



Basel | Berlin | Bremen | Brüssel  
Düsseldorf | Freiburg | München  
Stuttgart

Korrigierte Zusammenfassung Phase I  
**Stand 26.10.2017**  
Status-quo und Technologiepfade

# Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende

für  
Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWV)  
Institut für Wärme und Oeltechnik e.V. (IWO)  
MEW Mittelständische Energiewirtschaft Deutschland e.V.  
UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V.

Projektleitung  
Jens Hobohm  
(Prognos AG)

Hans Dambeck  
Hanno Falkenberg  
Dr. Andreas Kemmler  
Sylvie Koziel  
Paul Wendring  
Inka Ziegenhagen

Benedikt Meyer (FhG  
UMSICHT)  
Martin Dotzauer (DBFZ)

Berlin, 26.10.2017  
28456

**Das Unternehmen im Überblick****Geschäftsführer**

Christian Böllhoff

**Präsident des Verwaltungsrates**

Dr. Jan Giller

**Handelsregisternummer**

Berlin HRB 87447 B

**Rechtsform**

Aktiengesellschaft nach schweizerischem Recht

**Gründungsjahr**

1959

**Tätigkeit**

Die Prognos AG berät europaweit Entscheidungsträger aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Auf Basis neutraler Analysen und fundierter Prognosen entwickeln wir praxisnahe Entscheidungsgrundlagen und Zukunftsstrategien für Unternehmen, öffentliche Auftraggeber sowie internationale Organisationen.

**Arbeitssprachen**

Deutsch, Englisch, Französisch

**Hauptsitz**

Prognos AG  
St. Alban-Vorstadt 24  
4052 Basel | Schweiz  
Telefon +41 61 3273-310  
Telefax +41 61 3273-300

Prognos AG  
Domshof 21  
28195 Bremen | Deutschland  
Telefon +49 421 517046-510  
Telefax +49 421 517046-528

Prognos AG  
Schwanenmarkt 21  
40213 Düsseldorf | Deutschland  
Telefon +49 211 91316-110  
Telefax +49 211 91316-141

Prognos AG  
Nymphenburger Str. 14  
80335 München | Deutschland  
Telefon +49 89 9541586-710  
Telefax +49 89 9541586-719

**Internet**

info@prognos.com  
www.prognos.com  
twitter.com/prognos\_ag

**Weitere Standorte**

Prognos AG  
Goethestr. 85  
10623 Berlin | Deutschland  
Telefon +49 30 520059-210  
Telefax +49 30 520059-201

Prognos AG  
Résidence Palace, Block C  
Rue de la Loi 155  
1040 Brüssel | Belgien  
Telefon +32 28089-947

Prognos AG  
Heinrich-von-Stephan-Str. 23  
79100 Freiburg | Deutschland  
Telefon +49 761 7661164-810  
Telefax +49 761 7661164-820

Prognos AG  
Eberhardstr. 12  
70173 Stuttgart | Deutschland  
Telefon +49 711 3209-610  
Telefax +49 711 3209-609

## **Inhalt**

<b>1</b>	<b>Abstract</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Status-quo-Analyse</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Technologie- und Potenzialanalyse</b>	<b>5</b>
	4.1 Biomasse	5
	4.2 Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien	6
	4.3 Power-to-Liquid	8
<b>5</b>	<b>Ausblick</b>	<b>12</b>

# 1 Abstract

Flüssige Energieträger und Rohstoffe haben heute eine erhebliche Bedeutung im Energiemix und bilden die Grundlage für wichtige industrielle Wertschöpfungsketten in Deutschland (u. a. für die Chemieproduktion).

Vor allem in Teilen des **Verkehrssektors** sowie in der **chemischen Industrie** sind flüssige Energieträger und Rohstoffe **nicht oder nur schwer zu ersetzen**. In anderen Bereichen, die bisher zu großen Teilen mit flüssigen Energieträgern versorgt werden, wie etwa im Pkw-Verkehr und im Wärmesektor, wird sich ein **Wettbewerb** zwischen THG-neutralen Energieträgern und Systemen (einschl. Power-to-Liquid, PtL) einstellen.

Da flüssige Energieträger weiter benötigt werden, ist die Entwicklung des Technologiepfads Power-to-Liquid unter Klimaschutzaspekten eine **No-Regret-Maßnahme**. Erneuerbar hergestellte flüssige Energieträger und Rohstoffe auf Basis von PtL (E-Fuels und Feedstock) haben für die Energiewende signifikante Vorteile, z.B. die universelle Einsatzfähigkeit, die Speicherfähigkeit und die Möglichkeit bestehende Infrastruktur und Anwendungen weitgehend weiter nutzen zu können. Je nach Standortbedingungen können im Jahr 2050 treibhausgasneutrale E-Fuels und Feedstock bei einer Kapitalverzinsung von 2 % für rund 0,5 bis 0,9 €/Liter Rohöläquivalent hergestellt werden, bei einem Zinssatz von 7 % sind Produktionskosten von 0,7 bis 1,3 €/Liter zu erwarten.

Flüssige Energieträger und Rohstoffe auf Basis von **Biomasse** sind vielfältig einsetzbar und können eine wichtige Ergänzungsfunktion einnehmen, um die THG-Emissionen zu reduzieren. Je nach Technologie treten unterschiedlich hohe Kosten auf. Biomassen sollten daher dort eingesetzt werden, wo sie den größten Nutzen stiften.

Für die Reduktion der THG-Emissionen wird die **Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien** eine immer wichtigere Rolle spielen. Heute ist jedoch das von der Gesellschaft akzeptierte und damit machbare nationale Stromerzeugungs-**Potenzial unklar**. Auch daher sind alternative THG-Minderungsoptionen und Energieimporte (z. B. in Form von PtL) erforderlich, um die Energie- und Rohstoffversorgung in Deutschland sicherzustellen. Dies gilt erst recht, da viele Länder (erheblich) größere Potenziale und günstigere Erzeugungsbedingungen für erneuerbare Energien haben als Deutschland.

Hinweis: Gegenüber der Fassung vom 30.09.2017 musste der Zwischenbericht aufgrund eines Rechenfehlers korrigiert werden. Dieser Fehler betraf die Kosten der PtL Produktion, die Gegenstand des Abstracts und von Kapitel 4.3 sowie insbesondere von Abbildung 4 sind. Die PtL Kosten liegen nun etwas höher als in der Fassung vom 30.09.2017, die Bandbreite hat sich nach oben verschoben.

## 2 Aufgabenstellung

Eine wichtige Voraussetzung für das Gelingen der Energiewende ist die **Ausbalancierung** der **Kriterien des energiepolitischen Zieldreiecks**. Auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts sind Versorgungssicherheit, ein wirksamer Klima- und Umweltschutz sowie eine wirtschaftlich tragfähige Energieversorgung gleichrangige Ziele. Dabei soll Deutschland auch langfristig ein wettbewerbsfähiger Industriestandort bleiben – wie die Bundesregierung in ihrem Energiekonzept von 2010 bereits feststellt. Bei der Umsetzung der Energiewende in Deutschland sind zudem Akzeptanzfragen in der Bevölkerung sowie der internationale Kontext zu berücksichtigen.

Eine erfolgreiche Energiewende setzt grundsätzlich Nutzungstechnologien, Energieträger und Rohstoffe voraus, die möglichst emissionsfrei bzw. treibhausgasneutral sind. Eine große Bedeutung wird hierbei der weitgehend treibhausgasneutralen **Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien** beigemessen, der in der endenergetischen Anwendung sowohl in der direkten Nutzung als auch in Form von speicherbaren E-Fuels oder in der stofflichen Anwendung als Chemie-Feedstock nutzbar gemacht werden kann.

Trotz der großen Bedeutung von Strom geht keine der zahlreichen aktuellen Energiewendestudien davon aus, dass eine **vollständige Umstellung** aller Nutzungen von Energie auf Strom möglich ist. Dies liegt u. a. am begrenzten inländischen Stromerzeugungspotenzial, vor allem aber an der aufwändigen Speicher- und Transportierbarkeit von Elektrizität. Der bisweilen verwendete Begriff einer „All Electrical Society“ führt somit in die Irre, da Fragen wie die Energieversorgung von Flugzeugen oder die stoffliche Nutzung von flüssigen Rohstoffen zur Herstellung vielfältiger Produkte des Alltags unbeantwortet bleiben.

Mögliche weitgehend treibhausgasneutrale alternative Energieträger und Rohstoffe für die stoffliche Nutzung können erneuerbare Biomasse oder mit Hilfe von Strom aus erneuerbaren Energien erzeugte Energieträger (E-Fuels und Feedstock) sein. Vereinfacht ausgedrückt wird dabei Wasserstoff aus erneuerbarer Erzeugung mit Kohlendioxid z.B. aus der Luft zu einem treibhausgasneutralen Kohlenwasserstoff zusammengesetzt.

Die **Verbände der Mineralölwirtschaft** haben die Prognos AG beauftragt, eine **Analyse** zu Status Quo und Perspektiven flüssiger Energieträger und Rohstoffe in der Energiewende vorzunehmen, in der folgende **Fragestellungen** untersucht werden:

- Welche Bedeutung hat heute Mineralöl als Energieträger, Rohstoff und Wirtschaftsfaktor für Deutschland und welche Bedeutung haben langfristig flüssige Energieträger und Rohstoffe in den einzelnen Verbrauchssektoren? Wo werden sie nicht oder nur schwer zu ersetzen sein?
- Welchen Beitrag können flüssige Energieträger und Rohstoffe auf Basis von Biomasse leisten, um die THG-Emissionen zu reduzieren?
- Reicht das in Deutschland verfügbare Potenzial erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung aus, um alle Verbrauchssektoren THG-neutral zu stellen?
- Welche technologischen Fortschritte und welche Kosten für die Herstellung weitgehend treibhausgasneutraler flüssiger Energieträger und Rohstoffe sind erreichbar?
- Welche Perspektiven für flüssige Energieträger und Rohstoffe ergeben sich aus den Ergebnissen?

### 3 Status-quo-Analyse

**Flüssige Energieträger und Rohstoffe** haben heute eine **erhebliche Bedeutung** im Energiemix und bilden die Grundlage für wichtige industrielle Wertschöpfungsketten in Deutschland (u. a. für die Chemieproduktion).

Flüssige Energieträger (auf Basis von Roh- und Pflanzenölen) tragen heute zu mehr als einem **Drittel zum deutschen Primärenergieverbrauch** bei und sind damit anteilmäßig die wichtigsten Energieträger in Deutschland. Flüssige Energieträger haben einen Anteil von über 99 % bei der Energieversorgung des Straßenverkehrs, der Luftfahrt und der Schifffahrt sowie von rund einem Viertel bei der Hauswärmeversorgung.

Diese hohe Marktbedeutung flüssiger Energieträger basiert sowohl auf den physikalisch-technischen **Eigenschaften** des Energieträgers (z. B. hohe Energiedichte, hohe technische Zuverlässigkeit), auf den ausgereiften **Anwendungen**, der verlässlichen Versorgungsstruktur, der Wettbewerbsfähigkeit sowie der Speicherbarkeit entlang der Versorgungskette bis zum Ort der Verwendung.

Flüssige Kohlenwasserstoffe liefern zudem für die organische Chemieproduktion mit rund 74 % den größten Teil der **Rohstoffbasis**. Die enge Vernetzung und der Energie- sowie der Produktaustausch der in Deutschland wichtigen Industriesektoren Raffination, Petrochemie, Chemie und Kunststoffverarbeitung führt zu wertvollen Verbundeffekten und trägt entscheidend zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit bei.

Nationale und internationale Klimaschutzanforderungen werden die zukünftige Nutzung flüssiger Energieträger maßgeblich beeinflussen. Grundsätzlich können mineralölbasierte flüssige Kohlenwasserstoffe **schrittweise THG-ärmer** und langfristig (dann ohne Mineralöl) vollständig THG-neutral produziert und verwendet werden.

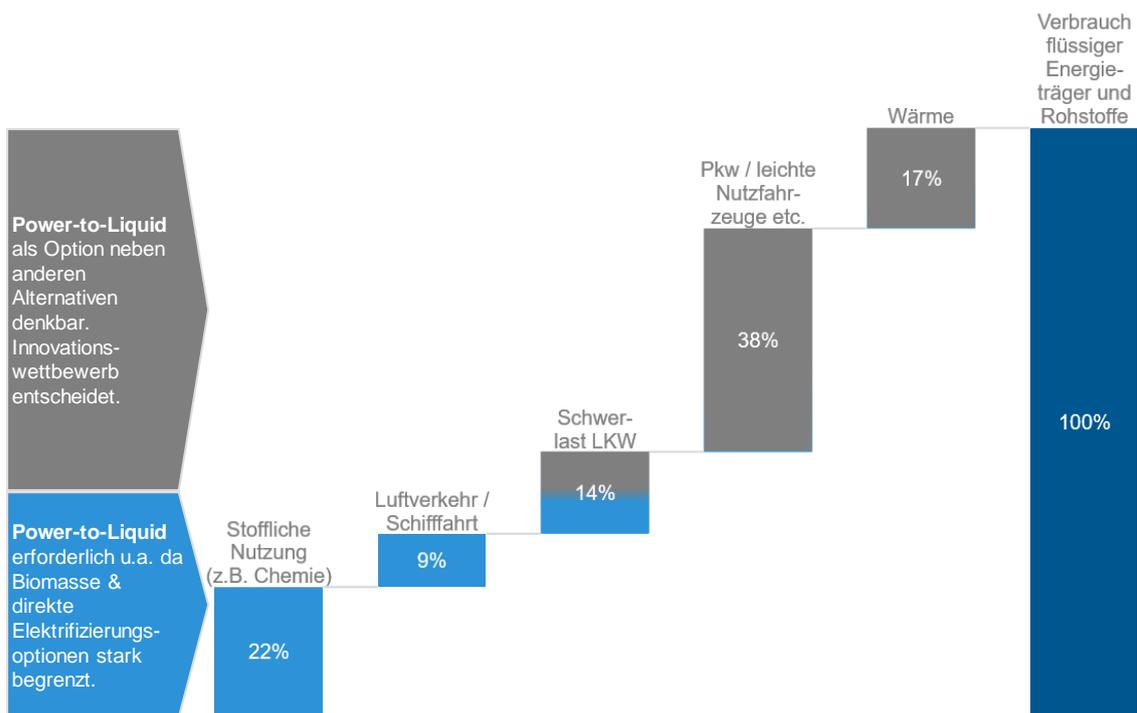
Dazu gibt es verschiedene **Optionen**, wie z. B.

- die **direkte Einbindung von Strom** aus erneuerbaren Energien sowie die Verwendung von aus erneuerbarem Strom hergestellten **Wasserstoff** in den Produktionsprozess der **Raffinerien**,
- die Erhöhung des **Biomasseanteils** in der Rohstoffbasis (z. B. Pflanzenöle, Pyrolyseöle),
- die Nutzung der **Power-to-Liquid (PtL)** und Biomass-to-Liquid (BtL, PtBtL)-Technologien als langfristige Perspektive, die das Potenzial haben, den CO<sub>2</sub>-Kreislauf zu schließen und damit auch in einer Welt ambitionierter Klimaschutzpolitik THG-neutrale flüssige Kohlenwasserstoffe nutzen zu können.

Es wird nach heutigem Wissensstand verschiedene Bereiche geben, die aufgrund der hohen Anforderungen an die Energiedichte, Speicher- und Transportfähigkeit sowie dem Bedarf an einer Kohlenstoffquelle für die stoffliche Nutzung **langfristig auf flüssige Energieträger und Rohstoffe** weitestgehend **angewiesen** bleiben. Dazu zählen im Verkehrssektor: der Schiffs- und Luftverkehr sowie voraussichtlich Teile des Straßenverkehrs insbesondere des Schwerlast- bzw. Straßengüterfernverkehrs. Zudem sind flüssige Kohlenwasserstoffe als wichtigster Rohstoff der Chemieproduktion kaum zu ersetzen. Das heißt: Da flüssige Energieträger weiter benötigt werden, ist die Entwicklung des Technologiepfads Power-to-Liquid unter Klimaschutzaspekten eine **No-Regret-Maßnahme**.

In **anderen Bereichen**, die bisher zu großen Teilen mit flüssigen Energieträgern und Rohstoffen versorgt werden, wie etwa im Pkw-Verkehr und im Wärmesektor, konkurrieren die verschiedenen THG-neutralen Energieträger und Systeme (einschl. PtL) miteinander. Dies ist im Allgemeinen von Vorteil für den Verbraucher. Ein technologieoffener Wettbewerb zwischen den THG-neutralen Energieträgern ist eine wesentliche Voraussetzung für die kosteneffiziente Umsetzung der Energiewende ebenso wie Effizienzsteigerungen bei der Energieverwendung.

Abbildung 1: Perspektiven flüssiger Energieträger



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Mineralölstatistik. Anteile der Nutzungsbereiche flüssiger Energieträger und Rohstoffe am Gesamtabsatz von ca. 110 Mio. t im Jahr 2016

## 4 Technologie- und Potenzialanalyse

Um die Sektoren, in denen heute flüssige Energieträger und Rohstoffe eingesetzt werden, weitgehend treibhausgasneutral zu versorgen, stehen verschiedene Optionen zur Verfügung. Entscheidend für die politisch gewollte Minderung der Treibhausgasemissionen durch nachwachsende Rohstoffe und/oder Strom aus erneuerbaren Energien sind ausreichende Erzeugungspotenziale. Wieviel nachhaltige Biomasse und wieviel Strom aus erneuerbaren Energien können in Deutschland nachhaltig erzeugt werden? Welches Potenzial haben alternative THG-Minderungsoptionen wie PtL und zu welchen Kosten können sie hergestellt werden?

### 4.1 Biomasse

**Flüssige Energieträger und Rohstoffe auf Basis von Biomasse sind vielfältig einsetzbar und können eine wichtige Ergänzungsfunktion einnehmen, um die THG-Emissionen zu reduzieren. Das inländische Potenzial ist aber begrenzt. Die Kosten von Biofuels variieren je nach Herstellungspfad stark.**

Die globalen Biomassepotenziale sind erheblich – bis nahezu ein Viertel des globalen Primärenergieverbrauchs könnten weltweit durch Biomasse gedeckt werden. Allerdings sind die Biomasse-Potenziale regional sehr unterschiedlich verteilt und das Biomasse-Potenzial in Deutschland ist aufgrund dichter Besiedlung und anderer alternativer Flächennutzungen begrenzt. Wir gehen davon aus, dass die in Deutschland nachhaltig nutzbaren Biomasse-Potenziale bei rund 1.000 bis rd. 1.600 PJ liegen, je nachdem, ob Energiepflanzen (in unserer Analyse auf 2,5 Mio. Hektar bzw. 25.000 km<sup>2</sup> begrenzt) mit einbezogen werden. 1.600 PJ entspricht etwa 12 % des heutigen deutschen Primärenergiebedarfs.

Für die energetische und stoffliche Nutzung von Biomasse stehen eine Vielzahl von technischen Konversionsverfahren bereit. Biomasse bietet eine hohe Flexibilität zwischen Wärme, Strom, flüssigen Energieträgern und stofflicher Kohlenstoffnutzung. Heute wird Biomasse u. a. zu Pflanzenölen, FAME (Fettsäuremethylester) oder Ethanol (Biokraftstoffe der 1. Generation) umgewandelt.

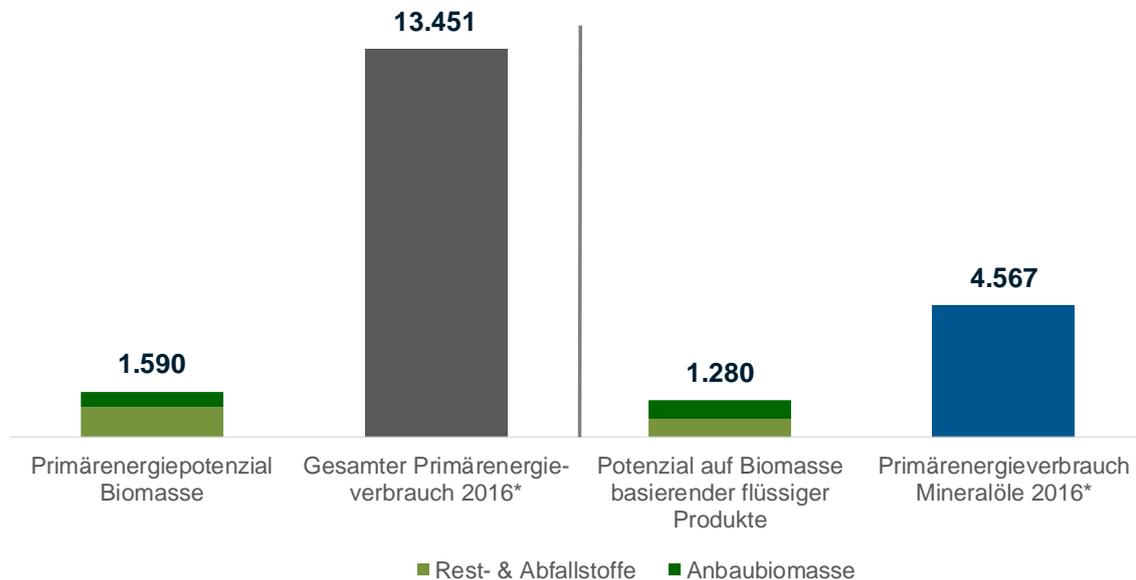
Aus Biomasse können auch **synthetische flüssige Energieträger und Rohstoffe** (Biomass-to-Liquids, BtL) hergestellt werden; die hierfür erforderlichen Syntheseverfahren können mit Elektrolysewasserstoff aus erneuerbarem Strom kombiniert werden (Power-and-BtL); dabei ist die Nutzung von Elektrolysewasserstoff jedoch durch das nationale Stromangebot aus erneuerbaren Energien limitiert. Durch die Verknüpfung von BtL und erneuerbarem Elektrolysewasserstoff kann die zur Verfügung stehende inländische Biomasse besser ausgenutzt werden – die spezifischen PtBtL-Bereitstellungskosten fallen niedriger aus als für BtL. Inländische Biomasse steht zwar nur begrenzt zur Verfügung; synthetische Biokraftstoffe könnten jedoch eine wichtige Ergänzung zur Abdeckung flüssiger Energiebedarfe sowie stofflicher Anwendungen liefern, zumindest in der Übergangsphase bis zu umfassender Nutzbarkeit synthetischer Kraft- und Brennstoffe (PtL)

In einer Modellrechnung wurde ein Potenzial von bis zu rd. 1.300 PJ für BtL zur Deckung flüssiger Energiebedarfe sowie stofflicher Anwendungen ermittelt. Damit könnten z.B. 28 % des heutigen Primärenergieverbrauchs an Mineralöl ersetzt werden. Das Potenzial und die Verwendungsmöglichkeiten von Biomasseimporten wurde nicht explizit untersucht.

Die **Kosten** der Erzeugung von flüssigen Zwischenprodukten (BtL) in Deutschland dürften bei 20 bis 26 €/kWh (2 % Zins) bzw. 24 bis 30 €/kWh (7 % Zins) liegen. Damit sind BtL eine relativ teure Option, unter anderem, weil aufgrund kleinerer Anlagen nicht die gleichen Skaleneffekte erreicht werden dürften wie bei PtL.

Der **tatsächliche Einsatz** („Allokation“) der Biomasse sollte sich einerseits nach der Rohstoff-Effizienz, andererseits danach richten, welche alternativen Einsatzmöglichkeiten in einem Verwendungssektor zu welchen Kosten bestehen. Diese Fragen werden im weiteren Verlauf der Untersuchung vertieft.

Abbildung 2: Potenzial von Biomasse in Deutschland im Vergleich mit dem Primärenergieverbrauch



Quelle: DBFZ(Potenziale), \* AG Energiebilanzen (vorläufige Angaben)

## 4.2 Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien

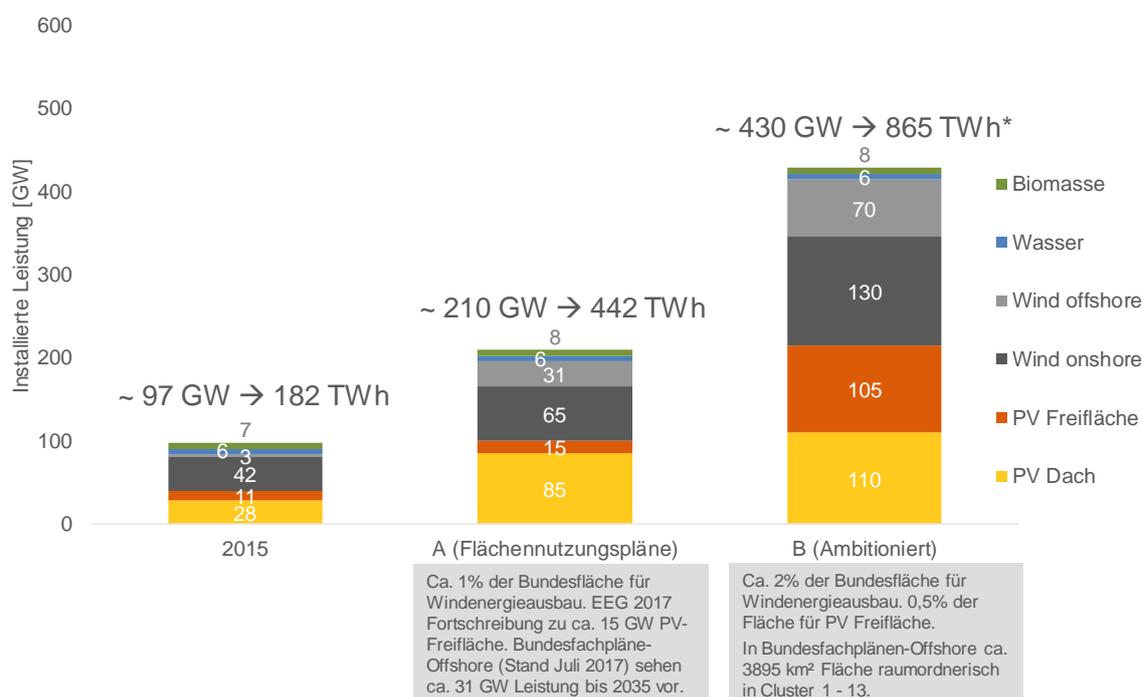
Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird bei der Reduktion der THG-Emissionen eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Zwar hat Deutschland genug Flächen zur Aufstellung von Wind- und Solaranlagen, auf lange Sicht könnte aber u.a. die fehlende Akzeptanz den Ausbau der EE-Stromerzeugung einschränken. Somit hat Deutschland ein vitales Interesse am Aufbau von treibhausgasneutralen Importoptionen, um die Energie- und Rohstoffversorgung in Deutschland sicherzustellen.

Strom kann durch erneuerbare Energien weitgehend THG-neutral erzeugt werden. Das inländische Potenzial erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung ist jedoch von der gesellschaftlichen Akzeptanz bei der Flächennutzung abhängig. Schon zur Erschließung der

heutigen Flächennutzungspläne bedarf es eines politischen und gesellschaftlichen Konsenses. Schöpft man heutige Flächennutzungspläne<sup>1</sup> vollständig aus, so könnten 442 TWh Strom erzeugt werden. Werden 2 % der Bundesfläche für Onshore-Windenergie und 0,5 % für Photovoltaik (PV) (zusammen knapp 9.000 km<sup>2</sup>) genutzt, so ergeben sich zusammen mit den anderen Optionen (Offshore-Windenergie, PV auf Dächern, Biomasse, Wasserkraft) 865 TWh Stromerzeugungspotenzial. Ob ein Ausbau in dieser Größenordnung nachhaltig und gesellschaftlich durchsetzbar ist, ist noch nicht absehbar.

Unabhängig davon gibt es für den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten eine Reihe von Voraussetzungen, wie z.B. die Akzeptanz für den Ausbau der Übertragungsnetze, die technische Realisierbarkeit von Stromanwendungen in den Verbrauchssektoren, die Investitionen bei den Endanwendungen sowie die Notwendigkeit einer flächendeckend unterbrechungslosen Strombedarfsdeckung durch eine zunehmend volatile Stromerzeugung. Der Spitzenlastbedarf muss auch dann gesichert werden, wenn Wind und Sonne nicht verfügbar sind, was entsprechende Reserve-Kapazitäten erfordert.

Abbildung 3: Mögliche installierbare Leistung und Stromerzeugungspotenzial erneuerbarer Energien in Deutschland nach Quellen



\* Perspektivisch weitere Offshore-Leistung durch Offshore Cluster 14, ein bisher noch nicht entwickeltes Offshore Cluster mit großer Küstenentfernung, mit 2715 km<sup>2</sup> Fläche und weiteren ~ 50 GW installierbarer Leistung und ~ 200 TWh Erzeugungspotenzial. (Vgl. Bundesfachplan Offshore für Nordsee/Ostsee des BSH, Stand 2017)

<sup>1</sup> Flächennutzungspläne für Onshore Windenergie. Offshore, PV gemäß Erläuterung im grauen Kasten.

Zum Vergleich: Der **Bruttostromverbrauch Deutschlands** lag im Jahr 2016 bei 595 TWh.

Wie sich der **Stromverbrauch** in Deutschland **künftig** entwickelt, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab; die zunehmende Elektrifizierung energieverbrauchender Aktivitäten allein - sowohl heutiger wie auch weiterer künftiger - führt trotz bedarfssenkender Effizienzverbesserungen zu steigendem Strombedarf. So gehen die meisten von über 20 ausgewerteten Szenarien verschiedener Autoren von einem steigenden Strombedarf in Deutschland aus. Die Erwartungen des Stromverbrauchs im Jahr 2050 liegen in den ausgewerteten Studien zwischen 440 und 1.100 TWh.

Aus Gründen der Versorgungssicherheit dürfte eine massive Ausweitung der Netto-Stromimporte (also nach Abzug der Exporte) nicht in Frage kommen. Auch könnten ökonomische Gründe gegen Stromimporte sprechen, wenn Erzeugungs- und Transportkosten (Netzausbau bis zur deutschen Grenze) für den Strom über den inländischen Erzeugungskosten liegen. Es ist daher davon auszugehen, dass es eine Präferenz für eine Stromerzeugung im Inland gibt. Zudem wird im Rahmen dieser Untersuchungen die Annahme getroffen, dass alle anderen europäischen Länder zur Erreichung eigener ambitionierter Klimaziele die Deckung ihres Strombedarfs jeweils aus eigenen Wind- und PV-Anlagen präferieren werden. Gleichwohl wird der grenzüberschreitende Stromaustausch an Bedeutung gewinnen, da er eine wichtige Flexibilitätsoption für das Stromsystem der Zukunft darstellt.

Insgesamt gehen die meisten Studien derzeit davon aus, dass das inländische Potenzial erneuerbarer Energien ausreichen wird, um den Strom-Endenergiebedarf eines Jahres zu decken. Dies hängt jedoch entscheidend vom Elektrifizierungsgrad und den Annahmen zur Effizienzentwicklung ab. Außerdem ist hierzu eine deutliche Steigerung der bereitgestellten Flächen gegenüber heutigen Flächennutzungsplänen erforderlich. Auf die weiteren Voraussetzungen hierfür wurde bereits hingewiesen. Für eine großindustrielle Erzeugung treibhausgasneutraler flüssiger (oder gasförmiger) Energieträger und Rohstoffe hierzulande dürfte es hingegen nicht ausreichen. Das heißt: Alternative THG-Minderungsoptionen und Energieimporte (wie auch heute) sind notwendig.

### 4.3 Power-to-Liquid

**Erneuerbar hergestellte flüssige Energieträger und Rohstoffe (PtL) haben für die Energiewende signifikante Vorteile. Je nach Standortbedingungen können im Jahr 2050 treibhausgasneutrale E-Fuels und Feedstock bei einer Kapitalverzinsung von 2 % für rund 0,5 bis 0,9 €/Liter Rohöläquivalent hergestellt werden, bei einem Zinssatz von 7 % sind Produktionskosten von 0,7 bis 1,3 €/Liter zu erwarten.**

Als derzeit aussichtsreichste Technologie zur großindustriellen Herstellung von THG-neutralen flüssigen Energieträgern und Rohstoffen wird „Power to Liquid“ (PtL) angesehen. Hierbei wird Wasserstoff aus erneuerbarer Erzeugung mit Kohlendioxid zu einem treibhausgasneutralen Kohlenwasserstoff zusammengesetzt. Das Kohlendioxid kann z.B. aus der Luft extrahiert werden. Für die Gestehungskosten von PtL sind niedrige Stromkosten und hohe Volllaststunden von besonderer Bedeutung, da sie den Gesamtpreis des

Endprodukts entscheidend beeinflussen. Daher sollte PtL in energiewirtschaftlich relevanten Größenordnungen dort erzeugt werden, wo diese Bedingungen vorliegen. Hierfür kommen bestimmte Regionen Europas in Frage. Die Produktion wäre aber vor allem auch außerhalb Europas besonders sinnvoll, **da sie ökonomische Vorteile aufweist**. Dort können aufgrund der meteorologischen Bedingungen geringere Stromgestehungskosten und höhere Vollaststunden erzielt werden und die ausländischen Potenziale erneuerbarer Energien sind zum Teil erheblich größer als in Deutschland. Es erscheint aber sinnvoll, in Deutschland **Demonstrationsanlagen** für PtL zu errichten, um den Markthochlauf vorzubereiten.

Die wichtigsten Technologien der Herstellung von PtL sind das Fischer-Tropsch-Verfahren (FT) und die Methanol-Synthese. Beide Verfahren bieten den Vorteil, dass sich viele treibhausgasneutrale Produkte mithilfe der vorhandenen Infrastruktur, wie z. B. den Raffinerien, daraus erzeugen lassen. Über die Methanol-Route kann entweder Methanol als Zwischenprodukt für die Chemie gewonnen werden oder können mittels weiterer chemischer Verfahren (Olefinsynthese, Oligomerisation und Hydrotreatment) Benzin, Diesel und Kerosin hergestellt werden. Das FT-Verfahren bietet die niedrigsten Herstellungskosten.

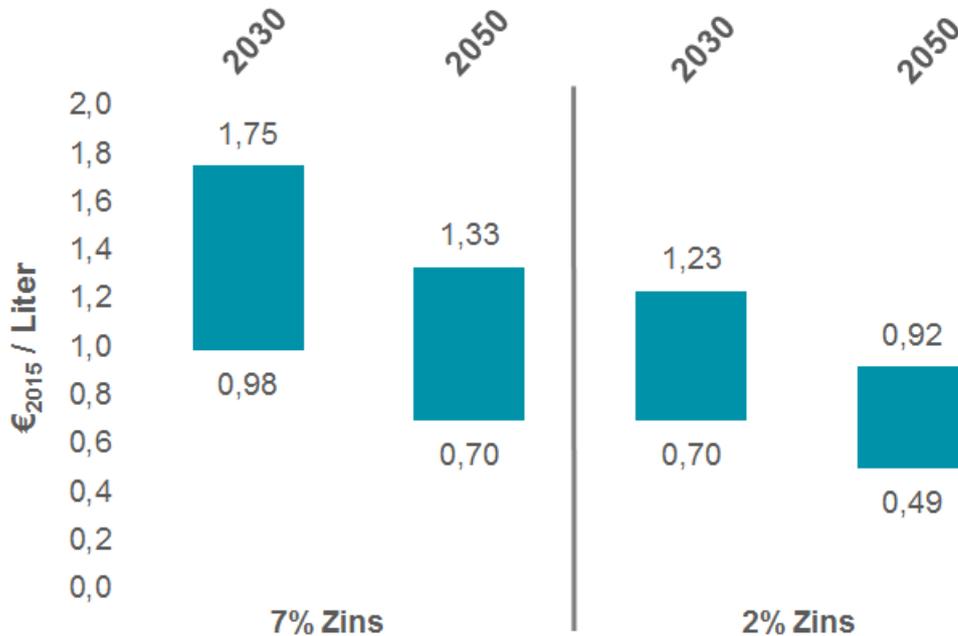
**Treibhausgasneutrales E-Fuels und Feedstock** können langfristig (2050) unter der Annahme eines Zinssatzes von 2 % zu **Kosten** von rd. 5,2 bis 9,6 €/kWh (0,5 bis 0,9 €/Liter), bei 7 % für 7,3 bis 13,9 €/kWh (ca. 0,7 bis 1,3 €/Liter) erzeugt werden (ohne Raffination).<sup>2</sup>

Diese Werte sind allerdings nicht im nationalen Alleingang zu erreichen, da sonst die erforderlichen Lerneffekte nicht realisiert werden können. Unter günstigen Bedingungen rücken E-Fuels (FT-Pfad) im Jahr 2050 in die Nähe von heutigen konventionellen Kraftstoffen. Zum Vergleich: Ein Preis von 50 (bzw. 100) \$/Barrel für fossiles Rohöl entspricht ca. 0,26 (0,52) €/Liter.

---

<sup>2</sup> Dabei gilt der untere Wert der angegebenen Bandbreite für optimale Standortannahmen und einen hohen Wirkungsgrad und der obere für ungünstigere Standortannahmen und einen schlechteren Wirkungsgrad der Elektrolyse. Ein Liter PtL hat einen Heizwert von 9,56 kWh.

Abbildung 4: Bandbreite der Erzeugungskosten von PtL 2030 und 2050 (Fischer-Tropsch-Verfahren)<sup>1</sup>



Quelle: Fraunhofer UMSICHT (Stromkosten: Prognos)

Es wurde untersucht, welchen Einfluss verschiedene Faktoren auf die Kosten nehmen (**Sensitivitätsanalyse**). Dabei stellte sich heraus, dass die folgenden Parameter besonders wichtig sind:

- Der Wirkungsgrad der Elektrolyse nimmt den größten Einfluss auf die Kosten, da er unmittelbar auf den Output der Anlagen wirkt.
- Investitionskosten: Die Anlagen sind kapitalintensiv. Die Betriebskosten sind hingegen von untergeordneter Bedeutung.
- Gesamtkapitalverzinsung (hier: „Zins“, gemeint ist stets der Real-Zins): Wegen der hohen Kapitalintensität ist die angesetzte Kapitalverzinsung ein wichtiger Einflussfaktor. Aus diesem Grund wurden oben Ergebnisse für zwei verschiedene Zinssätze (2 %, 7 %) dargestellt.
- Stromkosten: Wegen des Strombedarfs zur Erzeugung des Wasserstoffs sind die Stromkosten ein wichtiger Einflussfaktor. Auch hier fließt die geforderte Kapitalverzinsung in die Kosten ein.

**THG-neutrale flüssige Energieträger und Rohstoffe (E-Fuels und Feedstock) haben gegenüber alternativen THG-Minderungsoptionen signifikante Vorteile:**

1. Flüssige Energieträger und Rohstoffe sind technisch in allen Verbrauchssektoren einsetzbar, es entfallen aufwändige und kostenintensive Umrüstungen.

2. Für ihren Transport von der Erzeugung bis zum Ort des Verbrauches können teilweise die heutigen Transport- und Infrastrukturen genutzt werden. Die Versorgung erfolgt netzunabhängig.
3. Sie sind entlang der gesamten Versorgungskette speicherbar, weltweit handelbar und gewährleisten damit eine hohe Versorgungssicherheit für den Industriestandort Deutschland.
4. Flüssige Energieträger auf Basis von PtL, BtL oder PtBtL können die Treibhausgasemissionen in allen heutigen Verbrauchsbereichen entscheidend reduzieren.
5. Flüssige Energieträger und Rohstoffe auf Basis von PtL, BtL oder PtBtL bieten die Möglichkeit, den erheblichen stofflichen Kohlenstoffbedarf treibhausgasneutral zu decken. Nur mit ihnen ist die Chemieindustrie Deutschlands in einem treibhausgasneutralen Szenario denkbar.
6. Durch eine problemlose Beimischung zu den heutigen fossilen flüssigen Energieträgern können THG-neutrale flüssige Kraft- und Brennstoffe stufenweise zu einer CO<sub>2</sub>-Reduktion bis hin zur vollständigen Treibhausgasneutralität beitragen (Drop-In-Fähigkeit von 0 bis 100 %).

## 5 Ausblick

Um diese Vorteile für die deutsche Energiewende nutzbar zu machen sind erhebliche Anstrengungen erforderlich. Die Errichtung von großen Wind- und Solarparks sowie integrierten Produktionsanlagen aus Meerwasserentsalzung, Kohlendioxid-Abscheidung, Elektrolyse und Synthese ist ein komplexes und kapitalintensives Unterfangen. Hierzu bedarf es stabiler Rahmen- und Investitionsbedingungen. Im weiteren Verlauf der Untersuchung sollen zwei Szenarien der deutschen Energieversorgung unter realistischen Bedingungen sowie Handlungsempfehlungen erarbeitet werden, wie der Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur in die Wege geleitet werden kann.