



**Konzeption für die:
(Neu-)Ausrichtung
der energetischen Verwertung von Biomasse und
der Bioenergie-Forschung in Baden-Württemberg**

verfasst von

Jochen Brellochs, Michael Specht

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Industriestr. 6, 70565 Stuttgart

In Kooperation mit

Hans Oechsner, Rafael Schüle

Universität Hohenheim: Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie (LAB)

Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart

Ludger Eltrop, Marlies Härdtlein, Martin Henßler

Universität Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)

Heißbrühlstraße 49a, 70569 Stuttgart

Im Auftrag des

Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg

Kernerplatz 10, 70182 Stuttgart

Mai 2013

Leitfrage / Kernthesen

Leitfrage

In dem vorliegenden Papier soll die Leitfrage beantwortet werden, warum und in welchen Verbrauchssektoren „Energie-Biomasse“ in einem zukünftigen Energiesystem benötigt wird.

Kernthesen

Das Ergebnis des vorliegenden Papiers sind nachfolgende Kernthesen, die in ihrer Konsequenz die Verwertungswege von „Energie-Biomasse“ in einem nachhaltigen Energiesystem neu definieren.

- Nicht die Entcarbonisierung der Energiewirtschaft ist das Ziel, sondern ein nachhaltiges, CO₂-neutrales Energiesystem.
- Bei der Transformation unseres Energiesystems kommt der Biomasse eine herausragende Bedeutung zu.
- Bisherige Ansätze bei der Nutzung von „Energie“-Biomasse gehen häufig in die falsche Richtung: Nicht eine hohe CO₂-Vermeidung pro eingesetzter Energieeinheit Biomasse ist entscheidend, sondern ein optimaler, effizienter Verwertungsweg der Ressource.
- Biomasse zur energetischen Nutzung („Energie-Biomasse“) ist auf maximal 20 % des Weltprimärenergiebedarfs limitiert [1]. Deshalb ist „Energie-Biomasse“ in den Verbrauchssektoren einzusetzen, in denen ein Ausweichen auf andere nachhaltige Ressourcen nicht möglich ist.
- „Energie-Biomasse“ und biogene Reststoffe werden in erster Linie als Kohlenstoff-Ressource benötigt und erst in zweiter Linie als Energie-Ressource, da in verschiedenen Nutzungssektoren Kohlenstoff-basierte Energieträger (C-Fuels) kaum zu ersetzen sind. Dies betrifft insbesondere den Kraftstoffbedarf im Mobilitätssektor.

- Durch ein „Upgrade“ von Biomasse mit Elektrolyse-Wasserstoff, gewonnen aus erneuerbarem Strom, kann die Reichweite der Ressource Biomasse bei der Erzeugung von Kohlenstoff-basierten Kraftstoffen um den Faktor 2 bis 3 erhöht werden.
- Allein im Vergleich zu den heute üblichen Bio-Kraftstoffen (Bio-Ethanol und Bio-Diesel) bietet regenerativ erzeugtes Methan aus Biomasse unter Einkopplung von Elektrolyse-Wasserstoff einen sechsfach höheren Kraftstofftrag.
- Die Erhöhung des Kraftstofftrags durch das Biomasse-„Upgrade“ bewirkt zudem eine drastische Reduktion des spezifischen Agrarflächenbedarfs. Der spezifische Flächenbedarf der strom- und biomassebasierten eFuels („mit Elektrizität verlängerter Bio-Kraftstoff“) lässt sich gegenüber der heute üblichen Erzeugung von Bio-Ethanol bzw. Bio-Diesel auf bis zu ein Sechstel reduzieren.
- In Konsequenz bedeutet dies, „Energie-Biomasse“ und biogene Reststoffe zukünftig in einem nachhaltigen Energiesystem für die Erzeugung Kohlenstoff-basierter Kraftstoffe zu reservieren und nicht für die Wärme- und Stromerzeugung zu verwenden, die auch durch andere Technologien und erneuerbare Alternativen substituiert werden kann.

Inhaltsverzeichnis

LEITFRAGE / KERNTHESEN	I
LEITFRAGE	I
KERNTHESEN	I
INHALTSVERZEICHNIS.....	III
1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....	1
2 ANFORDERUNGEN AN EIN ERNEUERBARES ENERGIESYSTEM DER ZUKUNFT	4
2.1 ANNAHMEN UND DATENBASIS.....	4
2.2 BEDARF AN C-FUELS	5
2.3 BIOMASSE-POTENZIAL	7
2.4 ERFORDERLICHE KONVERSIONSEFFIZIENZ FÜR DIE C-FUEL-ERZEUGUNG	8
3 LÖSUNGSANSATZ.....	9
3.1 BIOENERGIEPFADE OHNE EE-STROM	11
3.2 BIOENERGIEPFADE MIT EE-STROM.....	12
3.3 ZUSÄTZLICHER BEDARF AN EE-STROM	13
4 HANDLUNGSEMPFEHLUNG.....	15
5 PRIORITÄRE F&E-THEMEN MIT BEZUG ZUR BIOENERGIE.....	18
6 RELEVANZ FÜR BADEN-WÜRTTEMBERG	20
ANHANG: DATENBASIS UND ANNAHMEN	21
A1: ENDENERGIEVERBRAUCH 2010.....	21
A2: ZUKÜNFTIGER ENDENERGIEBEDARF FÜR VERKEHR	22
A3: ZUKÜNFTIGER ENDENERGIEBEDARF FÜR STROM.....	24
A4: ZUKÜNFTIGER ENDENERGIEBEDARF FÜR WÄRME	26
A5: ZUKÜNFTIGER BEDARF FÜR CHEMISCHE GRUNDSTOFFE	28
A6: ZUKÜNFTIG VERFÜGBARES BIOMASSE POTENZIAL	30
A7: ÜBERSICHT ZU KOHLENSTOFFQUELLEN IN DEUTSCHLAND	33
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	34
TABELLENVERZEICHNIS	35
LITERATURVERZEICHNIS.....	36

1 Einleitung und Problemstellung

Die stetig zunehmende Nutzung von fossilen Energieträgern sowie Rohstoffen und der dadurch verursachte Klimawandel bedrohen die Lebensgrundlage unserer Gesellschaft. Zur Energiewende gibt es keine vernünftige Alternative. Die Energiewende kann jedoch nur gelingen, wenn eine nachhaltige und sichere Versorgung unseres Energiesystems durch den effizienten Einsatz von erneuerbaren Energien (EE) gewährleistet wird. Ziel ist es einerseits, den Bedarf an Energie insgesamt zu reduzieren und effizienter zu gestalten und andererseits langfristig Wärme, Strom und chemische Sekundärenergieträger (Kraftstoffe) aus EE bereitzustellen.

Unser derzeitiges Energiesystem sowie die vorhandene Infrastruktur basieren auf der Nutzung fossiler, kohlenstoffhaltiger Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas (s.a. Anhang A1). Auch im Energiesystem der Zukunft besteht Bedarf an kohlenstoffhaltigen Sekundär- / Endenergieträgern (C-Fuels) vor allem für bestimmte Felder der Mobilität. Die einzige erneuerbare Energie, die Kohlenstoff enthält, ist die Biomasse. Der Biomasse kommt daher bei der Transformation unseres Energiesystems eine besondere Bedeutung zu. In den Anwendungsbereichen Verkehr, Strom, Wärme, Energiespeicherung und in der stofflichen Nutzung (z.B. als Baumaterial oder Grundstoff für die chemische Industrie) zeigen sich die unterschiedlichen Einsatzgebiete, in denen die limitierten Biomasseressourcen heute zum Einsatz kommen und auch zukünftig benötigt werden. Dabei betrug der Importbedarf für den Bioenergiesektor aus dem Ausland oder anderen Bundesländern nach Baden-Württemberg bereits 2008 rd. 20 % [2]. Dennoch soll die energetische Nutzung der Biomasse weiter ausgebaut werden, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Zuletzt wurde jedoch z.B. die Nutzung von Biokraftstoffen der ersten Generation (Bio-Diesel und Bio-Ethanol) aufgrund deren ökologischer Gesamtbilanz und der unmittelbaren Konkurrenz zum Nahrungsmittelanbau hinterfragt [3], [4].

Während für die Erzeugung von Strom und Wärme alle erneuerbaren Energien zur Verfügung stehen, ist die Biomasse prädestiniert für die Erzeugung von C-Fuels. Ein bisher nicht beachteter Aspekt der Energiewende ist die folgende zentrale Leitfrage:

Warum und in welchen Verbrauchssektoren werden die limitierten Biomasseressourcen als Energieform in einem zukünftigen Energiesystem benötigt?

Zur Verdeutlichung sind technische Anwendungsbereiche für die einzelnen EE in Abb. 1-1 dargestellt.

		Wärme	Strom	Sekundär- / Endenergieträger	
				Wasserstoff	C-Fuels
Erneuerbare Energien (EE)	Sonne	+	+	0	-
	Wind	0	+	0	-
	Wasser	0	+	0	-
	Erdwärme	+	0	0	-
	Biomasse	+	+	+	+

- + *technisch möglich*
- 0 *technisch unter Einsatz von EE-Wärme oder EE-Strom möglich*
- *technisch nicht möglich*

Abb. 1-1: Technische Anwendungsbereiche von EE für die Bereitstellung von Wärme, Strom und chemischen Sekundär- / Endenergieträgern.

Nach dem von Schmidt et al. vorgeschlagenen Energieszenario Baden-Württemberg 2050 wird die Biomasse im Jahr 2050 zu wesentlichen Teilen zur Wärme und Stromerzeugung eingesetzt [5]. Jedoch kann auf Basis des prognostizierten Ausbaupfades und der dafür notwendigen Stoffstromlenkung das Ziel der baden-württembergischen Landesregierung, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 90 % zu senken, nicht ohne eine zusätzliche Erzeugung von Wasserstoff (H₂) oder dem C-Fuel Biomethan (CH₄) erreicht werden [6]. Ohne deren zusätzliche Erzeugung können bis 2050 gemäß dem Energieszenario Baden-Württemberg die Treibhausgasemissionen lediglich um max. 85 % reduziert werden, da mit ca. 60 % der Hauptteil der Mobilität noch mit fossilen Energieträgern versorgt werden muss [5].

Dabei stellt sich zunehmend die Frage wie lange fossile Energieträger für die Energieversorgung nutzbar sind. Neben zahlreichen Arbeiten, die eine hohe

Verfügbarkeit vorhersagen, ist die EnergyWatchGroup¹ in jüngster Vergangenheit zu dem Schluss gekommen, dass bis zum Jahr 2030 mit einem deutlichen Rückgang der Erdöl- und Erdgasförderung zu rechnen ist [7].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll hinterfragt werden, ob der bisherige Einsatz der Biomasse für das Land Baden-Württemberg zukunftsweisend ist oder ggf. neu ausgerichtet werden muss. Biomasse als Energiespeicher eignet sich sehr gut als komplementäre Energieform zur fluktuierenden Wind- und Sonnenenergie. Insbesondere als gasförmige Bioenergie (Biogas, Rohgas) aus der fermentativen und thermo-chemischen Konversion kann Biomasse seine Stärke als flexible regenerative Energie ausspielen. Aufgrund der begrenzten Potenziale sollte die ‚teure‘ Biomasse daher nicht zur Abdeckung der Grundlast bei der Stromerzeugung dienen, sondern besondere Aufgaben im Bereich der Systemdienstleistungen (SDL) im Energiesystem übernehmen. Auf diese Art können wertvolle Ressourcen geschont und der Einsatz der Biomasse zu Zeiten eines besonderen Bedarfs (Peak Load) optimiert werden. Das EEG 2012 hat in dieser Richtung erste Impulse gesetzt und besondere Regelungen zur Flexibilisierung der Bioenergie, insbesondere der Nutzung gasförmiger Bioenergieträger auf den Weg gebracht (Direktvermarktung, Markt- und Flexibilisierungsprämien, etc.).

Anhand einer Bedarfsabschätzung an C-Fuels sowie des zukünftig nachhaltig erschließbaren Biomassepotenzials soll ein Lösungsansatz für einen zielführenden Einsatz von Biomasse in einem 100 % regenerativ versorgten Energiesystem der Zukunft entwickelt werden. Mit Bezug zur Bioenergie sollen eine Handlungsempfehlung für deren Nutzung sowie prioritäre Forschungsfelder abgeleitet werden.

¹ Unabhängiges, parlamentarisches Beratungsgremium aus Wissenschaftlern, das sich mit Strategien für eine langfristig sichere Energieversorgung befasst.
<http://www.energywatchgroup.org/Startseite.14.0.html>

2 Anforderungen an ein erneuerbares Energiesystem der Zukunft

Soll die Energiewende gelingen, muss die Endenergie für Strom, Verkehr und Wärme nachhaltig, regenerativ und mit hoher Versorgungssicherheit bereitgestellt werden. Weiterhin müssen ausreichend Rohstoffe für die chemische Industrie verfügbar sein. Eine zentrale Herausforderung ist es, C-Fuels wie bspw. Erdgassubstitut (SNG) aus regenerativen Ressourcen zu erzeugen. Entscheidend dabei ist nicht nur die Frage, wie hoch der Bedarf an kohlenstoffhaltigen Sekundär- / Endenergieträgern zukünftig sein wird, sondern welches regenerative Kohlenstoffpotenzial (i.W. biogene Ressourcen und Recycling von C-haltigen Produktionsgütern) für diesen Zweck genutzt werden kann.

2.1 Annahmen und Datenbasis

Die in der Folge aufgeführte Abschätzung basiert auf einer Reihe von Annahmen (s. Anlage). Bei der Abschätzung des zukünftigen Bedarfs an C-Fuels werden Auswirkungen auf die einzelnen Endenergiesektoren berücksichtigt. Dabei wird angenommen, dass der Bedarf an Bioenergie für Strom und Wärme im Energiesystem der Zukunft deutlich reduziert ist, da die Biomasse primär als Kohlenstoffquelle für die Bereitstellung von kohlenstoffhaltigen Sekundär- / Endenergieträgern genutzt werden muss. Vor diesem Hintergrund fließt in die Abschätzung ein, dass der zukünftige H₂-Bedarf mittels Elektrolyse gedeckt werden muss. Eine Erzeugung von Wasserstoff aus der limitierten C-Ressource Biomasse ist nicht zielführend.

Die Ermittlung des zukünftigen Bedarfs an strom- und biomassestämmigen C-Fuels erfolgt auf der Basis von drei verschiedenen Szenarien, denen ein unterschiedlicher Einsatz an C-Fuels in den jeweiligen Endenergiesektoren zugrunde liegt.

- Szenario A: Es besteht weiter ein hoher Bedarf an C-Fuels aus Biomasse, Substitutionen durch C-freie Optionen sind nur geringfügig umgesetzt: Der Verkehr wird zu 11,1 % aus Strom, 21,2 % aus Wasserstoff und 67,7 % aus C-Fuels realisiert.

- Szenario B: mittlerer Bedarf an C-Fuels aus Biomasse, Substitutionsmöglichkeiten durch C-freie Optionen umgesetzt: Der Verkehr wird zu 14,5 % aus Strom, 31 % aus Wasserstoff und 54,5 % aus C-Fuels realisiert.
- Szenario C: geringer Bedarf an C-Fuels aus Biomasse, Substitutionsmöglichkeiten durch C-freie Optionen in hohem Maße umgesetzt: Der Verkehr wird zu 18,2 % aus Strom, 42 % aus Wasserstoff und 39,8 % aus C-Fuels realisiert.

Neben der Mobilität werden in den Endenergiesektoren Strom und Wärme sowie bei der Bereitstellung von Kohlenstoff-basierten Sekundärenergieträgern für die chemische Industrie die Substitution durch C-freie Optionen in unterschiedlichen Maß berücksichtigt. Die getroffenen Annahmen sowie deren Auswirkungen auf die einzelnen Endenergiesektoren sind in Anhang A2 bis A5 zusammengefasst.

Nach allen Szenarien (A-C) ist ein 100 % regeneratives Energiesystem der Zukunft in Baden-Württemberg unter Verwendung der heimischen Biomassepotenziale möglich und die Treibhausgasminderungsziele der Landesregierung vollumfänglich erreichbar. Es bedarf jedoch massiven Anstrengungen in allen Verbrauchssektoren - insbesondere für die Realisierung der in Szenario C gewählten Substitutionsannahmen.

2.2 Bedarf an C-Fuels

Auf Basis der Festlegungen wird für die einzelnen Szenarien ein zukünftiger Bedarf an kohlenstoffhaltigen Sekundär- / Endenergieträgern (C-Fuels) ermittelt (s. Abb. 2-1). In allen Szenarien besteht im Energiesystem der Zukunft ein Bedarf an C-Fuels. Der Vergleich zwischen Szenario A und C zeigt, dass bei sehr hoher Substitution (wie in Szenario C) der Bedarf an C-Fuels nur etwa halb so hoch ist wie im Fall von Szenario A. Grundsätzlich zeigt sich, dass im Energiesystem der Zukunft mit einem Bedarf an C-Fuels von ca. 40 bis 100 TWh/a gerechnet werden muss (vgl. Werte für Szenario A und C). Der heutige Bedarf an C-basierten Sekundär- / Endenergieträgern beträgt rd. 300 TWh/a und ist somit deutlich höher (s. a. Anhang A1).

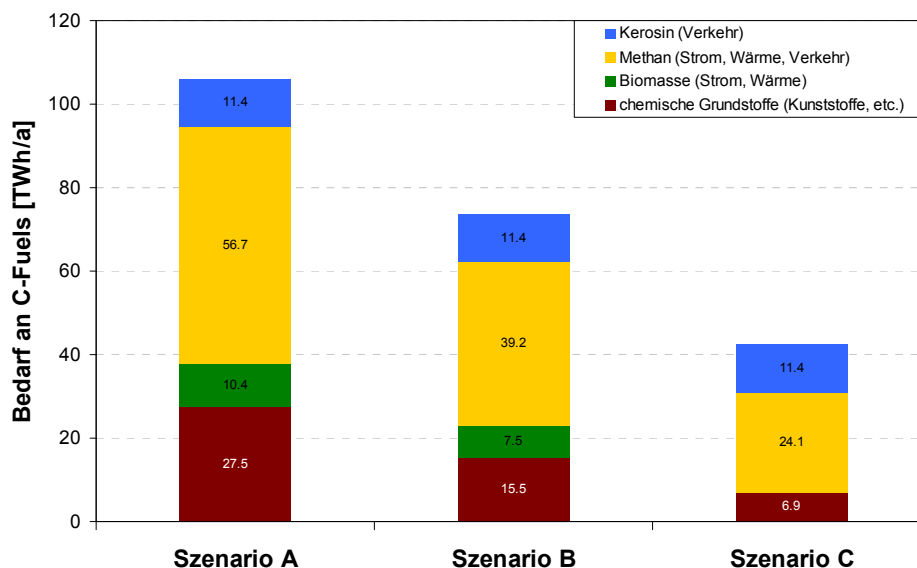


Abb. 2-1: Bedarf an C-basierten Sekundär- / Endenergieträgern in Baden-Württemberg in einem Energiesystem der Zukunft.

Da der Einsatz von Strom und Wasserstoff in der Luftfahrt nicht zielführend ist, besteht gerade dort zukünftig ein Bedarf an C-Fuels, in diesem Fall an synthetisch erzeugtem Kerosin. Je nach Szenario wird im Energiesystem ein unterschiedlich hoher Bedarf an regenerativem Erdgassubstitut (SNG) bzw. Methan (CH_4)² benötigt. Methan kann im Energiesystem der Zukunft für die Mobilität, bei der Stromerzeugung (i.W. zur Energiespeicherung, Bereitstellung von Regelenergie bzw. in KWK-Anlagen) und ggf. auch zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Zudem besteht in den Szenarien A und B Bedarf an Biomasse, um Strom in KWK-Anlagen zu erzeugen. In Szenario C wird angenommen, dass die Stromerzeugung ohne den Einsatz von Biomasse möglich ist. Des Weiteren werden C-haltige Rohstoffe als chemische Grundstoffe bspw. für die Erzeugung von Kunststoffen benötigt (s. Anhang A5).

² Vereinfachend werden alternative Kraftstoffe wie Dimethylether und Alkohole für diverse Mobilitätsanwendungen im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt bzw. näherungsweise dem C-Fuel Methan (CH_4) zugeschlagen.

2.3 Biomasse-Potenzial

Dem zukünftigen Bedarf an C-Fuels steht ein zukünftig nachhaltig erschließbares Kohlenstoff-Potenzial (C-Potenzial) aus Biomasse und C-haltigen Recyclingabfällen gegenüber.

Tab. 2-1 gibt einen Überblick über das künftig nachhaltig erschließbare Biomasse-Potenzial in Baden-Württemberg. Es wird unterschieden nach „trockenen“ Biomasse-Sortimenten, die einer thermo-chemischen Nutzung zugeführt werden können und „feuchten“ Sortimenten, die auf dem fermentativen Pfad in Biogasanlagen genutzt werden können. Für das Jahr 2050 wird ein Biomasse-Potenzial für Baden-Württemberg in Höhe von 212 PJ abgeschätzt. Hierzu tragen die trockenen Biomasse-Sortimente mit 150 PJ und die feuchten Biomasse-Sortimente mit 62 PJ bei. Für die Abschätzung der Potenziale wurden im Sinne einer Dynamisierung künftige Ertragssteigerungen bei Energiepflanzen (KUP, Mais, Grassilage etc.) und der Technologiefortschritt mit berücksichtigt. Auch wurde angenommen, dass im Jahr 2050 25 % der Ackerfläche in Baden-Württemberg für den Energiepflanzenanbau zur Verfügung steht.

Tab. 2-1: Zukünftig nachhaltig erschließbares Biomasse-Potenzial in Baden-Württemberg (Technisches Primärenergieträgerpotenzial) (nach [8]; eigene Recherchen)

	Jahr 2050
	PJ/a
Trockene Biomasse-Sortimente	150
Energieholz (KUP)	31
Getreidestroh	23
Waldrestholz	42
Holz- u. halmgutartige (trockene) Biomasse aus Landschaftspflege- und Naturschutzflächen, inkl. extensiv bewirtschaftetes Überschussgrünland	14
Altholz	20
Industrie- und Sägerestholz	20
Feuchte Biomasse-Sortimente	62
Energiepflanzen (Mais, GPS, etc.)	24
Tierische Exkremente	6,5
Intensiv bewirtschaftetes Überschussgrünland	5,5
Halmgutartige (feuchte) Biomasse aus Landschaftspflege- und Naturschutzflächen, inkl. extensiv bewirtschaftetes Überschussgrünland	4
Organische Abfälle (Industrie, Siedlung, Gewerbe)	3
Klär-, Deponiegas, Klärschlamm	7
Reststoffe aus Verarbeitung/Industrie	12
GESAMT	212

Eine ausführliche Darstellung der Datengrundlagen und Annahmen für die Abschätzung des Biomasse-Potenzials findet sich im Anhang A6.

Neben den biogenen Ressourcen kommen zukünftig auch C-haltige Recyclingabfälle als Kohlenstoffpotenzial in Frage. Je nach Szenario wird ein unterschiedlich hoher Bedarf C-Fuels benötigt (s.a. Abb. 2-1). Im Rahmen der Arbeit wird angenommen, dass 50 % der eingesetzten C-Fuels in Form von C-haltigen Recyclingabfällen energetisch wieder verwertet werden können.

Zusammenfassend ergibt sich ein regeneratives C-Potenzial bestehend aus Biomasse und Kohlenstoff-haltigen Recyclingabfällen in Höhe von

- 72,6 TWh/a für Szenario A,
- 66,6 TWh/a für Szenario B und
- 62,3 TWh/a für Szenario C,

welches für die Umwandlung zu Kohlenstoff-basierten Sekundärenergieträgern genutzt werden kann.

2.4 Erforderliche Konversionseffizienz für die C-Fuel-Erzeugung

Wie Abb. 2-1 zu entnehmen ist, ist je nach Szenario ein unterschiedlich hoher Bedarf an C-Fuels erforderlich. Demgegenüber steht ein limitiertes erneuerbares C-Potenzial (s. Abs. 2.3). Unter Berücksichtigung der Verwertung der Biomasse für die Strom- und Wärmeerzeugung in Szenario A und B und für die Erzeugung von chemischen Grundstoffen resultiert, dass die limitierten C-Ressourcen hocheffizient in C-Fuels, wie z.B. Kerosin oder Methan, umgewandelt werden müssen. Die erforderliche Konversionseffizienz von der eingesetzten C-Ressource zum entsprechenden C-Fuel muss im Mittel

- 153,6 % für Szenario A,
- 111,6 % für Szenario B und
- 67,9 % für Szenario C

betragen, um ein 100 % regeneratives Energiesystem der Zukunft in Baden-Württemberg zu ermöglichen.

Da die biogenen Ressourcen nicht nur in Form von Anbaubiomasse zur Verfügung stehen (s.a. Tab. 2-1) und der hektarbezogene Ertrag bei der Produktion von

Biodiesel und Bioethanol mit dem Stand der Technik zu gering ist, müssen neue Ansätze zur Erzeugung von C-Fuels aus biogenen Ressourcen entwickelt werden.

3 Lösungsansatz

Aufgrund ihrer elementaren Zusammensetzung ist die Biomasse ungeeignet, 100 % des Kohlenstoffs in einen potenziellen kohlenstoffhaltigen Sekundär- / Endenergieträger (C-Fuel) zu überführen. Eine hocheffiziente C-Konversion ist jedoch zwingend erforderlich, wenn ein maximaler Ertrag erreicht werden soll. Für die hocheffiziente Erzeugung von C-Fuels sind nicht nur neue Produktionsverfahren erforderlich, sondern auch eine „Verlängerung der energetischen Reichweite“ der limitierten Biomasseressourcen. Ein vielversprechender Ansatz ist hierbei die Biogaserzeugung und die thermo-chemische Konversion von Biomasse (z.B. Vergasung) in Kombination mit extern zugeführtem Wasserstoff aus der Elektrolyse. Dabei kann Elektrolyse-H₂ direkt aus Wasser mittels EE-Strom gewonnen werden. Durch diese innovative Verfahrenskombination kann die Reichweite der limitierten Biomasseressourcen entscheidend verlängert werden.

In den zwei nachfolgenden, vereinfachend dargestellten Reaktionsgleichungen bei der Methanerzeugung aus Biomasse wird die „Reichweitenverlängerung“ durch Wasserstoff deutlich:



Während in der ersten Reaktionsgleichung, die den normalen Biogasprozess bei der Vergärung von Kohlehydraten darstellt, nur 50 % des Kohlenstoffs in das Endprodukt Methan überführt werden, kann mit zusätzlichem Einsatz von Wasserstoff eine vollständige Konversion des Kohlenstoffs erreicht werden – die Kraftstoffmenge hat sich bei dieser Verfahrensvariante bei gleichbleibendem Biomasseeintrag verdoppelt!

Durch die Nutzung extern zugeführten Wasserstoffs wird eine hocheffiziente Nutzung des in der Biomasse gespeicherten Kohlenstoffs erreicht. Somit kann der spezifische Bedarf an Agrarflächen für die Kraftstoffbereitstellung eingedämmt und eine

nachhaltige energetische Biomassennutzung ermöglicht werden. Abb. 3-1 zeigt, wie Biomasse und EE-Strom zukunftsweisend in die benötigten C-Fuels umgewandelt werden sollten.

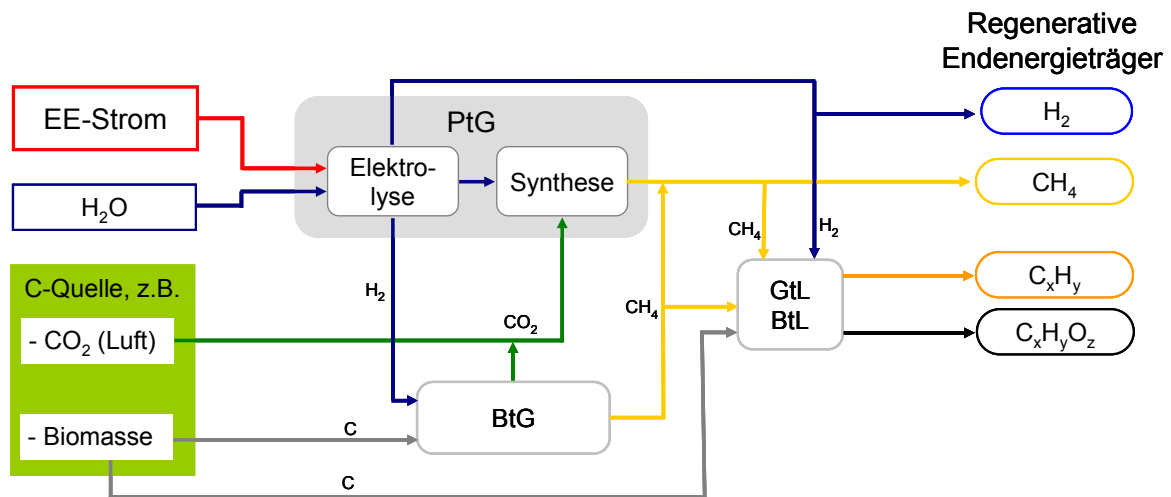


Abb. 3-1: Lösungsansatz für die hocheffiziente Nutzung des biogenen Kohlenstoffs bei der Erzeugung von regenerativem Wasserstoff und C-Fuels.

Die Biomasse wird als C-Quelle eingesetzt und kann im Biogasprozess oder bei der thermo-chemischen Biomassekonversion mittels Biomass-to-Gas (BtG) oder Biomass-to-Liquid (BtL) / Gas-to-Liquid (GtL) in kohlenstoffhaltige Endenergieträger wie Methan (CH₄), höhere Kohlenwasserstoffe (C_xH_y) und Alkohole bzw. Ether (C_xH_yO_z) umgewandelt werden. Elektrolyse-H₂ kann entweder für die Konversion von Kohlendioxid (CO₂) in Methan genutzt werden oder direkt in die jeweiligen Erzeugungsprozesse (z.B. bei der Biogaserzeugung zur biologischen Methanisierung) eingekoppelt werden.

Neben der Biomasse ist langfristig die Nutzung von CO₂ aus der Luft als Kohlenstoffquelle vorstellbar – allerdings ist der Energiebedarf in diesem Fall ungleich höher als bei der Verwendung von Biomasse, da für die CO₂-Abtrennung aus der Luft thermische oder elektrische Energie eingesetzt werden muss. In der Biomasse liegt der Kohlenstoff in konzentrierter und gespeicherter Form vor und kann daher effizient für die C-Fuel-Erzeugung eingesetzt werden. Anhang A7 zeigt eine Übersicht zu verfügbaren C-Quellen in Deutschland, die kurzfristig für die Erprobung der einzelnen Technologieschritte in Frage kommen.

3.1 Bioenergiepfade ohne EE-Strom

Abb. 3-2 zeigt, welcher C-Fuel-Ertrag aus Biomasse für verschiedene Bioenergiepfade erzeugt werden kann. Der Aufwand wird negativ und der Ertrag positiv dargestellt. Aus 100 Energieeinheiten Biomasse können je nach biogenem Edukt unterschiedlich viele Energieeinheiten C-Fuel bereitgestellt werden. Vereinfachend werden in Abb. 3-2 ergänzende Aufwendungen in Form von z.B. elektrischer Hilfsenergie³ nicht aufgeführt.

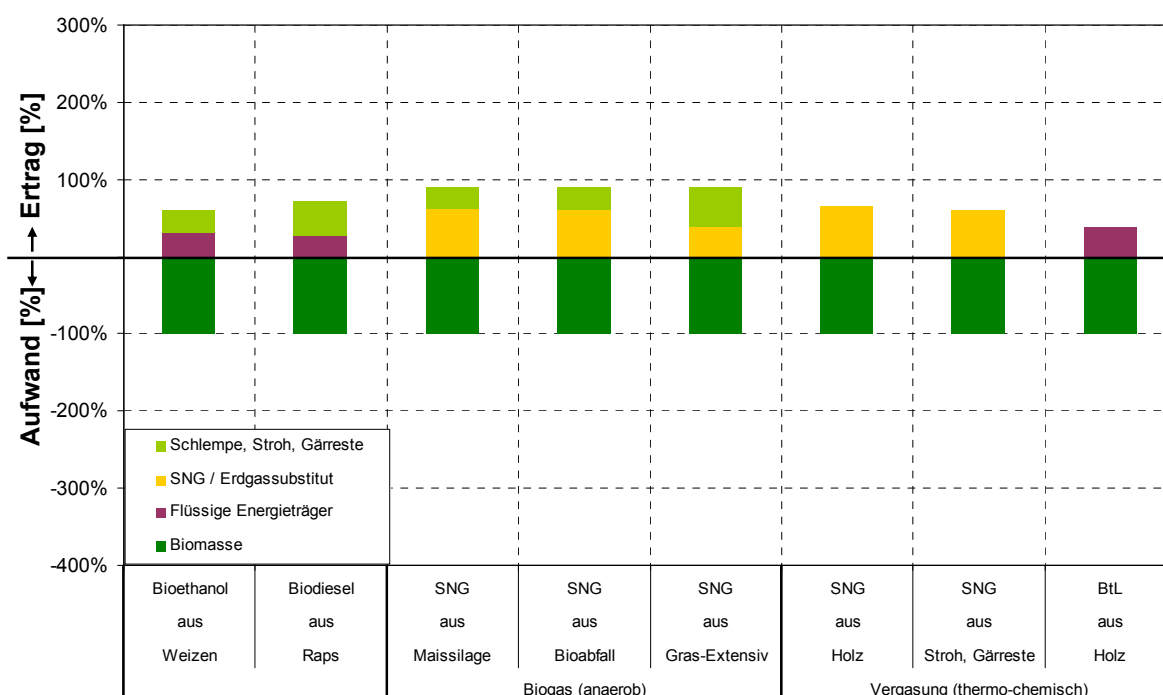


Abb. 3-2: Aufwand und Ertrag verschiedener Bioenergiepfade zur Erzeugung von gasförmigen und flüssigen C-Fuels.

Der Vergleich zeigt, dass die in die Kritik geratenen Biokraftstoffe der ersten Generation (Bioethanol und Biodiesel) relative geringe Konversionseffizienzen aufweisen. Wird SNG (Methan bzw. CH₄) aus Biomasse erzeugt, so ist eine effizientere Umwandlung möglich. Je nach Edukt und Bioenergiepfad können energetische Konversionseffizienzen von über 60 % erreicht werden. Eine Alternative zu Biodiesel und Bioethanol ist die Erzeugung von flüssigen Kraftstoffen mittels

³ Die Aufwendungen für Hilfsenergien entsprechen im Mittel ca. 5 % der eingesetzten Biomasse. Bei der Erzeugung von Bioethanol und Biodiesel ist der Fremdenergiebedarf höher.

BtL-Verfahren. Neben der Option, Biomasse direkt in BtL-Verfahren einzusetzen, können flüssige C-Fuels auch mittels GtL-Verfahren bspw. aus SNG erzeugt werden. Dennoch ist die Erzeugung von flüssigen C-Fuels im Vergleich zur Methanherzeugung über die fermentative und thermo-chemische Konversion in Summe ineffizienter.

Im Mittel können mit den in Abb. 3-2 dargestellten neuen Konversionsverfahren nicht die erforderlichen Kohlenstoff-Konversionseffizienzen für die Erzeugung an C-Fuels erreicht werden (s.a. Kap. 2.3). Mit den bisherigen konventionellen Verfahren steht zu wenig Biomasse zur Verfügung, um den beschriebenen Bedarf an C-Fuels zu befriedigen. Das gilt selbst für Szenario C. Es müssen also weiter fossile C-Quellen genutzt werden oder die Option einer Verlängerung der energetischen Reichweite der Biomasse durch die Einkopplung von Wasserstoff realisiert werden.

3.2 Bioenergiepfade mit EE-Strom

Um einen höheren Kraftstofftrag bei der Nutzung der limitierten Biomasseressourcen zu erreichen, muss die Einbindung von Elektrolyse-H₂ erfolgen. In Abb. 3-3 ist dargestellt, inwieweit die energetische Reichweite der Biomasse durch den vorgeschlagenen Lösungsansatz vergrößert werden kann. Die dargestellten Erträge stellen dabei die maximal möglichen Obergrenzen dar. Als Referenz sind ebenfalls die Biokraftstoffpfade der ersten Generation aufgeführt.

Der Ertrag an C-Fuels kann im Fall der anaeroben Biogaserzeugung nahezu verdoppelt werden (Abb. 3-3). Zusätzlich können Gärreste, die bei der Biogaserzeugung zurückbleiben, entweder als Humus- oder Nährstofflieferanten in den Kreislauf zurück gebracht werden. Außerdem können sie nach einer Aufbereitung ebenso wie feste Biomassesorten mittels thermo-chemischer Konversion effizient umgewandelt werden. Im Fall der Vergasung ist maximal eine Verdreifachung des Energieertrags möglich, da kein Gärrest zurückbleibt.

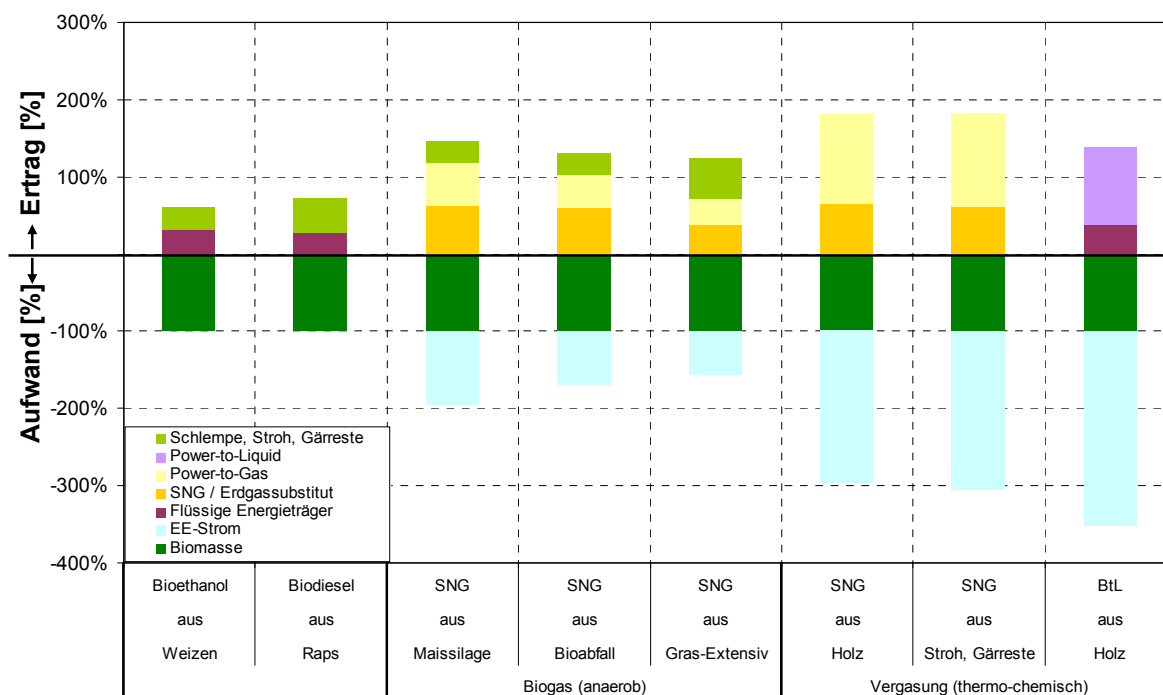


Abb. 3-3: Aufwand und Ertrag verschiedener Bioenergiepfade unter Einkopplung von EE-Strom bei der Erzeugung von C-Fuels aus Biomasse.

Durch den aufgezeigten Lösungsansatz können die limitierten Biomasseressourcen in Kombination mit EE-Strom nachhaltig entlastet werden. Im besten Fall kann aus Biomasse im Vergleich zu Bio-Ethanol und Bio-Diesel ein bis zu 6-fach höherer Kraftstoffenergieertrag erreicht werden. Allerdings muss für die Bereitstellung des erforderlichen Wasserstoffs Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt werden.

3.3 Zusätzlicher Bedarf an EE-Strom

Durch die Substitution von C-Fuels im Verkehrs- und Wärmesektor sowie bei der Erzeugung von chemischen Grundstoffen ist eine zusätzliche Stromerzeugung erforderlich. Dabei muss neben dem direkten Einsatz von Strom für die Mobilität und Raumbeheizung (z.B. durch effiziente Wärmepumpentechnologie) Strom für die elektrolytische Wasserstoffherstellung bereitgestellt werden. Wasserstoff wird in Zukunft im Bereich der Mobilität und in der chemischen Industrie benötigt.

Für die Verlängerung der energetischen Reichweite der Biomasse entsteht ein weiterer Wasserstoffbedarf, der durch regenerativen Zusatzstrom für die Elektrolyse

gedeckt werden muss. Abb. 3-4 zeigt, welcher Endenergiebedarf für die Stromerzeugung für die verschiedenen Szenarien besteht.

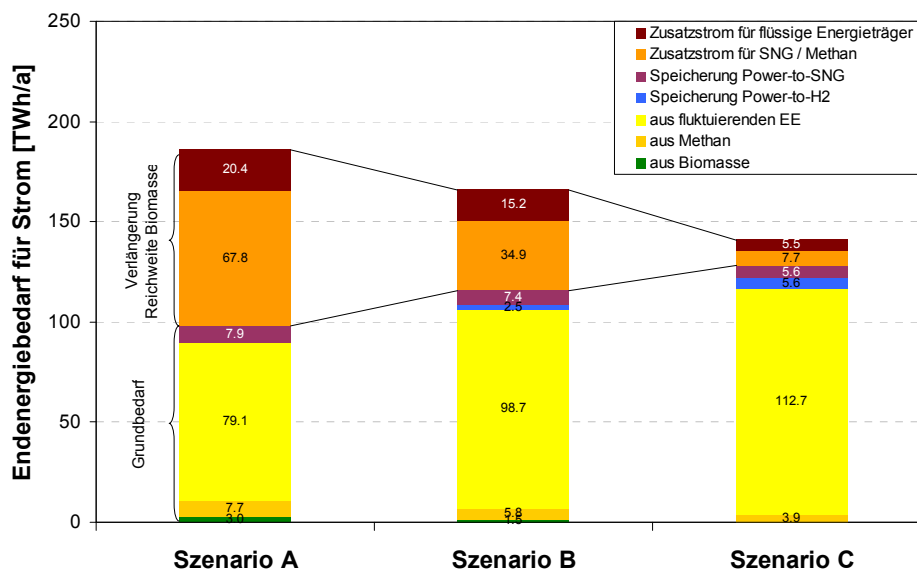


Abb. 3-4: Bedarf an regenerativem Strom in Baden-Württemberg im Energiesystem der Zukunft für die verschiedenen Szenarien.

Es zeigt sich, dass im Fall von Szenario A ein geringerer Grundbedarf an EE-Strom besteht, da hier weniger C-Fuels aus den anderen Endenergiesektoren (Wärme, Verkehr, chemische Grundstoffe) substituiert werden. Die limitierten Biomasseressourcen reichen nicht aus, um ausreichend C-Fuels ohne eine Einbindung von EE-Strom bereitzustellen. Daher muss in allen Szenarien zusätzlicher Strom eingesetzt werden, um die Biomasse „upzugraden“. Der Zusatzstrombedarf für die Verlängerung der energetischen Reichweite ist dabei im Fall Szenario A deutlich höher als z.B. im Fall von Szenario C. Bei Szenario A muss ein höherer Bedarf an C-Fuels gedeckt werden. D.h. ein höherer Anteil der biogenen Ressourcen muss mit Elektrolyse-H₂ aufgewertet werden. Je höher also die Substitution an C-Fuels ist, desto geringer ist der Gesamtstrombedarf im Energiesystem der Zukunft.

2010 betrug der Bruttostromverbrauch in Baden-Württemberg 81,5 TWh/a [5]. Grundsätzlich wird für die verschiedenen Szenarien ein deutlich höherer Strombedarf ermittelt. Der Einsatz fossiler Energieträger wird im Energiesystem der Zukunft durch EE-Strom ersetzt. Biomasse steht nur in begrenztem Umfang zur Verfügung. Im Vergleich zum Energieszenario Baden-Württemberg 2050 ist nicht von einem Rückgang des Stromverbrauchs auszugehen, sondern von einer Verdoppelung [5].

4 Handlungsempfehlung

Der Begriff „Energiewende“ wird in der öffentlichen Debatte oftmals ausschließlich auf den Stromsektor begrenzt. Tatsächlich umfasst die Transformation unseres Energiesystems auch die nachhaltige Bereitstellung von Wärme und Sekundärenergieträgern.

Eine zentrale Rolle kommt dabei der energetischen Nutzung von Biomasse zu. Um die begrenzt zur Verfügung stehende Biomasse bei der relativ knappen Nutzfläche Baden-Württembergs so effizient wie möglich einzusetzen, empfiehlt es sich, veränderte Strategien und Schwerpunkte für die zukünftige Bioenergieforschung und -nutzung festzulegen.

„Energie-Biomasse“ und biogene Reststoffe werden in erster Linie als Kohlenstoff-Ressource benötigt und erst in zweiter Linie als Energie-Ressource. Zumal in verschiedenen Nutzungssektoren Kohlenstoff-basierte Energieträger kaum zu ersetzen sind. Dies betrifft insbesondere den Kraftstoffbedarf für Flugverkehr, LKW-Langstrecke, Schifffahrt, nicht elektrifizierbaren Schienenverkehr, etc. Das Hauptziel sollte daher auf die Erzeugung von Kohlenstoff-basierten Kraftstoffen (z.B. SNG) gelegt werden, die eine deutlich höhere Energiedichte als Wasserstoff aufweisen. Nicht zielführend sind dagegen die „Bio-Kraftstoffe der 1. Generation“.

Durch ein „Upgrade“ von Biomasse mit Elektrolyse-Wasserstoff, gewonnen aus erneuerbarem Strom, kann die Reichweite der begrenzten Ressource Biomasse bei der Erzeugung von Kohlenstoff-basierten Kraftstoffen um den Faktor 2 bis 3 erhöht werden. Dies bedingt eine drastische Reduktion des Agrarflächenbedarfs. Der Flächenbedarf der strom- und biomassebasierten eFuels lässt sich gegenüber der heute üblichen Erzeugung von Bio-Ethanol bzw. Bio-Diesel auf bis zu ein Sechstel reduzieren. Die hocheffiziente Umwandlung von Biomasse zu Sekundärenergieträger beinhaltet eine Verlängerung der energetischen Reichweite durch EE-Strom in Form C-basierter eFuels („Bio-Kraftstoffe der 3. Generation“).

Für die Trendwende in BW hin zu einer erneuerbaren Energieversorgung können biogene Gase und ihre Einspeisung ins Erdgasnetz eine besondere Bedeutung spielen: Über die Einspeisung ins Erdgasnetz können biogen-basierte Gase besonders effizient genutzt werden. Vor allem aber eröffnet das Erdgasnetz die Möglichkeit, die fluktuierende regenerative Strombereitstellung zu puffern (z.B. mit dem Power-to-Gas-Verfahren). Eine anschließende Nutzung in Erdgasfahrzeugen

könnte die Pufferleistung noch erhöhen. Hieraus ergeben sich für die Bioenergie zukünftig zwei verschiedene, zeitlich gestaffelte Entwicklungsperspektiven:

1. Kurz- bis mittelfristig: eine stärkere Konzentration auf die Erzeugung und Nutzung biogener Gase zur komplementären Nutzung und flexiblen Ergänzung zur fluktuierenden Wind und Sonnenenergie.
2. Mittel- bis langfristig: eine Konzentration der Nutzung auf Sektoren, die auf energiereiche und C-haltige Kraft- und Rohstoffe nicht verzichten können, wie z.B. bestimmte Mobilitätssektoren (Luft-, Schwerkraftverkehr, etc.) oder die chemische Industrie.

Die begrenzt verfügbaren Biomassepotenziale in Baden-Württemberg müssen effizient, kostengünstig und ökologisch sinnvoll genutzt werden. Forschungsaktivitäten zur Mobilisierung verfügbarer, bisher ungenutzter Potenziale sowie Systemstudien zu künftigen Einsatzmöglichkeiten der Biomasse leisten hierzu einen wesentlichen Beitrag und unterstützen das Land bei der Verwirklichung seiner politischen Zielsetzungen.

Derzeit sind viele Substrate, z.B. Nebenprodukte der Nahrungsmittelproduktion oder in der Landwirtschaft (z.B. Stroh, Landschaftspflegeabfälle) zwar verfügbar, werden jedoch nicht nachhaltig genutzt. Deren Einbindung in die Energieerzeugung und Rückführung der enthaltenen Nährstoffe in den natürlichen Stoffkreislauf sollte intensiviert werden.

Eine wichtige Voraussetzung stellen der Ausbau und die Weiterentwicklung von Biogasaufbereitungsanlagen, sowie die Entwicklung von Verfahren der direkten Erzeugung von Biomethan über den Biogasprozess selbst, dar. Darüber hinaus müsste auch kleineren Anlagen für die Biomethaneinspeisung ein Netzzugang ermöglicht werden. Neben weiteren Kurzfristmaßnahmen, wie bspw. die Optimierung und das Repowering von bereits bestehenden Biogasanlagen, erfordert die Trendwende in Baden-Württemberg hin zu einer regenerativen Energieversorgung zwingend eine Effizienzrevolution im Wärme-, Strom- und Kraftstoffsektor. Im Mobilitätssektor sind je nach Verkehrsmittel die Energieträger Strom, Wasserstoff und SNG zu etablieren. „Energie-Biomasse“ und biogene Reststoffe müssen in einem nachhaltigen Energiesystem konsequenterweise für die hocheffiziente Erzeugung Kohlenstoff-basierter Kraftstoffe reserviert werden. Auf die bisher im Fokus stehende Erzeugung von Strom und Wärme aus Biomasse sollte zugunsten der Kraftstoffherzeugung verzichtet werden. Der infolgedessen deutlich steigende

Strombedarf lässt sich durch den weiteren Ausbau von Photovoltaik und Windkraft decken. Durch die Etablierung effizienter Wärmepumpentechnologie kann der Bedarf an C-Fuels im Wärmesektor zudem deutlich reduziert werden.

5 Prioritäre F&E-Themen mit Bezug zur Bioenergie

Im Energiesystem der Zukunft besteht ein besonderer Bedarf an Kohlenstoff-basierten Energieträgern. Die bezahlbare und effiziente Bereitstellung an C-Fuels hat daher starken Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit nahezu aller Bereiche unserer Volkswirtschaft. Die übergeordneten Ziele einer zukunftsweisenden Bioenergieforschung in Baden-Württemberg sind aufgrund der vorliegenden Ergebnisse die Nutzung der Biomasse als Kohlenstoff-Ressource sowie die Maximierung der C-Konversion bei der Bereitstellung von kohlenstoffbasierten Sekundär- / Endenergieträgern.

Im Einzelnen ergeben sich die nachfolgend aufgelisteten prioritären FuE-Themen. Die FuE-Themen sind sowohl in der Grundlagenforschung und Systemanalyse aufzuarbeiten, als auch in der Anwendung zu platzieren. Zur Umsetzung der unten aufgeführten Forschungsfelder wird vorgeschlagen, bevorzugt kooperative Projekte mit Partnern aus Forschung und Anwendung gemeinsam und in Form von Demonstrations- und Pilotanlagen zu fördern.

1. Maximierung des Kohlenstoffumsatzes bei der Erzeugung von chemischen Energieträgern

Soll der zukünftige Bedarf an C-Fuels nachhaltig und regenerativ gedeckt werden, ist ein maximaler Ertrag an C-Fuel pro eingesetzter Energieeinheit Biomasse erforderlich. Biomasse enthält zu viel Sauerstoff für eine kohlenstoffeffiziente Erzeugung von C-Fuels. Ein vielversprechender Ansatz zur Maximierung des Kohlenstoffumsatzes bzw. zur Verlängerung der energetischen Reichweite der Biomasse ist die Nutzung von EE-Strom, über den bspw. Elektrolyse-H₂ für den Herstellungsprozess zur Verfügung gestellt werden kann. Im besten Fall kann so aus der Biomasse im Vergleich zu Bio-Ethanol und Bio-Diesel ein bis zu 6-fach höherer Kraftstofftrag erzielt werden. Für die kohlenstoffeffiziente Bereitstellung von C-Fuels gilt es, innovative Verfahrenkombinationen aus Elektrolyse sowie fermentativer und thermo-chemischer Biomassekonversion zu entwickeln.

2. Chemische Energieträger für die Energiespeicherung / Mobilität

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien im Land wächst der Bedarf zur Speicherung von Strom. Die Strombereitstellung soll jederzeit möglichst ohne Nutzungsbeschränkung erfolgen. D.h. es soll einerseits die Nachfrage zu Zeiten mit einem geringen Angebot gedeckt werden und andererseits ein Überangebot bei zu geringer Nachfrage nicht ungenutzt bleiben. Eine gesicherte und nachhaltige Vollversorgung mit EE-Strom wird ohne ausreichende Energiespeicherung nicht gelingen. Insbesondere die saisonale Langzeitspeicherung von EE-Strom mittels chemischer Energieträger stellt dabei eine große Herausforderung dar. Neben der Stromspeicherung werden zukünftig chemische, Kohlenstoff-haltige Energieträger im Verkehr für nicht substituierbare Anwendungen wie Flugverkehr, LKW-Langstrecke, Schifffahrt, etc. benötigt. Der Bedarf an C-Fuels im Mobilitätssektor ist dabei mindestens um den Faktor 3 höher als im Stromsektor.

C-Fuels aus Biomasse und EE-Wasserstoff sind flexibel einsetzbar und passen hervorragend zu einem regenerativen Erzeugungsmix mit hohen Anteilen an Solar- und Windenergie. Es sollte geprüft werden, welche Verfahrenskombinationen sich besonders für die Ausregelung fluktuierender erneuerbarer Energie (Solar, Wind) und die Erzeugung von regenerativen C-Fuels für die Mobilität eignen.

3. Ressourcen für die Erzeugung von chemischen Energieträgern

Für ein nachhaltiges Energiesystem der Zukunft ist die Nutzung aller verfügbarer biogener Ressourcen für die Erzeugung von chemischen Energieträgern erforderlich. Dabei darf sich die Nutzung der Biomasse nicht auf einige wenige Rohstoffe und Energiepflanzen beschränken. Die Bandbreite nachhaltig zu erzeugender und zu nutzender Ressourcen muss deutlich erhöht werden. Neben der Ausschöpfung bisher nicht genutzter Rohstoffpotenziale ist deren nachhaltige Bereitstellung zu berücksichtigen. Die Rückführung der enthaltenen Nährstoffe in den natürlichen Stoffkreislauf sollte intensiviert werden. Hierfür müssen geeignete Recyclingverfahren entwickelt werden.

6 Relevanz für Baden-Württemberg

Das Land Baden-Württemberg steht aufgrund der von nuklearen Energieträgern geprägten Stromversorgung in der Vergangenheit einerseits und der ambitionierten Ausbauziele für erneuerbare Energien andererseits einem besonders starken Umbau des Stromversorgungssystems gegenüber. Mit steigendem Anteil der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen wird die Produktion stärker fluktuieren und saisonale Speichertechnologien zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Perspektivisch wird damit die Biomassenutzung unter Einkopplung externen Wasserstoffs in Baden-Württemberg eine herausragende Rolle spielen. Gerade deshalb ist es ein Mehrwert, die Technologie bereits heute unter zukünftigen Rahmenbedingungen realitätsnah zu erproben, um rechtzeitig technische und wirtschaftliche Restriktionen und Handlungsempfehlungen ableiten zu können. Die Ergebnisse des Vorhabens können damit einen wichtigen Beitrag zur energiewirtschaftlichen Diskussion über die optimale langfristige Ausrichtung der Strom- und Kraftstoffversorgung im Land leisten.

Gerade für Baden-Württemberg ist es von entscheidender Bedeutung, sich rechtzeitig und effizient für die Energieversorgung der Zukunft zu rüsten. Insbesondere für die baden-württembergische Automobilwirtschaft und die Antriebstechnik/Motorenbau stellen eFuels eine vielversprechende nachhaltige Kraftstoffoption dar. Davon hängen Wertschöpfung, Arbeitsplätze und der Wohlstand des Landes und seiner Bevölkerung ab. Weiterhin ist Baden-Württemberg stark geprägt durch den Anlagenbau und die Verfahrenstechnik, deren Geschäftsfelder die Konversion von Biomasse tangieren. Werden in Baden-Württemberg diese Technologien frühzeitig etabliert, so ergibt sich hieraus ein Wettbewerbsvorteil aus dem Zusammenspiel Kraftstofferzeugung und Kraftstoffnutzung. So bietet sich die Chance für Baden-Württemberg die Technologieführerschaft bei den konvergierenden Energiemärkten Strom/Kraftstoff/Mobilität zu erlangen. Darüber hinaus ergeben sich vor allem auch für die Stärkung des ländlichen Raums Perspektiven: Dezentrale Verfahren zur optimierten Biogas- oder Methanherzeugung können dort Arbeitsplätze schaffen und sichern.

Anhang: Datenbasis und Annahmen

A1: Endenergieverbrauch 2010

Abb. A-1 führt den Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg im Jahr 2010 für den Verkehr sowie die Erzeugung von Strom und Wärme nach verschiedenen Ressourcen auf. Der fossile Anteil am Endenergieverbrauch betrug ca. 285 TWh. Demgegenüber stehen ca. 32 TWh, die aus regenerativen Quellen bereitgestellt wurden. Die Endenergiebereitstellung erfolgte überwiegend auf Basis von kohlenstoffhaltigen Energieträgern (~ 85 %).

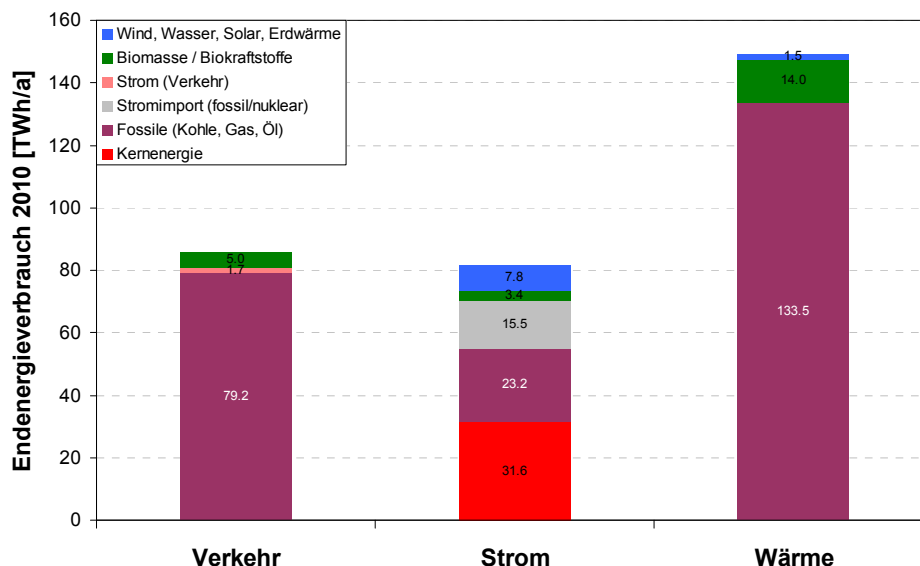


Abb. A-1: Endenergieverbrauch 2010 in Baden-Württemberg (nach [5]).

Zusätzlich zum Endenergieverbrauch für Verkehr, Strom und Wärme müssen noch chemische Grundstoffe für die Erzeugung von Chemieprodukten (z.B. Kunststoffe, etc.) bereitgestellt werden. Der Verbrauch an C-Rohstoffen für die Erzeugung von Chemieprodukten kann auf Basis von Literaturdaten abgeschätzt werden. Danach betrug der Bedarf an C-Fuels in der chemischen Industrie im Jahr 2007 ca. 240 TWh in Deutschland. Dabei wurden rd. 35 TWh Biomasse eingesetzt [9]. Vereinfachend wird im Rahmen dieser Arbeit angenommen, dass in Baden-Württemberg ca. 11 % an C-Fuels für die Erzeugung von Chemieprodukten verbraucht werden. Dies

entspricht in etwa dem Verhältnis des Primärenergieverbrauchs 2010 in Baden-Württemberg zu dem in Deutschland.

A2: Zukünftiger Endenergiebedarf für Verkehr

Wie in Abs. 2.1 beschrieben, erfolgt die Bedarfsabschätzung für drei verschiedene Szenarien.

Tab. A-1 listet auf, welche Energieform im jeweiligen Mobilitätssektor in den verschiedenen Szenarien gebraucht wird. Der C-Fuel-Bedarf in Szenario A entspricht dabei in etwa dem von Schmidt et al. ermittelten Bedarf an kohlenstoffhaltigen Endenergieträgern für das Jahr 2050 in Baden-Württemberg. Hier wird ein Bedarf von knapp 49 TWh/a für die Mobilität angegeben. [5].

Tab. A-1: Festlegung der Parametervariation in den verschiedenen Szenarien im Mobilitätssektor

		Szenario A	Szenario B	Szenario C	
Personenverkehr	PKW				
	Methan	33	17	0	[%]
	Strom	33	42	50	[%]
	Wasserstoff	33	42	50	[%]
	Bahn				
	Strom	100	100	100	[%]
	ÖPNV				
	Methan	33	17	0	[%]
	Strom	33	42	50	[%]
	Wasserstoff	33	42	50	[%]
Güterverkehr	Flugzeug				
	Kerosin	100	100	100	[%]
	LKW				
	Flüssig-Methan	70	52	33	[%]
	Strom	15	24	33	[%]
	Wasserstoff	15	24	33	[%]
	Bahn				
	Strom	100	100	100	[%]
	Flugzeug				
	Kerosin	100	100	100	[%]
Schiff					
Flüssig-Methan	100	100	100	[%]	

Für die Abschätzung des zukünftigen Endenergiebedarfs im Verkehr werden nach Nitsch et al. die für das Jahr 2050 prognostizierte Verkehrsleistung sowie die spezifischen Verbrauchswerte im Personen- und Güterverkehr in Deutschland

berücksichtigt⁴. Zur Berechnung des zukünftigen Bedarfs in Baden-Württemberg wird vereinfachend der Quotient BW/DE gebildet. Dabei werden Zahlen für den Endenergieverbrauch im Mobilitätssektor für das Jahr 2010 (~ 12 %) herangezogen [10], [11].

Selbst bei einem starken Rückgang von C-Fuels im Mobilitätssektor besteht ein nicht substituierbarer Bedarf für die Betankung von Flugzeugen, Schiffen und Lastkraftwagen (s. Abb. A-2).

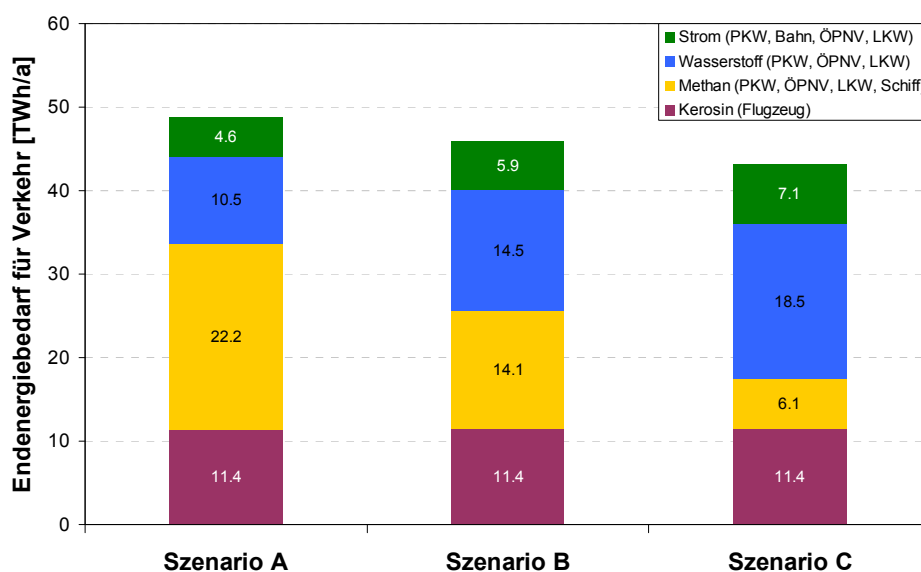


Abb. A-2: Zukünftiger Endenergiebedarf für Verkehr in Baden-Württemberg; berechnet für Szenarien A – C.

Aufgrund der höheren Effizienz von Strom- und H₂-Fahrzeugen sinkt der Endenergiebedarf bei höherer Substitution an kohlenstoffhaltigen Endenergieträgern. Der ermittelte Bedarf ist in guter Übereinstimmung zur von Schmidt et al. durchgeführten Studie [5].

⁴ Bei der Ermittlung des zukünftigen Endenergiebedarfs für die Schifffahrt wird vereinfachend angenommen, dass der von Nitsch et al. angegebene spezifische Verbrauch für Dieselkraftstoff dem eines mit Flüssig-Methan (LNG) betriebenen Schiffes entspricht.

A3: Zukünftiger Endenergiebedarf für Strom

Bei der Ermittlung des zukünftigen Endenergiebedarfs für die Stromerzeugung wird die Vernetzung des Stromsektors mit den anderen Bedarfssektoren berücksichtigt. Vereinfachend wird angenommen, dass

- 10 % der fluktuierenden Stromerzeugung mittels Power-to-Gas (H_2 / CH_4) gespeichert werden müssen,
- H_2 für den Mobilitätssektor und den Bedarf an chemischen Grundstoffen mittels Elektrolyse bereitgestellt wird,
- die Effizienz Power-to- H_2 (Elektrolysewirkungsgrad) 70 % beträgt,
- die Effizienz Power-to- CH_4 (Mix aus Elektrolyse und Methanisierung) 60 % beträgt,
- die Effizienz Power-to-Heat (Mix aus Wärmepumpe und E-Heizung) 150 % beträgt,
- der mittlere Wirkungsgrad vom C-Fuel (Biomasse, Methan) zum Strom 45 % beträgt.

Für die Ermittlung des C-Fuel-Bedarfs in den einzelnen Szenarien A – C wird folgende Parametervariation durchgeführt:

- Szenario A: Substitution des Bedarfs an Biomasse um 50 % und an Methan um 0 % gegenüber den von Schmidt et al. angegebenen Werten [5] sowie 100 % Stromspeicherung mittels Power-to- CH_4 und 0 % Stromspeicherung mittels Power-to- H_2 .
- Szenario B: Substitution des Bedarfs an Biomasse um 75 % und an Methan um 25 % gegenüber den von Schmidt et al. angegebenen Werten [5] sowie 75 % Stromspeicherung mittels Power-to- CH_4 und 25 % Stromspeicherung mittels Power-to- H_2 .
- Szenario C: Substitution des Bedarfs an Biomasse um 100 % und an Methan um 50 % gegenüber den von Schmidt et al. angegebenen Werten sowie 50 % Stromspeicherung mittels Power-to- CH_4 und 50 % Stromspeicherung mittels Power-to- H_2 [5].

Je mehr C-Fuels in den anderen Verbrauchssektoren substituiert werden, desto mehr Strom muss erzeugt werden (s. Abb. A-3). D.h. eine zunehmende Stromerzeugung aus fluktuierenden EE wird erforderlich. Der Strombedarf für die Energiespeicherung nimmt sukzessive zu.

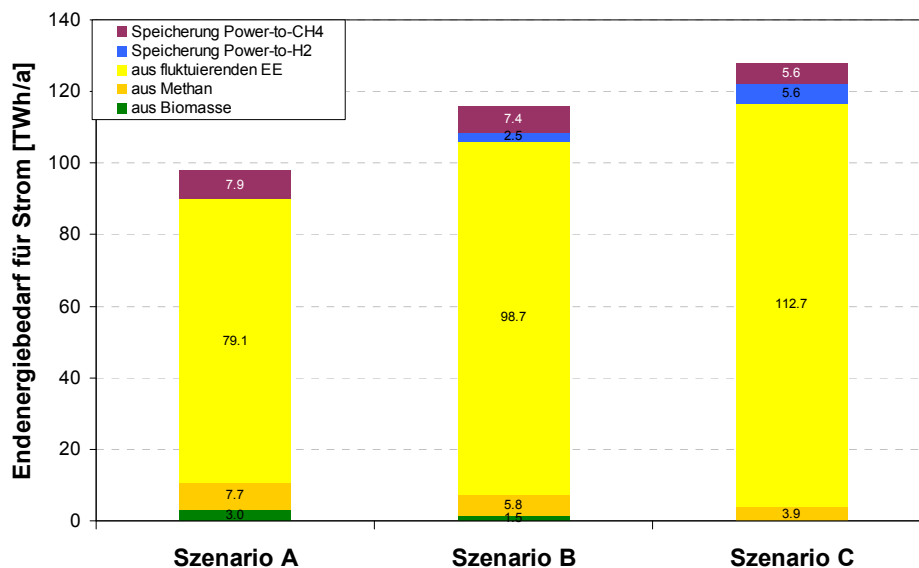


Abb. A-3: Zukünftiger Endenergiebedarf für Strom ohne Zusatzstrom für die Verlängerung der energetischen Reichweite der Biomasse⁵ in Baden-Württemberg; berechnet für Szenarien A – C.

Grundsätzlich zeigt sich, dass in allen betrachteten Szenarien ein höherer Endenergiebedarf in Form von Strom erforderlich ist als heute verbraucht wird (s.a. Abb. A-1).

⁵ Der zusätzliche Strombedarf für die Verlängerung der energetischen Reichweite der Biomasse ist in Abb. 3-4 berücksichtigt.

A4: Zukünftiger Endenergiebedarf für Wärme

Bei der Abschätzung des zukünftigen Endenergiebedarfs für Wärme wird vereinfachend angenommen, dass

- eine Reduktion im Wärmesektor auf rd. 50 TWh/a möglich ist [5],
- der Ausbau von Solar- und Geothermie-Wärme nach dem von Schmidt et al. vorgeschlagenen Szenario nicht weiter ausbaubar ist (nach [5]),
- 50 % der Wärme aus C-Fuels in Form von KWK-Anlagen ($\eta_{el} = 40 \%$ und $\eta_{th} = 50 \%$) bereitgestellt wird, und
- 50 % der Wärme aus C-Fuels mittels effizienter Brennwertkessel ($\eta_{th} = 100 \%$) erzeugt wird.

Für die Ermittlung des C-Fuel-Bedarfs in den einzelnen Szenarien A – C wird folgende Parametervariation durchgeführt:

- Szenario A: Substitution des Bedarfs an Biomasse bzw. Methan um 50 % bzw. 0 % gegenüber den von Schmidt et al. angegebenen Werten [5].
- Szenario B: Substitution des Bedarfs an Biomasse bzw. Methan um 75 % bzw. 25 % gegenüber den von Schmidt et al. angegebenen Werten [5].
- Szenario C: Substitution des Bedarfs an Biomasse bzw. Methan um 100 % bzw. 50 % gegenüber den von Schmidt et al. angegebenen Werten [5].

Je mehr C-Fuels im Wärmesektor substituiert werden, desto mehr Wärme muss mittels Wärmepumpen bzw. elektrischen Widerstandsheizungen bereitgestellt werden (s. Abb. A-4). D.h. eine Etablierung des Technologiepfades Power-to-Heat bzw. der Wärmepumpentechnologie wird erforderlich.

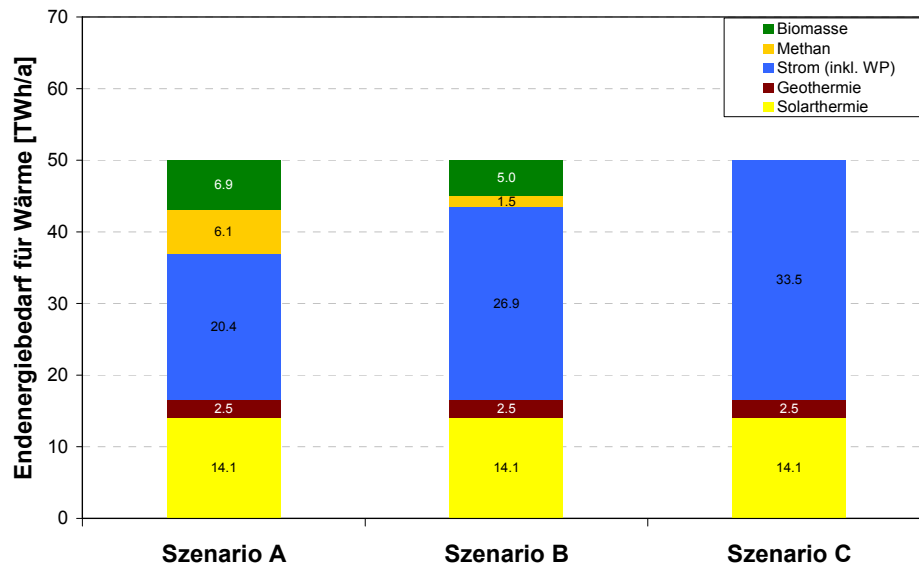


Abb. A-4: Zukünftiger Endenergiebedarf für Wärme in Baden-Württemberg; berechnet für Szenarien A – C.

A5: Zukünftiger Bedarf für chemische Grundstoffe

Heute beträgt der Bedarf an C-Fuels in der chemischen Industrie rd. 240 TWh/a in Deutschland. Dabei wird ein kleiner Anteil durch biogene Ressourcen gedeckt [9]. Näherungsweise wird angenommen, dass der Anteil an verbrauchten chemischen Grundstoffen in Baden-Württemberg dem Primärenergieverhältnis BW/D entspricht. Es ergibt sich ein fiktiver Verbrauch in Baden-Württemberg von rd. 27,5 TWh/a. Bei der Abschätzung des zukünftigen Sekundärenergiebedarfs für die Erzeugung von chemischen Grundstoffen wird vereinfachend angenommen, dass

- zukünftig eine Einsparung am Verbrauch chemischer Grundstoffe (z.B. durch die Erhöhung der Lebensdauer von Produktionsgütern) möglich ist und
- dass zukünftig eine Substitution an C-basierten Energieträgern durch den Einsatz von Wasserstoff (z.B. bei der Produktion von Düngemitteln) gelingt.

Für die Ermittlung des C-Fuel-Bedarfs in den einzelnen Szenarien A – C wird folgende Parametervariation durchgeführt:

- Szenario A: 0 % Einsparung an chemischen Grundstoffen gegenüber heute und 0 % Substitution an C-Fuels durch H₂.
- Szenario B: 25 % Einsparung an chemischen Grundstoffen gegenüber heute und 25 % Substitution an C-Fuels durch H₂.
- Szenario A: 50 % Einsparung an chemischen Grundstoffen gegenüber heute und 50 % Substitution an C-Fuels durch H₂.

Abb. A-5 zeigt, den anhand der Annahmen ermittelten Bedarf an chemischen Grundstoffen für die verschiedenen Szenarien. In Szenario A werden rd. 27,5 TWh/a an C-Fuels benötigt. In Szenario C ist der Gesamtbedarf auf die Hälfte bei zusätzlicher Substitution von C-Fuels reduziert.

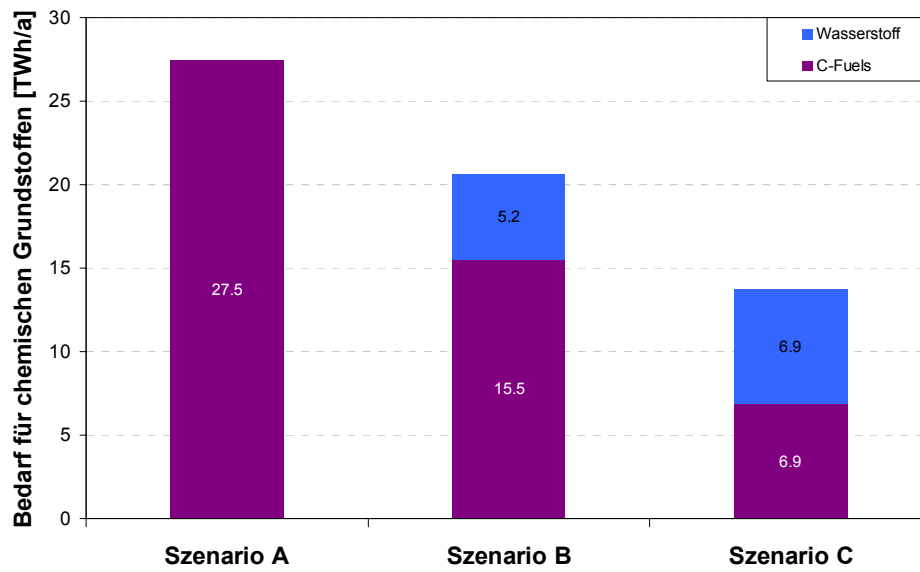


Abb. A-5: Zukünftiger Bedarf für chemische Grundstoffe in Baden-Württemberg; berechnet für Szenarien A – C.

A6: Zukünftig verfügbares Biomassepotenzial

Die Abschätzung des zukünftig verfügbaren Biomasse-Potenzials basiert auf den im Rahmen des Projektes Biogene Gase BW (2013) erhobenen Biomasse-Potenzialen (Jahr 2010) sowie ergänzenden Annahmen zur künftigen Dynamisierung der Potenziale für die Jahre 2020 bis 2050 (siehe Tabelle A-2).

Tab. A-2: Heutiges und zukünftig nachhaltig erschließbare Biomasse-Potenziale in Baden-Württemberg (Technisches Primärenergieträgerpotenzial) (Quelle: [8]; eigene Recherchen)

	2010	2020	2030	2040	2050
Sortimente	PJ/a	PJ/a	PJ/a	PJ/a	PJ/a
Trockene Biomasse-Sortimente	114	120	131	142	150
Energieholz (KUP)	5	7	15	24	31
Getreidestroh	19	21	22	23	23
Waldrestholz	36	38	40	41	42
Holz- u. halmgutartige (trockene) Biomasse aus Landschaftspflege-, Naturschutzfl., inkl. ext. bewirtsch. Überschussgrünland	14	14	14	14	14
Altholz	20	20	20	20	20
Industrie- und Sägerestholz	20	20	20	20	20
Feuchte Biomasse-Sortimente	57	62	62	62	62
Energiepflanzen (Mais, GPS, etc.)	19	24	24	24	24
Tierische Exkrememente	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Intensiv bewirtschaftetes Überschussgrünland	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Halmgutartige (feuchte) Biomasse aus Landschaftspflege- und Naturschutzflächen, inkl. ext. bewirtsch. Überschussgrünland	4	4	4	4	4
Organische Abfälle (Ind., Siedl., Gew.)	3	3	3	3	3
Klär-, Deponiegas, Klärschlamm	7	7	7	7	7
Reststoffe aus Verarbeitung/Industrie	12	12	12	12	12
GESAMT	171	182	194	204	212

Für das Jahr 2010 wird ein Biomasse-Potenzial für Baden-Württemberg in Höhe von 171 PJ abgeschätzt [8].

Die Potenziale an trockenen Biomasse-Sortimenten werden vorwiegend durch die Verfügbarkeit an Waldrestholz bestimmt. Ausgehend von den Literaturrecherchen im Rahmen des Projektes Biogene Gase BW (2013) wird ein Potenzial in Höhe von 36 PJ/a angesetzt. Altholz, Industrie- und Sägerestholz sowie Stroh nehmen mit jeweils rd. 20 PJ ebenfalls nennenswerte Anteile ein [8]. Dem Potenzial an Stroh liegt die Annahme zugrunde, dass auf 40 % der Getreide- und Rapsanbaufläche in BW das Stroh für energetische Zwecke entnommen werden kann; das restliche Stroh

steht u.a. für Humusbildung und Einstreu zur Verfügung. Das Potenzial an trockener holz- und halmgutartiger Biomasse von Landschaftspflege- und Naturschutzflächen sowie von extensiv bewirtschaftetem Überschussgrünland wird mit insgesamt 14 PJ abgeschätzt. Dies beinhaltet insbesondere Landschaftspflegeholz (u. a. nach Jenssen, S. 87) sowie Heu von extensiv bewirtschaftetem Überschussgrünland (nach Rösch et al. Annahme, dass rd. 70.000 ha Grünlandflächen als Überschussgrünland für die thermische Nutzung zur Verfügung stehen) [12], [13]. Das Potenzial an holzartigen Energiepflanzen (v. a. KUP) wird mit rund 5 PJ abgeschätzt, basierend auf der Annahme, dass gut 3 % der Ackerflächen in BW mit diesen Energiepflanzen bebaut werden können.

Die Potenziale an feuchten Biomasse-Sortimenten werden vorwiegend bestimmt durch den Anbau von Energiepflanzen wie z. B. Mais, Ackergräser und Ganzpflanzensilage. Es wird angenommen, dass diese Energiepflanzen auf 15 % der Ackerflächen in BW angebaut werden können. Hieraus resultiert ein technisches Primärenergieträgerpotenzial in Höhe von 19 PJ. Die Reststoffe aus der Verarbeitung/Industrie beinhalten sehr vielfältige Sortimente unterschiedlichster Eigenschaften; ihr Potenzial wird optimistisch auf 12 PJ geschätzt [8]. Organische Abfälle sowie Klär-, Deponiegas und Klärschlamm nehmen ein Potenzial von 10 PJ ein. Die Abschätzung des Potenzials an tierischen Exkrementen in Höhe von 6,5 PJ erfolgte konservativ, u. a. unter Berücksichtigung erforderlicher Mindestbetriebs- und Viehbestandsgrößen für den Betrieb von Biogasanlagen [8]. Substrate für den Einsatz in Biogasanlagen fallen auch auf intensiv bewirtschaftetem Überschussgrünland an, das nicht (mehr) für eine Tierfütterung erforderlich ist. Nach Rösch et al. stehen 45.000 ha Standard-Überschussgrünland zur Verfügung [13]. Unter Berücksichtigung von Ertragsangaben der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie (LAB) errechnet sich ein Potenzial in Höhe von 5,5 PJ. Feuchte halmgutartige Biomasse fällt zusätzlich von extensiv bewirtschaftetem Überschussgrünland an. In Anlehnung an Rösch et al. (2007) stehen rd. 35.000 ha extensive Grünlandflächen (Artenvielfalt, Streuobstwiesen) zur Verfügung. Hieraus wird ein technisches Primärenergieträgerpotenzial von rd. 2 PJ berechnet. Weiterhin wird abgeschätzt, dass weitere 2 PJ an halmgutartiger Biomasse bereit stehen z. B. aus der Pflege von Gewässerrandstreifen, Straßenbegleitgrün oder städtischen Grünflächen.

Für die Jahre 2020 bis 2050 wird mit einer Dynamisierung, d. h. Veränderung der Biomasse-Potenziale, gerechnet. Folgende Annahmen zur Dynamisierung wurden berücksichtigt:

- Erhöhung der künftig verfügbaren Anbauflächen für Energiepflanzen: max. 25 % der Ackerflächen in BW stehen bis zum Jahr 2050 für den Anbau von Energiepflanzen wie z.B. Mais, Ackergrassilage, Getreide-GPS und KUP zur Verfügung
- Ertragssteigerungen für Energiepflanzen und Stroh (jeweils substratspezifische Annahmen, siehe Tabelle A-3)
- Speziell für Waldrestholz: Annahme einer künftig (geringfügig) verbesserten Mobilisierbarkeit von Waldrestholz (siehe u. a. [14])

Tab. A-3: Annahmen zum Primärenergieertrag (Jahr 2010) und zu künftigen Ertragssteigerungen bei Energiepflanzen

	Primär- energie- ertrag ^{b)} GJ/(ha a)	Ertragssteigerungen			
		% per Jahr			
	2010	2010 bis 2020	2020 bis 2030	2030 bis 2040	2040 bis 2050
Maissilage	157	1,5	0,75	0,375	0,375
Ackergrassilage	133	1	0,5	0,25	0,25
Getreide-GPS	158	0,6	0,3	0,15	0,15
KUP	185	2,5	2	1	1
Getreidestroh ^{a)}	36	1	0,5	0,25	0,25

a) Annahme, dass 40% des anfallenden Strohs je Hektar energetisch genutzt wird; b) Angaben frei Anlage, d.h. Verluste sind hier berücksichtigt

Anhand der getroffenen Annahmen errechnen sich die Biomasse-Potenziale für die Jahre 2020 bis 2050 (siehe Tabelle A-2).

A7: Übersicht zu Kohlenstoffquellen in Deutschland

Tab. A-4: Übersicht zu CO₂- / C-Potenzial für die Erzeugung von C-Fuels in Deutschland

Carbon Resource	CO ₂	C	SNG Production Potential
	[t/a]	[t/a]	[TWh _{gas} /a]
Biogas Plants			
CH ₄ Gas Share	7.3 * 10 ⁶	2.0 * 10 ⁶	39
CO ₂ Gas Share	5.1 * 10 ⁶	1.4 * 10 ⁶	27
Energetic Biomass Utilisation in DE today (without Biogas)	73 * 10 ⁶	20 * 10 ⁶	385
Non-renewable Trash	25 * 10 ⁶	6.8 * 10 ⁶	130
Cement / Limestone Production	17 * 10 ⁶	4.8 * 10 ⁶	92
CCPP/CCU ¹⁾ (or SOFC/CCU)	27 * 10 ⁶	7.3 * 10 ⁶	135
Fossile Power Plants	309 * 10 ⁶	84 * 10 ⁶	1618
CO ₂ from Air			unlimited

¹⁾ Direct CO₂ recycling:

CCPP/CCU: Combined Cycle Power Plant / Carbon Capture and Utilisation
25 GW, 3000 h/a, η = 50 %, CO₂ retention: 90 %

SNG: Substitute Natural Gas

Quelle: Berechnung ZSW

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Technische Anwendungsbereiche von EE für die Bereitstellung von Wärme, Strom und chemischen Sekundär- / Endenergieträgern.	2
Abb. 2-1: Bedarf an C-basierten Sekundär- / Endenergieträgern in Baden-Württemberg in einem Energiesystem der Zukunft.	6
Abb. 3-1: Lösungsansatz für die hocheffiziente Nutzung des biogenen Kohlenstoffs bei der Erzeugung von regenerativem Wasserstoff und C-Fuels.	10
Abb. 3-2: Aufwand und Ertrag verschiedener Bioenergiepfade zur Erzeugung von gasförmigen und flüssigen C-Fuels.	11
Abb. 3-3: Aufwand und Ertrag verschiedener Bioenergiepfade unter Einkopplung von EE-Strom bei der Erzeugung von C-Fuels aus Biomasse.	13
Abb. 3-4: Bedarf an regenerativem Strom in Baden-Württemberg im Energiesystem der Zukunft für die verschiedenen Szenarien.	14
Abb. A-1: Endenergieverbrauch 2010 in Baden-Württemberg (nach [5]).	21
Abb. A-2: Zukünftiger Endenergiebedarf für Verkehr in Baden-Württemberg; berechnet für Szenarien A – C.	23
Abb. A-3: Zukünftiger Endenergiebedarf für Strom ohne Zusatzstrom für die Verlängerung der energetischen Reichweite der Biomasse in Baden-Württemberg; berechnet für Szenarien A – C.	25
Abb. A-4: Zukünftiger Endenergiebedarf für Wärme in Baden-Württemberg; berechnet für Szenarien A – C.	27
Abb. A-5: Zukünftiger Bedarf für chemische Grundstoffe in Baden-Württemberg; berechnet für Szenarien A – C.	29

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Zukünftig nachhaltig erschließbares Biomasse-Potenzial in Baden-Württemberg (Technisches Primärenergieträgerpotenzial) (nach [8]; eigene Recherchen)	7
Tab. A-1: Festlegung der Parametervariation in den verschiedenen Szenarien im Mobilitätssektor	22
Tab. A-2: Heutiges und zukünftig nachhaltig erschließbare Biomasse-Potenziale in Baden- Württemberg (Technisches Primärenergieträgerpotenzial) (Quelle: [8]; eigene Recherchen)	30
Tab. A-3: Annahmen zum Primärenergieertrag (Jahr 2010) und zu künftigen Ertragssteigerungen bei Energiepflanzen	32
Tab. A-4: Übersicht zu CO ₂ - / C-Potenzial für die Erzeugung von C-Fuels in Deutschland	33

Literaturverzeichnis

- [1] Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H.: „Energie aus Biomasse“, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Heidelberg: Springer, 2009 (S.13, S.31)
- [2] WM-BW: „Biomasse-Aktionsplan Baden-Württemberg – Erste Fortschreibung“, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2010
- [3] Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften: „Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen“, Haale (Saale), 2012
- [4] Jering, A., Klatt, A., Seven, J., Ehlers, K., Günther, J., Ostermeier, A., Mönch, L.: „Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen“; Umweltbundesamt; 2012
- [5] Schmidt, M., Staiß, F., Salzer, J., Nitsch, J.: „Gutachten zur Vorbereitung eines Klimaschutzgesetzes für Baden-Württemberg“, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, 2011
- [6] UM-BW: „Klimaschutzkonzept 2020Plus Baden-Württemberg“; Umweltministerium Baden-Württemberg (http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/103570/Klimaschutzkonzept_2020PLUS.pdf), 2011
- [7] Zittel, W., Zerhusen, J., Zerta, M.: „Fossil and Nuclear Fuels – the Supply Outlook“, Energy Watch Group / Ludwig-Boelkow-Foundation / Reiner-Lemoine-Foundation (www.energywatchgroup.org), 2013
- [8] Biogene Gase BW 2013: Erzeugung und Nutzung biogener Gase in Baden-Württemberg. Schlussbericht. Projektbeteiligte: IER (Universität Stuttgart), IFK (Universität Stuttgart), ITAS (KIT, Karlsruhe), DVGW (am Engler-Bunte-Institut, KIT Campus Süd), ZSW (Stuttgart), IAT (Universität Hohenheim). Finanzierung durch das Land Baden-Württemberg und das Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR) mit Mitteln der Baden-Württemberg Stiftung. Stuttgart, April 2013.

- [9] Keim, W., Röper, M.: „Rohstoffbasis im Wandel“, Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. (GDCh), Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA), Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (DGMK), Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI), 2010
- [10] UM-BW: „Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2010“; Umweltministerium Baden-Württemberg, 2011
- [11] Nitsch, J., Pregger, T., Naegler, T., Heide, D., de Tena, D.L., Trieb, F., Scholz, Y., Nienhaus, K., Gerhardt, N., Sterner, M., Trost, T., von Oehsen, A., Schwinn, R., Pape, C., Hahn, H., Wickert, M., Wenzel, B.: „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Ingenieurbüro für neue Energien, 2012
- [12] Jenssen, T. : Einsatz der Bioenergie in Abhängigkeit von der Raum- und Siedlungsstruktur. Viewag+Teubner. Wiesbaden. 372 Seiten, 2010
- [13] Rösch, C., Raab, K., Skarka, J., Stelzer, V.: Energie aus dem Grünland – eine nachhaltige Entwicklung? Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe, FZKA 7333, Karlsruhe; 2007
- [14] Kappler, G.O.: Systemanalytische Untersuchung zum Aufkommen und zur Bereitstellung von energetisch nutzbarem Reststroh und Waldrestholz in BW. Inauguraldissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwig-Universität Freiburg. Freiburg, Oktober 2007