köln/Osnabrück. Online verfügbar unter

[https://www.prognos.com/uploads/tx\\_atwpubdb/140716\\_Langfassung\\_583\\_Seiten\\_Energierferenzprognose\\_2014.pdf](https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/140716_Langfassung_583_Seiten_Energierferenzprognose_2014.pdf).

Schütte, A. (2011): Forschungsförderung zu Agrarholzproduktion. Vortrag beim 2. Forum Agroforstsysteme im Rahmen „100 Jahre Forschungsstandort Dornburg“ am 20/21. Juni 2011 in Dornburg, 2011. Online verfügbar unter <http://www.tll.de/ainfo/html/afs.htm>, zuletzt geprüft am 21.09.2011.

Statistisches Bundesamt (15.01.2013): Bruttoinlandsprodukt 2012 für Deutschland. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 15. Januar 2013 in Wiesbaden. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2013/BIP2012/Pressebrochure\\_BIP2012.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2013/BIP2012/Pressebrochure_BIP2012.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 20.04.2017.

Thrän, D. (Hg.) (2015): Meilensteine 2030. Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie: Endbericht zu FKZ 03KB065, FKZ 03MAP230. Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (Energetische Biomassenutzung, Band 18).

Thrän, D.; Arendt, O.; Banse, M.; Braun, J.; Fritsche, U.; Gärtner, S. et al. (2017): Strategy elements for a sustainable bioenergy policy based on scenarios and systems modeling: Germany as example. In: *Chemical Engineering & Technology* (40 (2)), S. 211–226.

Thrän, D.; Lauer, M.; Dotzauer, M.; Kalcher, J.; Oehmichen, K.; Majer, S. et al. (2019): Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO) - Endbericht zu FZK 03MAP362. Hg. v. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH. Online verfügbar unter [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Studien/technoekonomische-analyse-und-transformationspfade-des-energetischen-biomassepotentials.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Studien/technoekonomische-analyse-und-transformationspfade-des-energetischen-biomassepotentials.pdf?__blob=publicationFile&v=4), zuletzt geprüft am 19.02.2020.

Thrän, D.; Schaldach, R.; Millinger, M.; Wolf, V.; Arendt, O.; Ponitka, J. et al. (2016): The MILESTONES modeling framework: An integrated analysis of national bioenergy strategies and their global environmental impacts. In: *Environmental Modelling & Software* 86, S. 14–29. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.09.005.

U.S. Energy Information Administration (2013): Annual Energy Outlook 2013. with Projections to 2040. Online verfügbar unter [https://www.eia.gov/outlooks/archive/aeo13/pdf/0383\(2013\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/archive/aeo13/pdf/0383(2013).pdf).

Umweltbundesamt (2012): Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen 2008 (Auswertung für das Jahr 2008). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4267.pdf>, zuletzt geprüft am 21.06.2017.

Umweltbundesamt (2017a): Erneuerbare Energien in Deutschland Daten zur Entwicklung im Jahr 2016. Hintergrund // März 2017.

Umweltbundesamt (2017b): Flächenrecycling und Innenentwicklung. Brachflächenbestand. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten/flaechenrecycling-innenentwicklung#textpart-1>, zuletzt geprüft am 31.01.2019.

Umweltbundesamt (Hg.) (2018): Flächensparen - Böden und Landschaften erhalten. Ziele zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten#textpart-3>, zuletzt geprüft am 31.01.2019.

Umweltbundesamt (Hg.) (2019): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. 2. Auflage mit methodischen Anpassungen und Teilneuberechnung in Kapitel 2 und 3. Unter Mitarbeit von J. Günther, H. Lehmann, U. Lorenz, K. Purr, W. Butz und U. et al. Döring. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215\\_uba\\_fachbrosch\\_rtd\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rtd_bf.pdf), zuletzt geprüft am 17.04.2019.

United Nations Framework Convention on Climate Change (19.10.2016): Paris Agreement. In: *Official Journal of the European Union*. Online verfügbar unter [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)&from=DE](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019(01)&from=DE), zuletzt geprüft am 03.03.2017.

World Bank (Hg.) (2016): Global Economic Monitor (GEM) Commodities: Wheat, HRW. Online verfügbar unter [databank.worldbank.org](http://databank.worldbank.org).





## PUBLIKATIONEN

### Bisher veröffentlichte Reports:

- DBFZ Report Nr. 35** Leitfaden zur Substrat- und Effizienzbewertung an Biogasanlagen
- DBFZ Report Nr. 34** Entwicklung einer Methode zur Verwendung der Daten des Schornsteinfegerhandwerks für die energiewirtschaftliche Berichterstattung - Dissertationsschrift
- DBFZ Report No. 33** Recommendations for reliable methane emission rate quantification at biogas plants
- DBFZ Report Nr. 32** Wärmenutzung von Biogasanlagen
- DBFZ Report Nr. 31** Die Niedertemperatursynthese von Methan in Thermoöl-temperierten Plattenreaktoren - Dissertationsschrift -
- DBFZ Report Nr. 30** Anlagenbestand Biogas und Biomethan - Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland
- DBFZ Report Nr. 29** Effiziente Bioenergie für Regionen - Ergebnisse der technisch-ökonomischen Begleitforschung zur Fördermaßnahme Bioenergie-Regionen 2012-2015
- DBFZ Report Nr. 28** Potenziale zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Biogasanlagen - Energetische Effizienz von Repoweringmaßnahmen
- DBFZ Report Nr. 27** Neuartiger emissionsarmer Kaminofen (DBU-NEKO)
- DBFZ Report Nr. 26** Bewertung technischer und wirtschaftlicher Entwicklungspotenziale künftiger und bestehender Biomasse-zu-Methan-Konversionsprozesse - Dissertationsschrift
- DBFZ Report Nr. 25** Nachrüstlösung zum katalytischen Abbau von gasförmigen organischen Emissionen aus Kaminöfen
- DBFZ Report Nr. 24** Biomasse zur Wärmeerzeugung - Methoden zur Quantifizierung des Brennstoffeinsatzes
- DBFZ Report Nr. 23** Technisch-ökonomische Begleitforschung des Bundeswettbewerbes „Bioenergie-Regionen“
- DBFZ Report Nr. 22** Die Biokraftstoffproduktion in Deutschland - Stand der Technik und Optimierungsansätze
- DBFZ Report Nr. 21** Entwicklung der Förderung der Stromerzeugung aus Biomasse im Rahmen des EEG
- DBFZ Report Nr. 20** KlimaCH4 - Klimaeffekte von Biomethan
- DBFZ Report Nr. 19** Hy-NOW - Evaluierung der Verfahren und Technologien für die Bereitstellung von Wasserstoff auf Basis von Biomasse
- DBFZ Report Nr. 18** Kleintechnische Biomassevergasung - Option für eine nachhaltige und dezentrale Energieversorgung
- DBFZ Report Nr. 17** Grünlandenergie Havelland - Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland
- DBFZ Report Nr. 16** Algae biorefinery - material and energy use of algae
- DBFZ Report Nr. 15** Politics and Economics of Ethanol and Biodiesel Production and Consumption in Brazil
- DBFZ Report Nr. 14** Holzpelletbereitstellung für Kleinfeuerungsanlagen
- DBFZ Report Nr. 13** Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Energiebereitstellung
- DBFZ Report Nr. 12** Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse
- DBFZ Report Nr. 11** Monitoring Biokraftstoffsektor
- DBFZ Report Nr. 10** Ermittlung des Verbrauchs biogener

Festbrennstoffe im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD-Sektor) - Endbericht

- DBFZ Report Nr. 9** Analyse und Bewertung ausgewählter zukünftiger Biokraftstoffoptionen auf der Basis fester Biomasse
- DBFZ Report Nr. 8 - Kompakt** - Sammelband
- DBFZ Report Nr. 7** Final Report - Global and Regional Spatial Distribution of Biomass Potentials - Status quo and options for specification -
- DBFZ Report Nr. 6** Katalytisch unterstützte Minderung von Emissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen
- DBFZ Report Nr. 5** Optimierung und Bewertung von Anlagen zur Erzeugung von Methan, Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen
- DBFZ Report Nr. 4** Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der Biomassennutzung
- DBFZ Report Nr. 3** Feinstaubminderung im Betrieb von Scheitholz-kaminöfen unter Berücksichtigung der toxikologischen Relevanz
- DBFZ Report Nr. 2** Methodische Vorgehensweise zur Standortidentifikation und Planung der Biomassebereitstellung für Konversionsanlagen am Beispiel von Bio-SNG-Produktionsanlagen
- DBFZ Report Nr. 1** Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Holzfeuerungsanlagen

Weitere Informationen and Download:

[www.dbfz.de/pressemediathek/publikationsreihen-des-dbfz/dbfz-reports/](http://www.dbfz.de/pressemediathek/publikationsreihen-des-dbfz/dbfz-reports/)

**DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum  
gemeinnützige GmbH**

Torgauer Straße 116

04347 Leipzig

Phone: +49 (0)341 2434-112

Fax: +49 (0)341 2434-133

E-Mail: [info@dbfz.de](mailto:info@dbfz.de)

**[www.dbfz.de](http://www.dbfz.de)**