

**POSITIONSPAPIER**

# **Fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe: Für Klimaschutz im globalen Rohstoffwandel**

**Positionspapier des ProcessNet-Arbeitsausschusses  
„Alternative flüssige und gasförmige Kraft- und  
Brennstoffe“**

## IMPRESSUM

### Mitwirkende:

Dr.-Ing. Bernd Benker	CUTEC-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld
Dieter Bockey	Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP), Berlin
Prof. Dr. Nicolaus Dahmen	Karlsruher Institut für Technologie - KIT, Karlsruhe
Dr.-Ing. Ralph-Uwe Dietrich	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Stuttgart
Melanie Form	aireg – Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany e.V., Berlin
Arne Grewe	wastecon AG, Hamburg
Dr. Armin Günther	Air Liquide Global E&C Solutions Germany GmbH, Frankfurt am Main
Benedikt Heuser	RWTH Aachen
Wolfgang Hofer	OMV Refining & Marketing GmbH, Österreich
Dr.-Ing. Thomas Kuchling	TU Bergakademie Freiberg
Prof. Dr. Walter Leitner	RWTH Aachen
Dr.-Ing. Klaus Lucka	TEC4FUELS GmbH, Herzogenrath
Dr. habil. Andreas Martin	Leibniz-Institut für Katalyse e.V., Rostock
Dr. Dietrich Meier	Johann Heinrich von Thünen-Institut, Hamburg
Dr. Jochen Michels	DECHEMA e.V., Frankfurt am Main
Gerhard Muggen	BTG Bioliquids BV, Enschede, Niederlande
Dr.-Ing. Franziska Müller-Langer	DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig
Prof. Dr.-Ing. Axel Munack	Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig
Dr. Thomas Otto	Karlsruher Institut für Technologie - KIT, Karlsruhe
Dr. Doris Schieder	TU München, Straubing
Dr. Jakob Seiler	Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Berlin
Prof. Dr. Anika Sievers	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg), Hamburg
Norbert Ullrich	Thyssenkrupp Industrial Solutions AG, Essen
Dr.-Ing. Amin Velji	Karlsruher Institut für Technologie – KIT, Karlsruhe
Prof. Dr.-Ing. Thomas Willner	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg), Hamburg
Annett Wollmann	CUTEC-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld

### Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Willner (thomas.willner@haw-hamburg.de)

Dr.-Ing. Klaus Lucka (klaus.lucka@tec4fuels.com)

Dr. Armin Günther (armin.guenther@airliquide.com)

### Herausgeber

ProcessNet-Arbeitsausschuss „Alternative flüssige und gasförmige Kraft- und Brennstoffe“

### Verantwortlich im Sinne des Presserechts

DECHEMA e.V.

Dr. Andreas Förster

Theodor-Heuss-Allee 25

60486 Frankfurt am Main

Erschienen im Juli 2017

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>2</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>1. Einführung</b>	<b>5</b>
<b>2. Fakten für fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe</b>	<b>7</b>
2.1 Höchste Energiedichte	7
2.2 Handhabung, Transport und Lagerung	8
2.3 Nutzung vorhandener Infrastruktur	8
2.4 Kompatibilität mit konventionellen Brenn- und Kraftstoffen	8
2.5 Hoher Entwicklungsstand der optimierten Emissionsminimierung	8
2.6 Qualitätsverbesserung durch Beimischung	8
2.7 Qualitätssicherung im Hinblick auf die Stabilität	8
2.8 Wichtige Grundlage für bestimmte Mobilitätsbereiche	8
2.9 Vermeidung von Nutzungskonkurrenz durch höchste Anwendungsflexibilität	8
2.10 Abwärtskompatibilität	9
2.11 Akzeptanz in der Bevölkerung	9
2.12 Nötiges Ressourcenpotential grundsätzlich vorhanden	9
2.13 Technologiepfade zu alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen	9
2.14 Möglichkeit zum Co-Processing	18
<b>3. Handlungsempfehlungen</b>	<b>19</b>
<b>4. Quellen</b>	<b>21</b>

# Vorwort

Der Arbeitsausschuss „Alternative flüssige und gasförmige Kraft- und Brennstoffe“ von ProcessNet, einer gemeinsamen Initiative der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. und der VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (VDI-GVC), setzt sich zusammen aus Vertretern von Wirtschaftsunternehmen, Verbänden und Wissenschaft in den Bereichen Brenn- und Kraftstoffe, Anlagenbau, Bio-/Raffinerien, Verbrennungskraftmaschinen, Automobil, Luftfahrt, Energiesysteme, thermochemische Umwandlung, nachwachsende Rohstoffe, Abfallstoffe und Sekundärrohstoffe sowie andere nachhaltige Ressourcen.

Mit diesem Positionspapier sollen Entscheidungsträger in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft angesprochen werden. Das Papier will im Hinblick auf die **Klimaschutzziele** technologische Wege aufzeigen, wie die **vollständige Einbindung der Sektoren Verkehr und Wärme in die Energiewende bis 2050** realistisch, nachhaltig und wirtschaftlich vertretbar gelingen kann. Es soll verdeutlicht werden, warum **fortschrittliche flüssige alternative Brenn- und Kraftstoffe** eine **Schlüsselrolle** dabei spielen werden. Handlungsempfehlungen sollen dazu beitragen, die Herausforderungen des geforderten tiefgreifenden Wandels von fossilen zu nachhaltigen Ressourcen zu meistern.

Der Arbeitsausschuss unterstützt damit Bemühungen zur Energiewende in der Verknüpfung der Bereiche Mobilität, Strom und Wärme als einen Beitrag zu Klimaschutz, Ressourcenschutz und Rohstoffsicherung, Ressourceneffizienz durch Optimierung von Stoffkreisläufen, Versorgungssicherheit durch Importunabhängigkeit, Schaffung von Arbeitsplätzen durch regionale Wertschöpfung sowie globaler Technologieführerschaft.

Dementsprechend verfolgt der Arbeitsausschuss das Ziel, politischen Programmen zum Erfolg zu verhelfen, die **Nachhaltigkeit und Energiewende** anstreben, wie zum Beispiel

- » Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung [1]
- » Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung [2]
- » Hightech-Strategie der Bundesregierung [3]
- » Roadmap Bioraffinerien der Bundesregierung [4]
- » Nationale Politikstrategie Bioökonomie [5]
- » Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung [6]
- » Strategie der Bundesregierung zur Rohstoffsicherung und zum Ressourcenschutz [7]
- » EU Energie- und Klimaschutzpaket 2030 [8]
- » EU Renewable Energy Directive (RED) [9]

# Zusammenfassung

Die umfassende Beteiligung der **Mobilität** und des **Wärmemarktes** an der Verminderung der Emission von Treibhausgasen ist unerlässlich für einen effektiven zukünftigen Klimaschutz sowie für die Vollendung der **Energiewende**.

Das vorliegende Papier beschreibt, warum **fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe (advanced alternative liquid fuels)** unter Einbeziehung fortschrittlicher Biokraftstoffe (advanced biofuels) hierfür eine Schlüsselrolle spielen werden. Die Energiewende kann ohne deren Hilfe nicht in der veranschlagten Zeit bis 2050 vollständig umgesetzt werden. „Fortschrittlich“ steht für Übereinstimmung mit den Forderungen der EU Renewable Energy Directive (RED), der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung und der European Industrial Bioenergy Initiative (EIBI) Key Performance Indicators (KPI) sowie für die Überwindung der Grenzen der Beimischung zu konventionellen Kraftstoffen (blend walls).

Hauptgründe für die **Unverzichtbarkeit fortschrittlicher alternativer flüssiger Brenn- und Kraftstoffe für die Energiewende** sind:

- » Im Falle einer kompletten regenerativen Elektrifizierung des Straßenverkehrs- und Wärmesektors müsste man den **regenerativen Stromanteil** selbst unter optimistischer Annahme aller Einsparpotentiale **mindestens versiebenfachen**, was allein schon aus Zeitgründen unrealistisch wäre. Hinzu kämen enorme Investitionen für Infrastrukturänderungen und erheblicher EU-weiter Abstimmungsbedarf.
- » Einige Verkehrsbereiche wie **Luftfahrt, Schifffahrt und LKW-Schwertransport** lassen sich langfristig nur sehr schwer elektrifizieren.
- » Nach einschlägigen Studien ist trotz aller Bemühungen um Elektro-, Erdgas- und Wasserstoffmobilität auf lange Sicht auch über das Jahr 2040 hinaus davon auszugehen, dass **flüssige Kraftstoffe im Transportsektor eine dominierende Rolle** spielen werden.

Detailliert wird auf die Fragen eingegangen, welche Wege aus heutiger Sicht zu den benötigten nachhaltigen Alternativprodukten in ausreichender Menge führen können und welche **Synergieeffekte** sich aus dem Zusammenspiel

verschiedener Wege im Hinblick auf die Verbesserung von Effizienz und **Wirtschaftlichkeit** ergeben. Die **Minimierung von Produktionskosten** ist gerade in Zeiten niedriger Ölpreise von großer Bedeutung. Deutschland hat hier immer noch das Potential zur Technologieführerschaft. Allerdings wird schon seit einiger Zeit außerhalb Deutschlands eine starke Dynamik insbesondere auf dem Gebiet fortschrittlicher Biokraftstoffe beobachtet. **Es besteht die Gefahr, dass Deutschland überholt wird und den Anschluss verpasst.**

Aus dieser Faktenlage werden nachfolgende **Handlungsempfehlungen** abgeleitet:

## 1. Ressourcenbasis auf Biomasse, Abfall- und Reststoffe sowie CO<sub>2</sub> erweitern

Es wird empfohlen, folgende Ressourcen als Basis für fortschrittliche alternative Brenn- und Kraftstoffe (gasförmige und flüssige) zuzulassen:

- » Biomasse (z. B. Lignocellulosen, Algen)
- » Biomasse-Fractionen (z. B. Lignin, Tallöl und Nicht-Nahrungs-Lipide)
- » Biogene Abfall- und Reststoffe (z. B. Stroh, Abfall- und Bauholz, Klärschlamm, Altfett u. a. Lebensmittelabfälle)
- » Abfall- und Reststoffe, Sekundärrohstoffe und Nebenprodukte aus der Abfallaufbereitung (z. B. Kunststoff- und Gummiabfälle, Schmierölrecyclingrückstände, Lösungsmittelrückstände)
- » Regenerativ erzeugter Wasserstoff
- » CO<sub>2</sub> aus biogenen und nicht biogenen Prozessen sowie aus der Luft

## 2. Co-Processing zulassen

Zur Qualitätssicherung und Beschleunigung des Rohstoffwandels wird empfohlen, Brenn- und Kraftstoffe aus Co-Processing-Verfahren als Alternative zuzulassen und zu zertifizieren. Beispiele sind:

- » **Co-Processing von Fetten und Ölen, Altfetten, Kunststoff-Abfällen und Reststoffen mit fossilen Rohstoffen in Raffinerien**

- » **Co-Processing von Biomassen, Abfällen, Reststoffen mit fossilen Rohstoffen in Vergasungs- und Verflüssigungsprozessen**
- 3. Gewinnung fortschrittlicher alternativer flüssiger Brenn- und Kraftstoffe in modernen Bioraffineriekonzepten verstärkt berücksichtigen**
- 4. Synergien von Prozessen zur Herstellung von fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen mit PtX-Konzepten suchen**
- 5. Forschung und Entwicklung mit dem Ziel der beschleunigten Markteinführung von fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen intensiv fördern und verlässliche gesetzliche Rahmenbedingungen mit einer Perspektive über 2020 hinaus schaffen**

# 1. Einführung

Die globale Erderwärmung soll bis 2050 gegenüber dem vorindustriellen Niveau auf deutlich unter 2 °C, möglichst auf 1,5 °C, begrenzt werden. Auf dieses Ziel einigten sich die 195 Teilnehmerstaaten auf der UN-Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015. Die bisher zugesagten globalen Klimaschutzmaßnahmen reichen dafür jedoch nicht aus. So nimmt beispielsweise der prozentuale Anteil des Verkehrssektors am Ausstoß von Treibhausgasen (THG) national, europäisch und global zu. Der Wärmemarkt schneidet diesbezüglich kaum besser ab.

Dabei geht es weltweit um erhebliche Mengen. Etwa 31,7 Mrd. t Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) wurden 2012 im Wesentlichen durch die Verbrennung von Kohle (43,9 %), Erdöl (35,3 %) und Erdgas (20,3 %) in die Atmosphäre emittiert [10]. Da die Mobilität, abgesehen von einem relativ kleinen Biokraftstoffanteil (global 4 %, Deutschland 4,5 % (2015, jeweils energetischer Anteil) [11]), fast vollständig auf Erdöl basiert und dabei rund 56 % der Erdölförderung verbraucht [12, 13], entfallen demnach fast 20 % der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen allein auf die Mobilität. Angesichts wachsender Erdbevölkerung bei gleichzeitig steigendem Lebensstandard wird der weltweite Bedarf an Brenn- und Kraftstoffen sogar noch stark zunehmen.

**Die Erreichung der Klimaschutzziele erfordert daher jetzt die Einführung effektiver Lösungen mit hoher Realisierungswahrscheinlichkeit und hohem Wirkbeitrag.**

Im Bereich der Mobilität ist eine Abkehr vom Individualverkehr und Hinwendung zum umweltfreundlichen öffentlichen Verkehr aktuell nicht absehbar. Ferner wäre eine schnelle Umstellung der beiden Sektoren Verkehr und Wärme auf elektrischen Strom nicht einmal in einem fortschrittlichen Industrieland wie Deutschland, geschweige denn global, in absehbarer Zeit realistisch. Allein für Deutschland würde die komplette regenerative Elektrifizierung des Straßenverkehrs und des Wärmebereichs dazu führen, dass sich der Gesamtstromverbrauch bis 2050 selbst unter optimistischer Annahme aller denkbaren Einsparpotentiale von derzeit 648 TWh [14] auf mindestens 1320 TWh verdoppelt [15] und dass sich im Zuge dessen der regenerative Strombedarf von derzeit 194 TWh [14] um den Faktor 7 mindestens auf besagte 1320 TWh erhöhte [15], da der gesamte Stromverbrauch dann regenerativ gedeckt werden müsste. Ein solches Szenario wäre

demnach im Rahmen der Energiewende nicht umsetzbar, zumal auch noch erheblicher Zeitaufwand und enorme Kosten für die dazu nötigen tiefgreifenden Infrastrukturänderungen hinzukämen sowie eine schnelle und sehr grundlegende EU-weite Abstimmung in dieser Richtung herbeigeführt werden müsste.

Vielmehr zeigen einschlägige Studien für den **Mobilitätsbereich** in Deutschland, dass **flüssige Kraftstoffe** trotz aller Bemühungen um Elektro-, Erdgas- und Wasserstoffmobilität **langfristig von maßgeblicher Bedeutung** sein werden. So sehen Studien der DENA die flüssigen Kraftstoffe im Verkehr im nächsten Jahrzehnt nur sehr langsam zurückgehen [16, 17]. Noch für 2030 werden über 85 % Flüssigkraftstoffe im Gesamtverkehr erwartet [17]. Eine weiter gehende Studie der DLR kommt zu dem Ergebnis, dass sich an diesem Trend auch im darauffolgenden Jahrzehnt nichts Wesentliches ändern wird [18]. Diese Ergebnisse sind angesichts der Langlebigkeit bestehender Automobilflotten und des eher konservativen, preisbewussten Käuferverhaltens durchaus nachvollziehbar. So beträgt beispielsweise die durchschnittliche Betriebsdauer von PKW rund 12 Jahre [19]. In noch stärkerem Maße als der PKW-Verkehr werden der schwere LKW-Transport, der Schiffsverkehr und vor allem der Flugverkehr auch in den nächsten Jahrzehnten auf Flüssigkraftstoffe mit hoher Energiedichte angewiesen sein [20-25].

**So wird man realistisch auch über das Jahr 2040 hinaus von einem erheblichen Bedarf an flüssigen Kraftstoffen in der Mobilität ausgehen müssen.**

**Daher ist es im Sinne der Energiewende und des Klimaschutzes nicht zuletzt aus Zeitgründen dringend geboten, die bestehenden fossilen Flüssigkraftstoffe effektiv und schnell durch fortschrittliche alternative flüssige Kraftstoffe sukzessive zu ersetzen. Diese Maßnahme würde sofort und unmittelbar Treibhausgasemissionen im gesamten Mobilitätssektor messbar reduzieren.**

Dies hätte zusätzlich den Vorteil, dass auch der **Wärmemarkt** unmittelbar durch die Einführung alternativen Heizöls einen Beitrag zu Energiewende und Klimaschutz leisten könnte. Als Zahl zur Orientierung möge hier der jährliche Bedarf an leichtem Heizöl in Deutschland von ca. 17 Mio. t bzw. 16 % vom Erdölverbrauch [26] dienen, der

trotz sinkender Tendenz auch zukünftig eine zumindest nicht unerhebliche Menge repräsentieren wird [17].

**Daher werden fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe (advanced alternative liquid fuels) unter Einbeziehung fortschrittlicher Biokraftstoffe (advanced biofuels) unverzichtbar sein für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende und die Erreichung der Klimaschutzziele bei vollständiger Integration der Sektoren Verkehr und Wärme.**

„Fortschrittlich“ („advanced“) steht hierbei für folgende Merkmale:

- » Übereinstimmung mit den Forderungen der RED [9] durch Herstellung aus nachhaltigen Ressourcen, die nicht im direkten Wettbewerb mit Nahrungs- oder Futtermitteln stehen, wie z. B. Stroh, Holz, Algen, Abfallstoffe oder Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>).
- » Übereinstimmung mit den Forderungen der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung [27] und der EIBI KPI [28] durch Treibhausgas-Emissionsminderung um mind. 60 % gegenüber fossilen Brenn- und Kraftstoffen.
- » Überwindung von Limitierungen bei der Zumischung in konventionelle fossile Brenn- und Kraftstoffe (blend walls) durch verbesserte Kompatibilität.
- » Keine nachteilige Beeinflussung der Langzeit-Stabilität im Falle der Zumischung zu konventionellen fossilen Brenn- und Kraftstoffen

Der letztgenannte Punkt gewinnt zum Beispiel im Zuge der Einführung von Hybridfahrzeugen, bei denen die mittlere Verweilzeit der Kraftstoffe im Tank ansteigt, an Bedeutung. Ein weiterer Stellenwert kommt diesem Punkt in den Anwendungsbereichen bei Feuerwehren, Technischem Hilfswerk und Streitkräften zu.

Im Falle vollständiger Kompatibilität bzw. Mischbarkeit mit entsprechenden konventionellen erdölstämmigen Produkten spricht man von alternativen Produkten mit **Drop-in-Qualität**. Diese sind in ihren Eigenschaften nahezu identisch mit konventionellen Produkten und überwinden dadurch Limitierungen in der Zumischung zu konventionellen Brenn- und Kraftstoffen. Chemisch betrifft dies insbesondere reine Kohlenwasserstoffe wie z. B. Alkane, die also nur aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff bestehen ohne Heteroatomanteile wie z. B. Sauerstoff.

**Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass der Bedarf an fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen aus Klimaschutzgründen in den nächsten 30 Jahren sowohl international als auch national dramatisch ansteigen wird. Besonders begehrt werden dabei Produkte mit Drop-in-Qualität sein. Fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe werden bei der Umsetzung der Energiewende und der Erreichung der Klimaschutzziele eine Schlüsselrolle spielen. Die Politik ist aufgefordert, die F&E-Förderung in diesem Bereich zu intensivieren, um insbesondere dem erheblichen Bedarf an Flüssigkraftstoffen im Transportsektor in den nächsten Jahrzehnten gerecht zu werden.**

## 2. Fakten für fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe

Im Folgenden werden wesentliche Merkmale fortschrittlicher alternativer flüssiger Brenn- und Kraftstoffe erläutert und Wege aufgezeigt, wie diese effizient aus nachhaltigen Ressourcen gewonnen werden können.

### 2.1 Höchste Energiedichte

Im Vergleich verschiedener alternativer Energieträger erreichen flüssige Brenn- und Kraftstoffe die höchsten volumetrischen Energiedichten. Wie Abb. 1 zeigt, gehören dazu Alkohole wie Methanol, Ethanol und vergleichbare Oxygenate sowie flüssige Kohlenwasserstoffe. Letztere erreichen Spitzenwerte von mehr als 30 GJ/m<sup>3</sup> [29].

Die Energiedichten für die Gase Methan und Wasserstoff in Abb. 1 beziehen sich dabei auf die üblichen Lagerbedingungen im Rahmen des Einsatzes für die Mobilität. Im Falle des Methans sind die Bedingungen entweder 200 bar bei Umgebungstemperatur oder  $-162\text{ °C}$  bei Umgebungsdruck. Im Falle des Wasserstoffs sind die Varianten entweder 700 bis 800 bar bei Umgebungstemperatur oder

$-253\text{ °C}$  bei Umgebungsdruck. Beide Lagerbedingungen erfordern jeweils einen Energieeinsatz, der zu Wirkungsgradverlusten führt.

Flüssige Kraftstoffe sind damit prädestiniert für den Einsatz in der Mobilität, da die Energiedichte beim mobilen Transport ein sehr wichtiger Faktor ist. Für die **Luftfahrt**, die **Schifffahrt** und den **Schwerlastverkehr** kommt dies in besonderem Maße zum Tragen, so dass man hier davon ausgehen sollte, dass auf lange Sicht nur flüssige Kohlenwasserstoffe als Treibstoff in Frage kommen.

Abb. 1 verdeutlicht außerdem unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade moderner Verbrennungsmotoren, dass die extrem geringe Energiedichte von elektrischen Batteriesystemen nicht durch höhere Wirkungsgrade im Antriebssystem ausgeglichen werden kann. Dies wird langfristig eine Herausforderung der batteriebasierten Elektromobilität bleiben. Mit Wasserstoff betriebene elektrische Brennstoffzellenfahrzeuge schneiden in dieser Hinsicht deutlich besser ab.

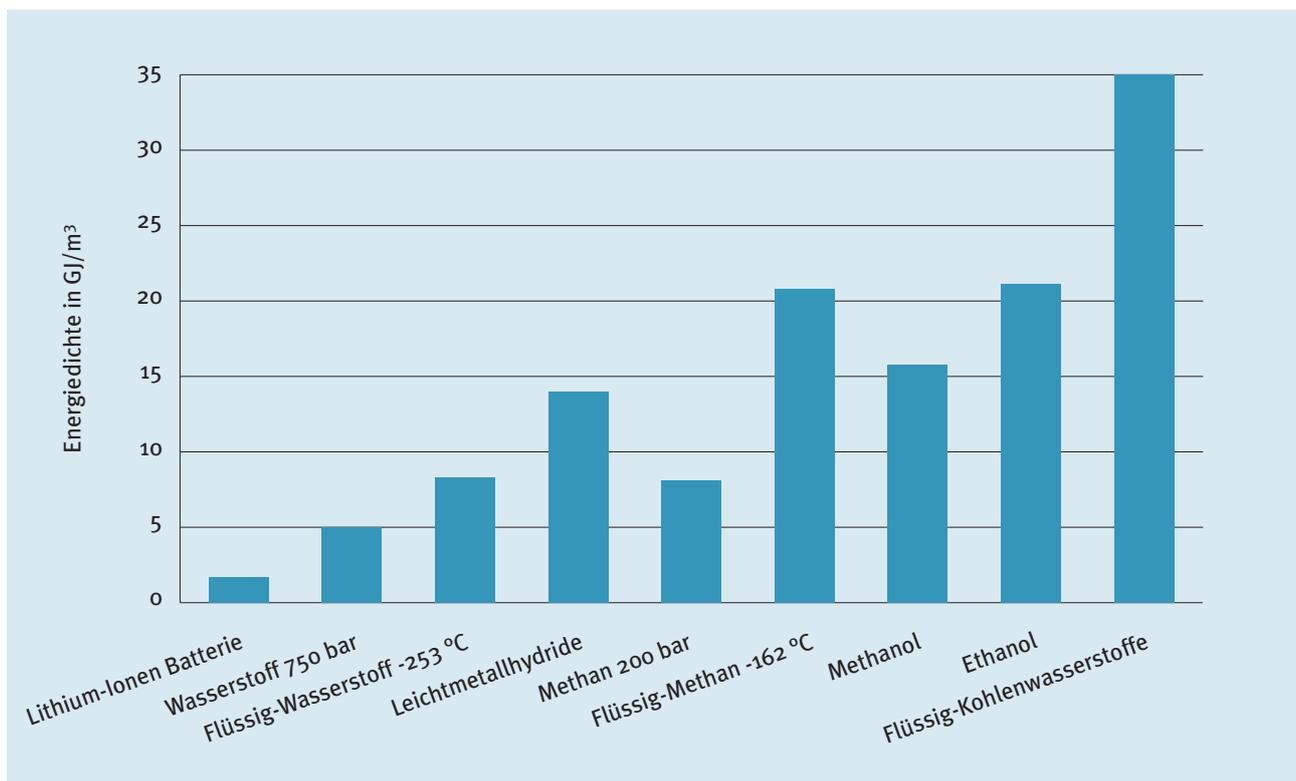


Abb. 1: Volumetrische Energiedichten alternativer Energieträger [29]

### 2.2 Einfache Handhabung, Transport und Lagerung

Flüssige Brenn- und Kraftstoffe lassen sich im Vergleich zu gasförmigen Energieträgern sehr einfach bei Umgebungstemperatur und Atmosphärendruck handhaben sowie sehr effizient transportieren und lagern.

### 2.3 Nutzung vorhandener Infrastruktur

Alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe können die gesamte vorhandene Infrastruktur von der Raffinerieverarbeitung über den Transport bis hin zur Auslieferung an den Endverbraucher unverändert nutzen. So werden sowohl hohe Investitionen als auch hohe laufende Kosten für neue Infrastrukturen vermieden.

### 2.4 Kompatibilität mit konventionellen Brenn- und Kraftstoffen

Fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe können insbesondere als Drop-in-Produkte mit herkömmlichen Brenn- und Kraftstoffen in Raffinerien problemlos verarbeitet und gemischt werden. Sie sind in der Regel in jedem beliebigen Verhältnis zumischbar, ohne dass z. B. vorhandene Brenner- oder Motorenkonzepte verändert oder angepasst werden müssten.

Wenn man auf die vollständige Mischbarkeit der Alternativprodukte mit konventionellen Produkten verzichtet, bieten sich langfristig neue Freiheitsgrade und sogar Möglichkeiten, Kraftstoffe mit optimierten Eigenschaften zu entwickeln. Diese optimierten Formen könnten z. B. Oxygenate sein (vergl. Abschn. 2.13 PtL-Pfad 5), die dann möglicherweise nicht mehr Drop-in-Produkten entsprechen, also konventionellen Produkten nicht mehr in beliebigen Verhältnissen beigemischt werden können, sondern ggf. auch anstelle konventioneller Produkte eingesetzt werden. Um eine Marktakzeptanz zu gewährleisten, müssen diese Produkte jedoch auch mit bestehender Infrastruktur und Fahrzeugflotte kompatibel sein.

### 2.5 Hoher Entwicklungsstand der optimierten Emissionsminimierung

Bei Einsatz alternativer Drop-in-Kraftstoffe lässt sich das bereits technisch erreichte hohe Niveau der Abgasqualität

ohne Änderung in Motor- und Abgasnachbehandlungssystemen unabhängig vom Beimischungsanteil sicherstellen. Langfristig lassen sich Emissionen sogar deutlich reduzieren, wenn flüssige Kraftstoffe losgelöst von der Drop-in-Qualität in optimierter Form, wie unter Abschn. 2.4 beschrieben, zum Einsatz kommen.

### 2.6 Qualitätsverbesserung durch Beimischung

Fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe bieten die Möglichkeit, die Qualität herkömmlicher Brenn- und Kraftstoffe bei Leistung und Emissionen zu verbessern (vergl. auch Abschn. 2.4 und 2.5).

### 2.7 Qualitätssicherung im Hinblick auf die Stabilität

Fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe bieten im Hinblick auf die Langzeit-Stabilität die Chance, die Qualität herkömmlicher Brenn- und Kraftstoffe zu sichern. Dieser Aspekt gewinnt, wie in der Einführung beschrieben, an Bedeutung.

### 2.8 Wichtige Grundlage für bestimmte Mobilitätsbereiche

Flüssige Kraftstoffe sind für einige Bereiche der Mobilität aus heutiger Sicht langfristige wirtschaftliche Existenzgrundlage. Dies betrifft insbesondere die **Luftfahrt**. Diese ist angewiesen auf Kraftstoffe höchster Energiedichte und wird daher auf absehbare Zeit nicht darauf verzichten können [20-24]. Ähnlich verhält es sich mit anderen Mobilitätsbereichen wie der **maritimen Schifffahrt**, dem **LKW-Güterfernverkehr** und wahrscheinlich auch dem **PKW-Fernverkehr** [18, 20-24].

### 2.9 Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen durch höchste Anwendungsflexibilität

Alternative flüssige Kraftstoffe sind die einzige nicht fossile Option, die in allen Mobilitätsbereichen eingesetzt werden können [20]. Deren Bereitstellung würde diesbezüglich Nutzungskonkurrenzen in den unterschiedlichen Einsatzbranchen zumindest mildern, bei ausreichender Menge sogar vermeiden. Dies betrifft z. B. einen möglichen Konflikt zwischen **Straßenverkehr** und **Luftfahrt**, da bei-

de Sektoren Mitteldestillate benötigen. Eine weitere Nutzungskonkurrenz wird bei der Umstellung der **Schifffahrt** auf schwefelarme Kraftstoffe entstehen. Dabei kann es Überschneidungen mit Heizöl und Diesel geben.

### 2.10 Abwärtskompatibilität

Fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe sind als Drop-in-Produkte die einzige Alternative, die eine umfassende Abwärtskompatibilität für Altsysteme bieten kann. Dadurch würden Probleme bei Altsystemen sowie die Notwendigkeit zur Bereitstellung von Sonderbrenn- und -kraftstoffen für diese Einsatzbereiche vermieden.

### 2.11 Akzeptanz in der Bevölkerung

Die Erfahrung zeigt, dass bei jeder grundlegenden Veränderung im Brenn- und Kraftstoffsektor intensive Überzeugungsarbeit in der Bevölkerung geleistet werden muss, deren Verlauf schwer einschätzbar ist. Fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe bieten die Chance, dieses Problem zu vermeiden.

### 2.12 Nötiges Ressourcenpotential grundsätzlich vorhanden

Einschlägige Studien bestätigen, dass deutsche, europäische oder globale Energiepotentiale an nachwachsenden Rohstoffen sowie Rest- und Abfallstoffen auch unter Anlegung schärfster Nachhaltigkeitskriterien und der gesetzlich vorgegebenen Abfallhierarchie ausreichen, um einen zumindest signifikanten Anteil des jeweiligen künftigen Kraftstoffbedarfs zu decken [13, 31-37].

Diese Potentiale können ergänzt werden durch die Nutzung neuer Ressourcen wie z. B. Algen, erneuerbarer Strom, Wasserstoff aus erneuerbarem Strom sowie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) z. B. aus Fermentationsprozessen oder aus der Luft (siehe nachfolgender Abschnitt). Speziell die vielfältigen Potentiale von Algen werden in einschlägigen Papieren von IRENA [37], IEA [38] und DECHEMA [39] beschrieben

### 2.13 Technologiepfade zu alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen

Abb. 2 zeigt zahlreiche Beispiele für integriert vernetzte Wege, wie **fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe** aus nachhaltigen Ressourcen gewonnen werden können. Dabei wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, zumal Forschung und Entwicklung stetig voranschreiten und immer wieder neue Ideen und Ansätze dazu kommen. Jeder ausgewiesene Pfad hat zum einen eine Bedeutung für sich und zum anderen eine Bedeutung in der Vernetzung mit anderen Pfaden, dargestellt durch quer verlaufende Pfeile.

Mit Abb. 2 soll ein Eindruck davon vermittelt werden, wie groß die Zahl der Wege zu fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen schon aus heutiger Sicht ist und wie vielfältig die Synergiemöglichkeiten (quer verlaufende Pfeile) sind. Auch diesbezüglich hat die Darstellung beispielhaften Charakter und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

**In der Nutzung von Synergien durch Vernetzung dieser Technologiepfade liegt ein hohes Optimierungspotential für zukünftige Effizienzsteigerungen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.** Dieser Aspekt der **Minimierung von Produktionskosten** ist gerade in Zeiten niedriger Ölpreise von besonderer Bedeutung.

Des Weiteren lässt sich auch die Kluft zwischen dezentral anfallenden Rohstoffen und großen Produktmengen beispielsweise durch die Verknüpfung von dezentral in kleinerem Maßstab einsetzbaren Erstverarbeitungsschritten und zentral in großen Produktionseinheiten realisierbaren Weiterverarbeitungsschritten überbrücken.

Die Implementierung und Vernetzung einer Vielzahl von Prozesslinien bieten aufgrund ihrer Redundanz auch die Chance auf ein hohes Maß an Versorgungssicherheit.

Zusätzlich hat man die Möglichkeit, aus den Prozesslinien regenerativ erzeugten Wasserstoff für eine zukünftige Wasserstoffwirtschaft und -mobilität bereitzustellen. Zudem lassen sich viele Synergien zu anderen gasförmigen Alternativkraftstoffen wie z. B. Methan nutzen.

## 2. FAKTEN FÜR FORTSCHRITTLICHE ALTERNATIVE FLÜSSIGE BRENN- UND KRAFTSTOFFE

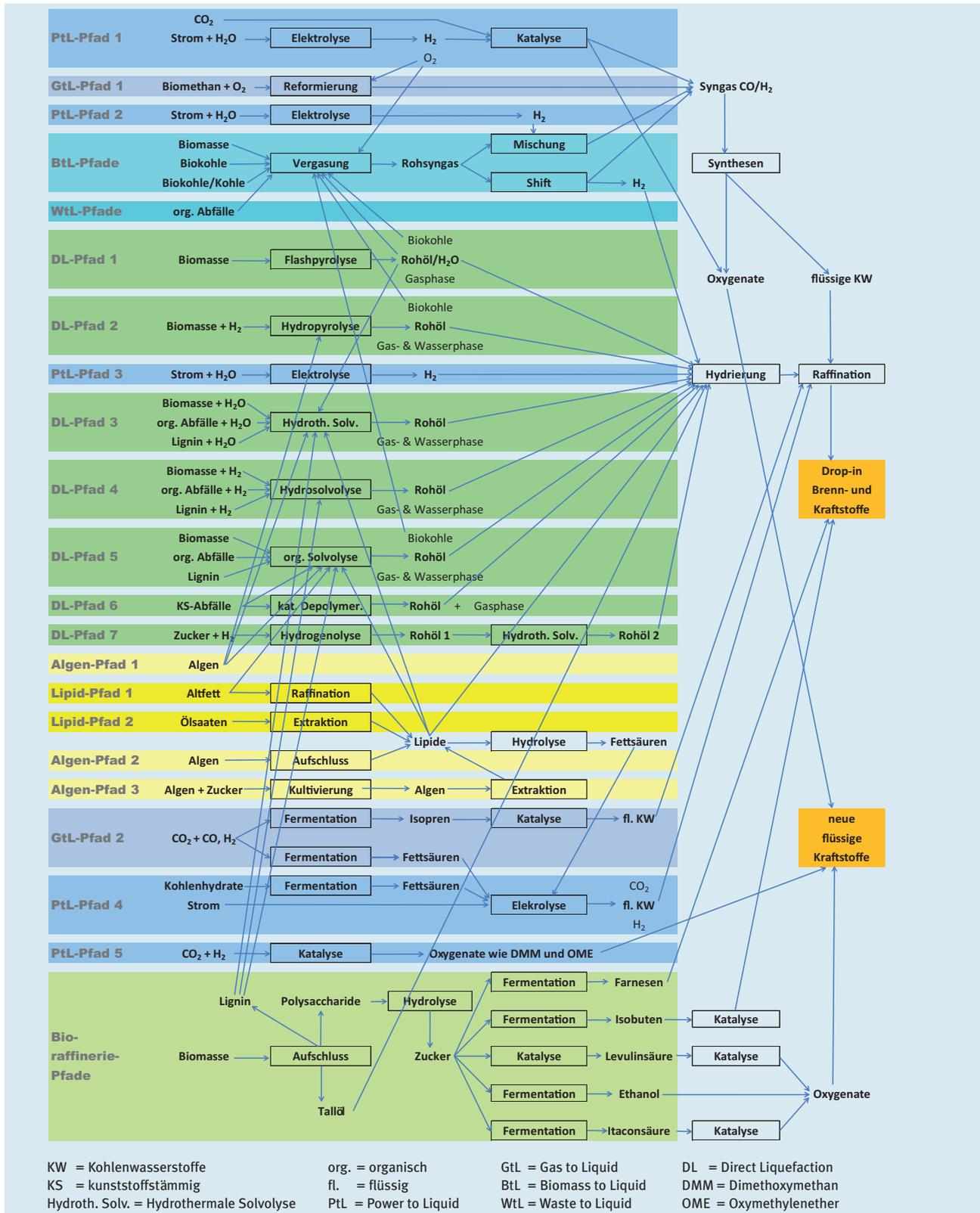


Abb. 2: Wege zu fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen (Beispiele)

Folgende **Pfadgruppen** sind hier aufgeschlüsselt:

- » **XtL** (Ressource X to Liquid) wie **BtL** (Biomass to Liquid), **WtL** (Waste to Liquid), **GtL** (Gas to Liquid) und **PtL** (Power to Liquid), überwiegend jeweils über die Zwischenstufe eines Synthesegases, im Falle von BtL im Sinne der „Synthesegas-Bioraffinerie“ gemäß der Bioraffinerie-Gruppe 4 der Roadmap Bioraffinerien [4].
- » **DL** (Direct Liquefaction = Direktverflüssigung) über die Zwischenstufe eines Öles, das jeweils weiter zu normgerechten alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen aufgearbeitet wird.
- » **Lipid**, ausgehend von Triglyceriden wie Fetten und Ölen, entweder im Sinne der „Pflanzenöl-Bioraffinerie“ innerhalb der Bioraffinerie-Gruppe 2 der Roadmap Bioraffinerien [4] oder auf Basis von Altfett.
- » **Algen** (Züchtung und Verarbeitung derselben), überwiegend im Sinne der „Algen-Bioraffinerie“ innerhalb der Bioraffinerie-Gruppe 2 der Roadmap Bioraffinerien [4].
- » **Bioraffinerie** über Aufschluss fester Biomasse und Weiterverarbeitung der Fraktionen im Sinne der „Lignocellulose Bioraffinerie“ gemäß der Bioraffinerie-Gruppe 3 der Roadmap Bioraffinerien [4].

Verarbeitungsschritte der **Biotechnologie** wie z. B. Fermentationen sind hier in viele dieser Pfadgruppen eingebunden. Ebenso ist die **Verarbeitung von biogenen und nicht-biogenen organischen Abfällen** integriert. Explizit angesprochen sind organische Abfälle im WtL-Pfad. Ein Beispiel für biogene organische Abfälle wären Lebensmittelabfälle, während Kunststoffabfälle ein Beispiel für nicht-biogene organische Abfälle wären. Der Begriff „organisch“ bezieht sich hierbei auf die Kategorie der „Organischen Chemie“, mit der die „Kohlenstoffchemie“ gemeint ist. In diesem Sinne bedeutet „organisch“ also „kohlenstoffhaltig“ oder „auf kohlenstoffhaltigen Verbindungen beruhend“.

Tab. 1 gibt eine zusammenfassende Übersicht zu den Technologie-Pfaden für die Produktion von fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen im Hinblick

auf wesentliche technische Charakteristika, den Entwicklungsstand sowie die Akteure (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Im Folgenden werden die Pfade erläutert.

#### **PtL-Pfade:**

Bei allen PtL-Pfaden sind die Ressourcen zum einen elektrischer „Überschuss-Strom“ aus erneuerbaren Quellen und zum anderen eine Kohlenstoffquelle. Eine wesentliche Herausforderung aller PtL-Pfade liegt darin, das schwankende Stromangebot mit bevorzugt kontinuierlich laufenden Stoffumwandlungsprozessen zu verknüpfen.

Techno-ökonomische Bewertungen von PtL-Pfaden werden in Deutschland u. a. vom DLR durchgeführt. Umfangreiche Forschungsarbeiten zu verschiedenen PtX-Pfaden finden im Rahmen des Kopernikus-Projektes „P2X“ unter der Koordination der RWTH Aachen, des Forschungszentrums Jülich und der DECHEMA statt.

#### **PtL-Pfad 1:**

Im PtL-Pfad 1 ist die Kohlenstoffquelle Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), das z. B. aus Fermentationsprozessen oder aus der Luft stammen kann. Aus dem Strom wird hier über Elektrolyse von Wasser der Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) beigesteuert.  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$  werden über die so genannte reverse Wassergas-Shift-Reaktion ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ ) katalytisch in Synthesegas (Syngas =  $\text{CO-H}_2$ -Gemische) umgewandelt. Dieses wird nachfolgend über unterschiedliche Synthesewege (z. B. Fischer-Tropsch-Synthese, Methanol-Synthese oder Dimethylether (DME)-Synthese) entweder in flüssige Kohlenwasserstoffe (KW) oder Oxygenate umgewandelt, die dann jeweils die Grundlage zur Produktion alternativer flüssiger Brenn- und Kraftstoffe darstellen. Die katalytische Umsetzung von  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$  zu Methanol kann alternativ auch ohne den Umweg über die reverse Wassergas-Shift-Reaktion direkt in einem Schritt erfolgen [44]. Der in der Elektrolyse von Wasser stets als Nebenprodukt anfallende Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) kann in anderen Pfaden wie z. B. in der Reformierungsstufe vom GTL-Pfad 1 oder im Vergasungsschritt der BtL-Pfade vorteilhaft eingesetzt werden.

Mit diesem PtL-Pfad befassen sich in Deutschland z. B. die Firmen Sunfire GmbH, Südzucker AG und Solvay GmbH sowie die Forschungseinrichtungen Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg und Fraunhofer ISE.

**Tab. 1: Übersicht zum Entwicklungsstand und zu Akteuren für verschiedene Wege zu fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen [40-42]**

Pfad	Prozess	Rohstoffe	Produkte	Status	Akteure (Beispiele)
PtL-Pfad 1	RSOC + FT-Synthese	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , Strom/H <sub>2</sub>	Diesel, Kerosin	Pilot in Betrieb	Sunfire
PtL-Pfad 4	Kolbe-Elektrolyse	Kohlenhydrate, Fettsäuren, Strom	Flüssige Kohlenwasserstoffe	Labor	Infinite Fuels, HAW Hamburg, FhG ICT-IMM
PtL-Pfad 5	Katalyse	Strom/H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	Oxygenate wie DMM, OME	Labor (Kopernikusprojekt)	RWTH, FZJ, DECHEMA
GtL-Pfad 1	Partialoxidation + FT-Synthese	CH <sub>4</sub> , O <sub>2</sub>	Diesel, Kerosin	Produktion	Shell, Sasol, Air Liquide
GtL-Pfad 2	Fermentation	CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub>	Ethanol	TRL 8 Demo in Betrieb	LanzaTech/USA
BtL-Pfad	Pyrolyse + Vergasung + Synthese	Lignocellulosen, insbes. Stroh	DME, Benzin	TRL 6-7 Demo in Betrieb, bioliq®-Projekt	KIT, Air Liquide, CAC
BtL-Pfad	Torrefizierung + Vergasung + FT-Synthese	Lignocellulosen, insbes. Holz	Diesel, Kerosin	TRL 4-5 Pilot in Betrieb, BioTfuel-Projekt	Total, Thyssenkrupp u. a.
BtL-Pfad	Vergasung + FT	Lignocellulosen	Diesel u.a.	Pilot in Betrieb	CUTEC
BtL-Pfad	Vergasung + FT	Lignocellulosen	Diesel u.a.	TRL 6-7 Demo in Betrieb	TU Freiberg, Air Liquide, CAC
WtL-Pfad	Vergasung + Synthese	Biomasse, Kohle, Hausmüll	Methanol, Ethanol	TRL 8 Demo in Betrieb	Enerkem/Canada
DL-Pfad 1	Flashpyrolyse + Hydrierung	Biomasse	Benzin	Demo im Bau	Ensyn
DL-Pfad 1	Flashpyrolyse + Hydrierung	Biomasse	Benzin	Pilot	BTG
DL-Pfad 2	Hydropyrolyse	Biomasse	Benzin	TRL 4-5 Pilot in Betrieb	GTI/USA
DL-Pfad 3	Hydrothermale Verflüssigung	Biomasse	Bioöl	TRL 6-7 Demo in Betrieb	Licella/Australien
DL-Pfad 3	Hydrothermale Verflüssigung	Biomasse	Bioöl	TRL 4-5 Pilot in Betrieb	Steeper Energy/DK
DL-Pfad 4	Hydrosolvolyse	Biomasse	Bioöl	Labor	Nexxoil, HAW Hamburg
DL-Pfad 5	Org. Solvolyse	Biomasse	Bioöl	Labor	Nexxoil, HAW Hamburg
DL-Pfad 6	Kat. Depolym.	Plastikabfall	Öl	Pilot	wastecon/Solvorec
DL-Pfad 7	Mehrstufige Katalyse	Kohlenhydrate	Diesel	TRL 6-7 Demo in Betrieb	Virent/USA
Algen-Pfad 1	Trocknung + DL-Pfad 2 od. 5	Algenmasse	Diesel		siehe DL-Pfade 2+5
Algen-Pfad 1	DL-Pfad 3	Algenmasse	Diesel		siehe DL-Pfad 3
Algen-Pfad 2	Lipid-Extraktion	Algenlipide	Diesel, Kerosin		siehe Lipid-Pfad 2
Algen-Pfad 3	Fermentation + Lipidextraktion + HVO-Prozess	Algen + Zucker	Diesel, Kerosin	TRL 8 Demo in Betrieb	Solazyme/USA
Lipid-Pfad 1	Raffination + HVO-Prozess	Altfett	Diesel, Kerosin	Produktion	Neste, UOP, ENI
Lipid-Pfad 1	CVO-Prozess	Altfett	Diesel, Kerosin	TRL 4-5 Pilot in Betrieb	Nexxoil, HAW Hamburg
Lipid-Pfad 2	HVO- od. CVO-Prozess	Fette und Öle	Diesel, Kerosin	Produktion	siehe Lipid-Pfad 1
Bioraff.-Pfad	Hydrolyse + Fermentation	Lignocellulosen	Farnesen	TRL 8 Demo in Betrieb	Amyris, Total
Bioraff.-Pfad	Hydrolyse + Fermentation	Lignocellulosen	Isobuten	TRL 6 Demo im Bau	Global Bioenergies
Bioraff.-Pfad	Hydrolyse + Fermentation	Lignocellulosen	Ethanol	TRL 6-8 Demo in Betrieb	div. siehe Text
Bioraff.-Pfad	Hydrolyse + Fermentation/ Katalyse	Lignocellulosen	Oxygenate	Labor	RWTH
Bioraff.-Pfad	Hydrierung + Fraktionierung	Tallöl	Diesel	TRL 8 Demo in Betrieb	UPM

TRL = Technology Readiness Level gem. EU Horizon 2020 [43]

### GtL-Pfad 1:

Eine typische Ressource dieses GtL-Pfades ist Methan ( $\text{CH}_4$ ). Erneuerbar kann Methan z. B. als Biomethan aus konventionellem Biogas gewonnen werden. Alternativ könnte es auch aus  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$  synthetisiert werden. Wenn man jedoch am Ende auf flüssige Produkte abzielt, würde man in letzterem Falle den PtL-Pfad 1 bevorzugen.

Durch Reformierung mit Partialoxidation durch Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) wird das Methan in Synthesegas umgewandelt, welches die gleiche Weiterverarbeitung erfährt wie im PtL-Pfad 1. Der benötigte Sauerstoff kann z. B. aus Luft oder als Nebenprodukt der Elektrolyse von Wasser aus PtL-Pfaden gewonnen werden.

Mit diesem GtL-Pfad befassen sich insbesondere große Firmen wie z. B. Shell, Sasol und Air Liquide. Die derzeit größte Produktionsanlage der Welt ist Pearl GTL in Ras Laffan Industrial City in Katar. Diese wurde 2012 von Shell mit einer Kapazität von 140.000 Barrel pro Tag in Betrieb genommen. Das benötigte Methan stammt dort aus Erdgas.

### PtL-Pfad 2:

Der PtL-Pfad 2 ist verknüpft mit den nachfolgend beschriebenen BtL-Pfaden, indem er erneuerbaren Wasserstoff zur Erhöhung der Kraftstoffausbeute beisteuert. Dies ist ein weiteres Beispiel für **Effizienzsteigerung durch Vernetzung** unterschiedlicher Prozesslinien.

### BtL-Pfade:

Die BtL-Pfade entsprechen in der Systematik der Roadmap Bioraffinerien [4] der „Synthesegas-Bioraffinerie“ gemäß der Bioraffinerie-Gruppe 4.

Über BtL-Pfade können feste nachwachsende Kohlenstoffquellen wie Biomassen (z. B. Holz und Stroh), Biokohle (ggf. im **Co-Processing** mit fossiler Kohle) jeweils mit oder ohne weitere Begleitstoffe verarbeitet werden. Die Kernprozesse werden aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel in größeren, zentral betriebenen Produktionseinheiten durchgeführt.

Auch hier sind Effizienzsteigerungen durch Quervernetzung mit anderen Prozesspfaden möglich. So kann z. B.

Biokohle aus nachfolgend beschriebenen DL-Pfaden beigesteuert werden. Speziell Biokohle-Bioöl-Slurries kommen aus dem DL-Pfad 1 wie z. B. im bioliq<sup>®</sup>-Prozess des KIT in Karlsruhe in Kooperation mit Air Liquide und Chemieranlagenbau Chemnitz (CAC). Durch die Vorschaltung von kleineren dezentral betriebenen DL-Anlagen kann der rohstoffseitige Transportaufwand deutlich reduziert werden. Auch hierin zeigt sich erneut das nutzbare Synergiepotential durch die intelligente Vernetzung verschiedener Pfade. Die bioliq<sup>®</sup>-Prozess besteht aus einer Schnellpyrolysestufe zur Gewinnung einer Bioöl-Biokohle-Slurry, die dann einer Vergasung zur Synthesegasproduktion mit nachfolgenden Synthesen zugeführt wird. Syntheseprodukte sind DME, Methanol und Benzin. Rohstoffdurchsatz ist 0,5 t/h Stroh. Produktionskapazitäten sind 600 t/a DME und 100 t/a Benzin. [42]

Im Falle des BioTfuel-Projektes in Frankreich unter Beteiligung von Total, Thyssenkrupp Industrial Solutions u. a. wird die Biomasse (z. B. Holz) zunächst torrefiziert, dann zu Synthesegas umgewandelt in Vergasern, die sich bereits in der Kohlevergasung bewährt haben, und schließlich mittels Fischer-Tropsch-(FT)-Synthese zu Kraftstoffen wie Diesel und Kerosin verflüssigt. Eine Pilotanlage in Dünkirchen/Frankreich ist ausgelegt auf 4.000 t/a FT-Produkte.

Grundsätzlich wird der Rohstoff in den BtL-Pfaden mittels Vergasung im Temperaturbereich zwischen 800 und 1.400 °C in Synthesegas bzw. zunächst in Rohsynthesegas (Rohsyngas) umgewandelt. Hierzu stehen eine Reihe von technisch erprobten Reaktorkonzepten z. B. von Air Liquide oder Thyssenkrupp bereit und es können verschiedene Prozesswege wie z. B. „allotherm“ (externe Wärmezufuhr) oder „autotherm“ (interne Wärmezufuhr durch Partialoxidation mit Sauerstoff) bis hin zur Dampfreformierung (Steam Reforming) genutzt werden.

Zur Anpassung des  $\text{CO}/\text{H}_2$ -Verhältnisses im Rohsynthesegas bedient man sich der Zumischung von externem  $\text{H}_2$  (z. B. aus PtL-Pfad 2) oder der so genannten Wassergas-Shift-Reaktion ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ). Das so gewonnene Synthesegas wird in gleicher Weise weiterverarbeitet wie im PtL-Pfad 1 oder GtL-Pfad 1.

Über die Shift-Technologie kann auch gezielt Wasserstoff für die Hydrierung aller DL-Pfade produziert werden.

Diese Art der Wasserstoffgewinnung ist sehr effektiv und wesentlich günstiger als die Elektrolyse von Wasser, solange kein kostengünstiger „Überschuss-Strom“ zur Verfügung steht.

Neben den genannten Akteuren befassen sich forschungsseitig in Deutschland auch die Firma Chemieanlagenbau Chemnitz (CAC), die CUTEC in Clausthal-Zellerfeld sowie die TU Freiberg mit BtL-Pfaden und mit Synthesen aus Synthesegasen aller XtL-Pfade. Das LIKAT in Rostock entwickelt entsprechende Katalysatorsysteme.

### **WtL-Pfade:**

WtL-Pfade stehen für „Waste to Liquid“. Die Kraftstoffprodukte werden auch mit der Abkürzung RDF (Refused Derived Fuels) bezeichnet. Rohstoffe sind Abfälle wie z. B. Hausmüll oder hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Sortierreste und Kunststoffe sowie Kunststoffgemische.

Wie bei den BtL-Pfaden (siehe dort) werden die Rohstoffe bei sehr hohen Temperaturen in der Regel oberhalb von 1.000 °C in ein Rohsynthesegas umgewandelt, verbunden mit der anschließenden Anpassung des CO-H<sub>2</sub>-Verhältnisses und der Synthese zu Kraftstoffprodukten.

Die kanadische Firma Enerkem hat bereits zwei kommerzielle Demo-Produktionsanlagen mit einem Rohstoffjahresdurchsatz von 100.000 t auf der Basis von Biomasse und Hausmüll in Edmonton/Kanada und Pontotoc/USA in Betrieb genommen. Syntheseprodukte sind dort Methanol und Ethanol [42].

### **PtL-Pfad 3:**

Der PtL-Pfad 2 ist verknüpft mit allen nachfolgend beschriebenen DL-Pfaden, indem er dort z. B. der Bioöl-Hydrierung erneuerbaren Wasserstoff alternativ zum Shift-Wasserstoff aus den BtL-Pfaden zuführt.

### **DL-Pfade:**

Die Direktverflüssigung (DL = Direct Liquefaction) kann sehr unterschiedliche feste Kohlenstoffquellen wie Biomassen (z. B. Holz und Stroh), organische Abfälle (z. B. Kunststoffabfälle und biologische Abfälle) oder auch Klärschlamm und schwierige Reststoffe wie z. B. Lignin verarbeiten. Als Zwischenprodukt erhält man stets ein Öl, das weiter zu fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen aufgearbeitet werden kann.

DL-Verfahren zeichnen sich aufgrund moderater Temperaturen (unter 500 °C) sowie der direkten einstufigen Gewinnung flüssiger Energieträger durch hohe energetische

Wirkungsgrade aus. Dadurch bietet sich die Chance, die verteilt anfallenden Rohstoffe in kleineren, dezentralen Anlagen wirtschaftlich zu verarbeiten, um rohstoffseitige Transportkosten zu minimieren.

Hier liegen auch Chancen für **Synergien**, um die **Wirtschaftlichkeit** von Gesamtkonzepten zur Herstellung von fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen deutlich zu verbessern, wenn man z. B. einen ersten dezentralen DL-Schritt mit zentralen großtechnisch betriebenen Schritten aus anderen Pfaden verknüpft. Ein solches Konzept ist z. B. unter den BtL-Pfaden im Zusammenhang mit dem bioliq<sup>®</sup>-Prozess des KIT beschrieben.

DL bezeichnet eine thermochemische Umwandlung bei Temperaturen zwischen 300 und 500 °C. Als Zwischenprodukt anfallendes Öl wird im Falle biogener Rohstoffe auch Bioöl, Biorohöl oder Biocrude Oil (BCO) genannt. Daneben erhält man in der Regel Biokohle, Gas und eine Wasserphase. Das Gas kann zur Energieversorgung des Prozesses dienen. Die Biokohle kann der BtL-Verarbeitung zugeführt werden, während die Wasserphase zur Biogasproduktion geeignet ist.

Die erzeugten Öle sind zur Aufbereitung zu fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen – ggf. nach zwischengeschalteter Desoxygenierung – einer Hydrierung und Raffination zuzuführen. Der benötigte Wasserstoff kann unter Nutzung von Synergienmöglichkeiten z. B. über PtL-Pfad 3 oder aus den Nebenprodukten Biokohle und Wasserphase über die Schritte Steam-Reforming und Shift-Reaktion erzeugt werden. Diese Schritte sind unter den BtL-Pfaden beschrieben.

Neben diesen übergeordneten Gemeinsamkeiten weisen die im Folgenden aufgeführten DL-Pfade charakteristische Unterschiede in den Reaktionsbedingungen auf.

### **DL-Pfad 1:**

Der DL-Pfad 1 ist aufgrund vergleichsweise einfacher apparativer Konzepte der technisch am weitesten entwickelte DL-Pfad. Kernprozess ist die Flash- bzw. Schnellpyrolyse, bei der der Rohstoff, bevorzugt Holz oder Stroh, in der Regel bei Atmosphärendruck unter extrem schneller Aufheizung in ein Rohöl hoher Ausbeute neben Biokohle und Gas umgewandelt wird. Die Eigenschaften des Rohöles sind sehr ungewöhnlich. Es ist sehr polar und mit Wasser mischbar, so dass es das Reaktionswasser einphasig gelöst enthält. Der Heizwert des Rohöles ist mit etwa 16 bis 17 MJ/kg in der Regel sogar etwas niedriger als der des Rohstoffes. Daher ist der Aufwand zur Aufbereitung sol-

cher Rohöl in Richtung hochwertiger Brenn- und Kraftstoffen am höchsten unter allen DL-Pfaden.

Die Slurry aus Rohöl und Biokohle enthält etwa 80 % der Rohstoffenergie und kann über BtL-Pfade weiterverarbeitet werden. Diese Kombination ist unter BtL-Pfaden im Zusammenhang mit dem bioliq®-Prozess des KIT beschrieben.

Mit diesem DL-Pfad befassen sich Firmen wie z. B. die BTG Biomass Technology Gruppe in den Niederlanden und die kanadische Firma Ensyn, die mit Honeywell/UOP die Technologie-Firma Envergent als Joint Venture gegründet hat. In Ontario/Kanada befindet sich eine Ensyn-Demoanlage für 65.000 t/a Holzdurchsatz und 36.000 t/a Benzinproduktion in Bau [42].

Forschungsseitig wird dieser Pfad sowohl national als auch international von sehr vielen Gruppen bearbeitet.

#### **DL-Pfad 2:**

Der DL-Pfad 2 unterscheidet sich vom DL-Pfad 1 dadurch, dass die Schnellpyrolyse unter Wasserstoffdruck als Hydrolyse durchgeführt wird. Dadurch verbessert sich die Qualität des Rohöles erheblich, so dass der Aufwand der Hydrierung zu Kohlenwasserstoffen deutlich geringer ist.

Diesen Pfad verfolgt insbesondere das Gas Technology Institute (GTI) in Chicago/USA in Zusammenarbeit mit Shell. In Des Plaines/USA ist eine Pilotanlage für einen Biomasedurchsatz von 50 kg/d in Betrieb, ausgelegt auf eine Benzinproduktion von 4 t/a [42].

#### **DL-Pfad 3:**

Im DL-Pfad 3 wird eine hydrothermale Solvolyse durchgeführt. Dabei findet die Reaktion in einer Wasserphase unter nahekritischen oder überkritischen Bedingungen (150 bis 250 bar, 320 bis 380 °C) statt. Dadurch lässt sich die Biokohlebildung praktisch vollständig unterdrücken. Das Rohöl hat einen erhöhten Heizwert von rund 30 MJ/kg und ist teerartig in der Konsistenz. Dies ist bei der weiteren Aufarbeitung zu Kraftstoffen zu berücksichtigen.

Diesen Pfad bearbeitet in Deutschland insbesondere das KIT in Karlsruhe sowie zur mehrstufigen hydrothermalen Verflüssigung das DBFZ in Leipzig. International sind hier insbesondere Firmen wie Licella in Australien, Altaca in der Türkei (Catliq Prozess), Steeper Energy Group in Dänemark und Kanada sowie im Zusammenhang mit der hydrothermalen Desoxygenierung von Lipiden die Firma Applied Research Associates Inc. (ARA) in den USA zu

nennen. Eine Licella-Demonstrationsanlage für die Produktion von 350 t/a Bioöl befindet sich in Somersby/Australien in Betrieb [42]. Eine Steeper-Energy-Pilotanlage für die Produktion von 30 t/a Bioöl aus Holz befindet sich in Aalborg/DK in Betrieb [42]. Mit der hydrothermalen Desoxygenierung von Flashpyrolyseölen befasst sich die niederländische Firma BTG, ein weiteres Beispiel für die Produktionskostensenkung durch **Synergien**.

#### **DL-Pfad 4:**

Im DL-Pfad 4 wird eine organische Solvolyse unter Wasserstoffdruck durchgeführt. Hierbei findet die Reaktion typischerweise in einer Schwerölphase statt, die sich im Idealfalle regeneriert, also nicht oder nur geringfügig von außen zugeführt werden muss. Der Reaktor arbeitet hier nach dem Prinzip der Reaktivstrippung. Anstelle einer Schwerölphase sind auch andere, extern beizusteuende organische Lösungsmittel wie z. B. Tetralin denkbar.

Auch diese Art der Solvolyse kann die Biokohlebildung unterdrücken. Das Rohöl erreicht Heizwerte oberhalb von 30 MJ/kg und ist dünnflüssig. Dies minimiert den Aufwand der weiteren Aufarbeitung. Grundsätzlich bestehen hier die gleichen **Synergien**möglichkeiten, die unter DL-Pfad 5 beschrieben sind.

Den DL-Pfad 4 bearbeitet in Deutschland insbesondere die Firma Nexxoil in Kooperation mit der HAW Hamburg.

#### **DL-Pfad 5:**

Der DL-Pfad 5 betrifft die reine Variante der organischen Solvolyse. Es werden keine Druckgase eingesetzt. Der DL-Pfad 5 unterscheidet sich vom DL-Pfad 4 dadurch, dass unter Atmosphärendruck gearbeitet werden kann, wenn Schweröl als Reaktionsmedium dient. Dadurch minimiert sich der apparative Aufwand. Bei Einsatz anderer organischer Lösungsmittel richtet sich der nötige Druck nach deren Dampfdruck unter Reaktionstemperatur. Der Reaktor arbeitet am Siedepunkt der Sumpffphase und somit nach dem Prinzip der Reaktivdestillation.

Unter diesen Bedingungen entsteht ein gewisser Anteil an Biokohle. Das Rohöl hat einen recht hohen Heizwert zwischen 25 und 30 MJ/kg und ist dünnflüssig. Dies minimiert den Aufwand der weiteren Verarbeitung.

Als Rohstoffe kommen sowohl Biomasse als auch Abfälle biogener oder nicht-biogener Art (z. B. Plastikabfälle) in Frage. Darüber hinaus erlaubt dieser Verfahrensschritt **Synergien** mit anderen Pfaden, indem er z. B. zur Desoxygenierung von Lipiden einschließlich Algen oder anderen

Bioölen eingesetzt wird. Insbesondere können ungereinigte Altfette aus Lipid-Pfad 1 verarbeitet werden. Weitere **Synergiepotentiale** mit anderen Pfaden bieten sich über die Verarbeitung von Ligninen, die als Nebenprodukt in Bioraffinerie-Pfaden entstehen.

Den DL-Pfad 5 bearbeitet in Deutschland insbesondere die Firma Nexxoil in Kooperation mit der HAW Hamburg.

### **DL-Pfad 6:**

DL-Pfad 6 betrifft die katalytische Depolymerisation von kunststoffstämmigen Abfällen zu kohlenwasserstoffreichen Rohölen, die dann wie in den anderen DL-Pfaden über Hydrierung und Raffination zu Brenn- und Kraftstoffen oder Drop-in-Kraftstoffen verarbeitet werden. Daneben entsteht Gas, das zur Energieversorgung des Prozesses eingesetzt werden kann.

Die katalytische Depolymerisation von Polyolefinen wird in Deutschland insbesondere von der wastecon AG/Solvorec GmbH in der Region Hamburg bearbeitet.

### **DL-Pfad 7:**

DL-Pfad 7 stellt insofern einen Sonderfall dar, als hier gezielt Zuckermoleküle mehrstufig über Hydrogenolyse, hydrothermale Solvolyse und Hydrierung in Kombination mit anderen katalytischen Schritten zu flüssigen Kohlenwasserstoffmolekülen, insbesondere Alkanen, umgewandelt werden.

Dieser Pfad wird beispielsweise als BioForming-Prozess von Virent/USA in Kooperation mit Shell verfolgt. In Madison/USA befindet sich eine Virent-Demonstrationsanlage für die Produktion von 30 t/a Diesel aus Kohlenhydraten in Betrieb [42].

### **Algen- und Lipid-Pfade (HEFA, HVO, CVO):**

Algen- und Lipidpfade sind in der Regel recht eng miteinander verbunden, soweit Lipide die tragende stoffliche Grundlage darstellen.

Lipide (Triglyceride) können über verschiedene Wege wie den CVO-Prozess (s. Lipid-Pfad 1) oder die hydrothermale Solvolyse (s. Lipid-Pfad 1) zwecks Desoxygenierung oder den HVO/HEFA-Prozess (s. Lipid-Pfad 1) weiter zu flüssigen Kohlenwasserstoffen und Produkten wie Diesel oder Kerosin aufgearbeitet werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Hydrolyse der Triglyceride zu Fettsäuren und deren Umwandlung in Alkane über den unten beschriebenen PtL-Pfad 4.

Mit der Kultivierung und Verarbeitung von Algen befassen sich sowohl in Deutschland als auch weltweit sehr viele Forschungseinrichtungen und Firmen. Eine besondere Herausforderung besteht in der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch Senkung der Kultivierungs- und Verarbeitungskosten [37-39].

### **Algen-Pfad 1:**

Im Algenpfad 1 wird die Gesamtbiomasse von Algen entweder in getrockneter Form über Hydrolyse/DL-Pfad 2 (GTI/USA) bzw. organische Solvolyse/DL-Pfad 5 (HAW Hamburg) oder als feuchte Biomasse über hydrothermale Solvolyse/DL-Pfad 3 (ARA/USA mit Chevron Lummus Global/USA, Sapphire/USA mit Linde/D) verarbeitet. Forschungsseitig befassen sich mit der hydrothermalen Solvolyse von Algen z. B. die TU Freiberg und BTU Cottbus/Senftenberg.

### **Lipid-Pfad 1:**

Dieser Lipid-Pfad betrifft die Verarbeitung von Altfetten.

In einer ersten Variante werden Altfette direkt ohne Reinigung dem CVO-Prozess (Nexxoil mit HAW Hamburg) unterzogen, der der organischen Solvolyse/DL-Pfad 5 entspricht. CVO steht für „Cracked Vegetable Oils“. Hierzu befindet sich eine 200 kg/Woche Pilotanlage in Hamburg in Betrieb. Der CVO-Prozess führt primär zu Dieselprodukten. Sollen Kerosinprodukte hergestellt werden, ist eine katalytische Isomerisierung zur Verbesserung der Kältestabilität nachzuschalten.

Eine zweite Variante führt über eine Raffination (Reinigung) der Altfette zu reinen Lipiden, die der katalytischen Weiterverarbeitung über den HVO-Prozess (Neste/Finnland, UOP-Honeywell/USA, ENI/Italien) zugeführt werden. HVO steht für „Hydrotreated Vegetable Oils“. Anstelle von HVO wird auch die Abkürzung HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) verwendet, wenn allgemein fettsäureestämmige Rohstoffe und nicht speziell Triglyceride verarbeitet werden sollen. Der HVO-Prozess ist im Wesentlichen eine katalytische Hydrierung und Crackung der Öle, was primär zu Dieselprodukten führt. Ggf. folgt eine katalytische Isomerisierung, um die Kältestabilität zu verbessern. Dieser letztgenannte Schritt muss in jedem Falle erfolgen, wenn Kerosin als Flugkraftstoff hergestellt werden soll. Der HVO-Prozess ist bereits im Produktionsmaßstab in den Markt eingeführt. Führend ist die Firma Neste in Finnland mit einer weltweiten Produktionskapazität von 2,6 Mio. t/a.

Forschungsseitig befasst sich mit der Hydrierung von Lipiden in Deutschland z. B. die TU Freiberg.

Weitere Optionen sind die hydrothermale Solvolyse/DL-Pfad 3 (z. B. ARA/USA mit Chevron Lummus Global/USA) sowie die neue Kombination aus Hydrolyse der Lipide zu Fettsäuren und deren Weiterverarbeitung über die Kolbe-Elektrolyse im PtL-Pfad 4 (z. B. Infinite Fuels mit HAW Hamburg).

#### **Lipid-Pfad 2:**

Dieser Lipid-Pfad beginnt mit der klassischen Ölgewinnung aus Ölsaaten und entsprechender Weiterverarbeitung, wie unter Lipid-Pfad 1 beschrieben.

#### **Algen-Pfad 2:**

Der Algenpfad 2 geht in klassischer Weise über den Aufschluss der Algen nebst Separation der Lipide und deren Weiterverarbeitung, wie unter Lipid-Pfad 1 beschrieben.

Forschungseitig befassen sich mit diesem Pfad im Hinblick auf Kerosinproduktion beispielsweise das Projekt AUFWIND eines Konsortiums aus FZJ, EADS, DBFZ, TUM, FhG (UMSICHT), RWTH u.a. sowie das Projekt „AlgenFlug-Kraft“ eines Konsortiums aus TUM, Bauhaus Luftfahrt, Airbus, Clariant, Conys u.a.

#### **Algen-Pfad 3:**

In diesem Pfad werden Algen unter Zufütterung von Zucker im Dunkeln kultiviert, wobei die Lipidausbeute besonders hoch wird. Die Lipide lassen sich in diesem Falle relativ leicht extrahieren und dann entsprechend weiterverarbeiten. Ein Nachteil dieses Pfades besteht in der Verwendung des Nahrungsmittels Zucker, es sei denn, der Zucker wird aus Cellulose durch Hydrolyse erzeugt.

Dieser Pfad wird insbesondere von Solazyme in Kalifornien/USA verfolgt. Die Weiterverarbeitung der Lipide geschieht wie unter Lipid-Pfad 1 beschrieben. In Clinton/USA befindet sich eine Solazyme-Demonstrationsanlage für die Produktion von 20.000 t/a HVO-Diesel aus Kohlenhydraten in Betrieb [42].

#### **GtL-Pfad 2:**

Der GtL-Pfad 2 betrifft die Fermentation von CO<sub>2</sub> in Verbindung mit CO und/oder H<sub>2</sub> als Energiegeber. Als Quelle kommen z. B. Synthesegase, CO-reiche Industrieabgase, CO<sub>2</sub> aus Fermentationsprozessen oder CO<sub>2</sub> aus der Luft in Verbindung mit H<sub>2</sub> aus PtL- oder BtL-Pfaden in Betracht.

Aus der Fermentation der Gase können Alkohole, insbesondere Ethanol, Kohlenwasserstoffe wie Isopren oder Fettsäuren gewonnen werden. Isopren kann katalytisch in Benzinkomponenten umgeformt werden, während sich Fettsäuren über den PtL-Pfad 4 per Kolbe-Elektrolyse in

flüssige Kohlenwasserstoffe wie Olefine und Alkane umwandeln lassen.

Mit diesem GtL-Pfad befasst sich die Firma LanzaTech in Chicago/USA. In Soperton/USA ist bereits eine Demonstrationsanlage in Betrieb, die aus Biomasse-Synthesegas 15.000 t/a Ethanol produziert [42]. Zur Herstellung von Isopren oder Fettsäuren sind noch keine größeren Projekte bekannt.

#### **PtL-Pfad 4:**

Kernprozess vom PtL-Pfad 4 ist die Kolbe-Elektrolyse, die Fettsäuren unter Freisetzung von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> in flüssige Kohlenwasserstoffe wie Olefine und Alkane umwandelt. Als Fettsäurequellen kommen die oben beschriebenen Algen- und Lipid-Pfade in Verbindung mit der Hydrolyse sowie der Fettsäure produzierende GtL-Pfad 2 in Frage. Alternativ dazu können Fettsäuren auch über die Fermentation von Kohlenhydraten gewonnen werden.

Mit diesem neuartigen Pfad befassen sich insbesondere die Firma Infinite Fuels in Kooperation mit der HAW Hamburg und Fraunhofer ICT-IMM sowie die TU Braunschweig.

#### **PtL-Pfad 5:**

Im PtL-Pfad 5 wird die Erzeugung von Oxygenaten wie Dimethoxymethan (DMM) oder Oxymethylenethern (OME) betrachtet. Als Kohlenstoffquelle dient Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Die Umwandlung von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> zu DMM und OME erfolgt nicht über den Synthesegaspfad, sondern folgende Prozesspfade sind Gegenstand der Untersuchung: Mittels homogener Katalyse soll ein direkter Weg gefunden werden, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> zu DMM und OME zu konvertieren. Eine zweite Möglichkeit besteht in der Gewinnung von DMM und OME über Ameisensäure/Methanol. Als dritte Variante soll der bekannte Weg über Formaldehyd/Methanol optimiert werden.

Dieser Pfad wird im Rahmen des Kopernikus-Projektes „P2X“ bearbeitet, koordiniert durch die RWTH Aachen, das Forschungszentrum Jülich und die DECHEMA.

#### **Bioraffinerie-Pfade:**

Am Anfang typischer Bioraffinerie-Pfade, ausgehend von Lignocellulosen wie Holz und Stroh, stehen der Aufschluss und die Auftrennung in Polysaccharide als Zwischenprodukte sowie Lignin und ggf. Tallöl als Nebenprodukte. Das Lignin lässt sich effizient über DL-Pfade weiterverarbeiten. Die Polysaccharide können auf vielen innovativen Wegen zu Oxygenaten oder flüssigen Kohlenwasserstoffen weiterverarbeitet werden.

So stehen nach der Hydrolyse der Polysaccharide zu Einfachzuckern zahlreiche Wege zur Verfügung wie die katalytische Umwandlung zu Levulinsäure oder Fermentationen zu Ethanol, Itaconsäure, Isobuten oder Farnesen.

An der RWTH Aachen wurden im Rahmen des Exzellenzclusters „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ (Tailor-Made Fuels from Biomass, TMFB) neben weiteren die Itacon- und Levulinsäurewege verfolgt. In beiden Fällen lassen sich katalytisch Oxygenate für neue Kraftstoffe oder Additive gewinnen.

Farnesen und Isobuten sind demgegenüber jeweils geeignete Grundlage für die Herstellung von Drop-in-Kraftstoffen. So werden die Farnesen-Produktlinie insbesondere von Amyris/Kalifornien/USA mit Total/Frankreich und die Isobuten-Produktlinie von Global Bioenergies/Frankreich verfolgt.

Ethanol als Lignocellulose-Bioethanol der 2. Generation wird in Deutschland von Clariant im Sunliquid-Prozess in einer Demo-Anlage mit TRL 6-7 produziert. Außerhalb Deutschlands gibt es bereits zahlreiche TRL-8-Demo-Anlagen. In Europa läuft eine Anlage (Beta Renewables in Italien), zwei befinden sich in Bau (St1 in Finnland, EnergoChemica in der Slowakei). Auch in Nord- und Südamerika sind bereits vier Anlagen in Betrieb (POET-DSM und DuPont in den USA sowie GranBio und Raizen Energia mit Shell in Brasilien). [42, 45]

Eine Besonderheit stellt die Aufarbeitung von Tallöl zu Biokraftstoff dar. Tallöl ist ein Nebenprodukt der Zellstoffherstellung und besteht überwiegend aus Harz- und Fettsäuren. UPM betreibt in Lappeenranta/Finnland nach eigenen Angaben eine TRL-8-Demo-Anlage für die Produktion von 100.000 t/a Dieselerersatz aus Tallöl über Hydrierung und Fraktionierung.

### 2.14 Möglichkeit zum Co-Processing

In der gemeinsamen Verarbeitung von fossilen und regenerativen Ressourcen liegen besondere Chancen.

Zum einen können Technologien, die sich im fossilen Bereich bereits technisch bewährt haben, schrittweise durch Erhöhung regenerativer Anteile auf diese umgestellt werden. Dies erhöht sowohl die Betriebssicherheit als auch die Geschwindigkeit der Umstellung. Ein Beispiel dazu ist in Abb. 2 anhand der gemeinsamen Verarbeitung von Kohle und Biokohle im Rahmen der BtL-Pfade gezeigt. Hier können erprobte Kohlevergasungstechnologien genutzt werden. Dies ist z. B. der Ansatz im BioTfuel-Projekt eines internationalen Konsortiums, bestehend aus Thyssenkrupp Industrial Solutions, Total und weiteren Partnern (s. BtL-Pfade).

Ein weiteres Beispiel ist das Co-Processing von Flashpyrolyseöl und Vakuumgasöl in Raffinerieprozessen wie dem Fluid Catalytic Cracking (FCC) Verfahren. Ein solches Projekt wird z. B. von BTG/Empyro in Kooperation mit Petrobras durchgeführt.

Zum anderen eröffnen sich vollkommen neue Wege, regenerative Anteile in fossilen Produkten zu erhöhen wie z. B. im BioCRACK-Pilot-Projekt von BDI in Kooperation mit OMV in Schwechat bei Wien. Dort wird Biomasse in fossilen Schwerölen pyrolysiert. Dabei wird das Schweröl gekrackt, und es lösen sich signifikante Bioölanteile in den produzierten Mitteldestillaten. Diese sind als Grundlage zur Dieselherstellung geeignet. Dieses Verfahren hat eine gewisse verfahrenstechnische Verwandtschaft mit dem DL-Pfad 5 in Abb. 2.

### 3. Handlungsempfehlungen

Die Erforschung und Entwicklung der in Abb. 2 (s. Abschn. 2.13) dargestellten Wege zu fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen bis in den technischen Produktionsmaßstab wird vom Arbeitsausschuss „Alternative flüssige und gasförmige Kraft- und Brennstoffe“ begleitet und unterstützt.

Für die überwiegende Zahl von Pfaden bzw. Prozesslinien gibt es in Deutschland bereits sehr gute Verfahrensansätze, die zu einem großen Teil auf langjährigen Erfahrungen beruhen. Die BtL (Biomass-to-Liquid)- und DL (Direct-Liquefaction)-Pfade gehen ursprünglich sogar auf deutsche Entwicklungen in den 1920er Jahren zurück, die nach den Ölkrisen der 1970er Jahren wieder aufgegriffen wurden. In diesem Bereich ist die technische Umsetzbarkeit bereits in vielen Pilot- und Demonstrationsanlagen nachgewiesen. Auch an innovativen Ansätzen mangelt es nicht. Dem modernen Tailor-Made-Fuels-from-Biomass (TMFB)-Pfad schließlich wurde an der RWTH Aachen ein Exzellenzcluster gewidmet, und die Umsetzung von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> zu modernen Kraftstoffen soll intensiv im Rahmen der Kopernikus-Projekte erforscht werden.

Allerdings ist außerhalb Deutschlands sowohl in Europa als auch weltweit eine große Dynamik im Bereich Forschung und Technologie-Entwicklung zu bemerken (vergl. Tab. 1). **Es besteht die Gefahr, dass Deutschland überholt wird und den Anschluss verpasst.**

**Daher besteht dringender Handlungsbedarf, und intensive Unterstützung aus Wirtschaft und Politik wird benötigt.**

Aus diesem Grunde werden ausgehend von den oben aufgeführten Fakten – in Ergänzung zu vielen anderen Lösungsansätzen – die folgenden Handlungsempfehlungen formuliert, die auf eine möglichst schnelle Markteinführung von fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen zielen:

#### 1. Ressourcenbasis auf Biomasse, Abfall- und Reststoffe sowie CO<sub>2</sub> erweitern:

Es scheint dringend geboten, nicht nur über Bioprodukte zu sprechen, sondern über alternative Produkte, die z. B. auch aus nichtbiogenen Abfall- und Reststoffen, aus der gemeinsamen Verarbeitung von regenerativen und fossi-

len Rohstoffen oder aus anderen nachhaltigen Ressourcen wie CO<sub>2</sub> unterschiedlicher Quellen entstanden sind. Mit hoher Wahrscheinlichkeit lassen sich nur dann alle verfügbaren Synergieeffekte nutzen und die benötigten Mengen an alternativen Produkten in der vorgesehenen Zeit bereitstellen. Außerdem ist die umfassende Berücksichtigung von Abfall- und Reststoffen, Sekundärrohstoffen und Nebenprodukten aus der Abfallaufbereitung eine wichtige Säule zukünftiger konsequent geschlossener Stoffkreisläufe als Bestandteil des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung.

Daher wird empfohlen, folgende Ressourcen als Basis für fortschrittliche alternative Brenn- und Kraftstoffe (gasförmige und flüssige) zuzulassen:

- » Biomasse (z. B. Lignocellulosen, Algen)
- » Biomasse-Fractionen (z. B. Lignin, Tallöl und Nicht-Nahrungslipide)
- » Biogene Abfall- und Reststoffe (z. B. Stroh, Abfall- und Bauholz, Klärschlamm, Altfett u. a. Lebensmittelabfälle)
- » Abfall- und Reststoffe, Sekundärrohstoffe und Nebenprodukte aus der Abfallaufbereitung (z. B. Kunststoff- und Gummiabfälle, Schmierölrecyclingrückstände, Lösungsmittelrückstände)
- » Regenerativ erzeugter Wasserstoff
- » CO<sub>2</sub> aus biogenen und nicht biogenen Prozessen sowie aus der Luft

#### 2. Co-Processing zulassen:

Die gemeinsame Verarbeitung von alternativen und fossilen Stoffen (Co-Processing) bietet große Chancen. So können z. B. durch die Mitverarbeitung von Stoffströmen aus alternativen Quellen sowohl in Erdölraffinerieprozessen als auch in Kohlevergasungsprozessen vorhandene Anlagen und Verfahren genutzt werden. Im Falle der Raffinerieprozesse wird gleichzeitig die Verarbeitung dieser Stoffe zu normgerechten Produkten gewährleistet. Zudem lässt sich der Übergang von fossilen zu alternativen Ressourcen beschleunigen, indem man der Anteil letzterer schrittweise über das Co-Processing unter Nutzung bewährter Technologien steigert.

Daher wird empfohlen, Brenn- und Kraftstoffe aus Co-Processing Verfahren als Alternative zuzulassen und zu zertifizieren.

Beispiele sind:

- » **Co-Processing von Fetten und Ölen, Altfetten, Kunststoff-Abfällen und Reststoffen mit fossilen Rohstoffen in Raffinerien**
- » **Co-Processing von Biomassen, Abfällen, Reststoffen mit fossilen Rohstoffen in Vergasungs- und Verflüssigungsprozessen**

#### **3. Gewinnung alternativer flüssiger Brenn- und Kraftstoffe in modernen Bioraffineriekonzepten verstärkt berücksichtigen:**

Durch die verstärkte Integration der Gewinnung fortschrittlicher alternativer flüssiger Brenn- und Kraftstoffe in zukünftige Bioraffineriekonzepte lassen sich weitere Synergieeffekte im Sinne der Effizienzsteigerung nutzen. Daher sollten künftige Förderprogramme den Aspekt der Verknüpfung von Bioraffinerie und Flüssigbrenn- und -kraftstoffproduktion berücksichtigen oder diesem mehr Gewicht beimessen. Im Zusammenhang mit der Roadmap Bioraffinerien der Bundesregierung vom Mai 2012 [4] ergeben sich hier besondere Chancen für Deutschland, eine richtungsweisende Rolle zu spielen.

#### **4. Synergien von Prozessen zur Herstellung von fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen mit PtX-Konzepten suchen:**

Die Speicherung von regenerativem Überschuss-Strom in Form von flüssigen Energieträgern hoher Energiedichte gilt als ein wichtiger Beitrag zur Lösung künftiger Speicherprobleme. Bei diesen PtL (Power-to-Liquid)-Konzepten ist allerdings wie auch bei PtG (Power-to-Gas)-Konzepten die Herausforderung zu meistern, den schwankend anfallenden Strom mit bevorzugt kontinuierlich laufenden Prozessen zu verknüpfen.

Hier sind neue Ideen gefordert. In der Vielzahl der in Abb. 2 dargestellten Verknüpfungen liegt eine Chance, bestimmte Prozesse im Sinne von „Smart Processing“ als

Bindeglied zu flexibilisieren. Daher sollten Prozesse zur Herstellung von fortschrittlichen alternativen Brenn- und Kraftstoffen in neu aufzulegenden oder weiterzuführenden Förderprogrammen zur Systemintegration im Rahmen von PtX-Konzepten wie z. B. „Kopernikus“ verstärkt berücksichtigt werden.

#### **5. Forschung und Entwicklung mit dem Ziel der beschleunigten Markteinführung von fortschrittlichen alternativen flüssigen Brenn- und Kraftstoffen intensiv fördern und verlässliche gesetzliche Rahmenbedingungen mit einer Perspektive über 2020 hinaus schaffen:**

Neben anderen Lösungsansätzen sollten fortschrittliche alternative flüssige Brenn- und Kraftstoffe angesichts der Faktenlage in ihrer Bedeutung für das Gelingen der Energiewende und des Klimaschutzes nicht unterschätzt werden.

In Deutschland gibt es dazu bereits sehr gute verfahrenstechnische Ansätze, innovative Ideen, langjährige Erfahrungen und Forschungstraditionen. Aber es mangelt an Unterstützung und Dynamik in der Forschung und der Technologie-Entwicklung bis zur Marktreife. Förderung ist unabdingbar, um alle nötigen Prozessschritte möglichst schnell in den Produktionsmaßstab zu bringen und das zusätzlich erforderliche Risikokapital freizusetzen. Insbesondere muss auch das finanzielle Risiko für jeweils erste Produktionsanlagen ihrer Art dabei reduziert werden.

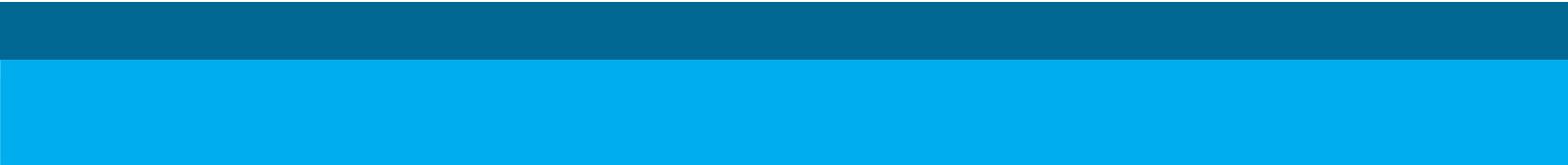
Es bedarf also jetzt mit Blick auf die erforderlichen Investitionen über 2020 hinaus langfristig verlässlicher und kohärenter förderpolitischer Rahmenbedingungen, die derzeit vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussion über eine Förderpolitik im Bereich der Biokraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen nicht gegeben sind. Andernfalls ist zu befürchten, dass sich Deutschland bzw. die EU mit Blick auf die absehbare globale Entwicklung bei Biokraftstoffen ins Abseits stellen.

Ein von Politik und Wirtschaft gemeinsam getragenes Förderprogramm und verlässliche gesetzliche Rahmenbedingungen mit einer Perspektive über 2020 hinaus bieten die Chance, sowohl die politischen Ziele als auch eine technologische Führungsrolle zu erreichen und damit neue Arbeitsplätze für Deutschland zu schaffen.

## 4. Quellen

- [1] Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung. Berlin, 14.11.2016
- [2] Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung. Berlin, 12.06.2013
- [3] Hightech-Strategie der Bundesregierung. Berlin, Aug. 2014
- [4] Roadmap Bioraffinerien der Bundesregierung. Berlin, Mai 2012
- [5] Nationale Politikstrategie Bioökonomie der Bundesregierung. Berlin, 17.07.2013
- [6] Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung: [www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Nachhaltigkeitsstrategie/\\_node.html](http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Nachhaltigkeitsstrategie/_node.html)
- [7] Strategie der Bundesregierung zur Rohstoffsicherung und zum Ressourcenschutz: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Industrie/rohstoffe-und-ressourcen.html>
- [8] EU Energie- und Klimaschutzpaket 2030: EU Ratsbeschluss zum Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030. Brüssel, 23.-24.10.2014
- [9] New Proposal for the EU Renewable Energy Directive (RED II): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung) mit Anhängen. COM(2016) 767 final, 2016/0382 (COD). Brüssel, 23.02.2017
- [10] IEA Key World Energy Statistics 2014
- [11] BMWi: Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2015. <http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/erneuerbare-energien-in-zahlen-2015.html>
- [12] Shell: New Lens Scenarios. Amsterdam, März 2013
- [13] IEA: Technology Roadmap Biofuels for Transport. Paris 2011
- [14] BMWi: Statistische Zahlen zur Energieversorgung. Juli 2016
- [15] Volker Quaschnig: Sektorenkopplung durch die Energiewende. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Juni 2016
- [16] DENA-Studie: Hintergrundpapier: Energieverbrauch und Energieträger im Straßenverkehr bis 2025. Berlin, April 2013
- [17] DENA-Studie: Ungeliebt, aber unentbehrlich. Bedarf und Produktion von Mineralöl im künftigen Energiemix. Berlin, September 2011
- [18] DLR-Studie: Der PKW-Markt bis 2040: Was das Auto von morgen antreibt. Stuttgart, August 2013
- [19] BMVI: Verkehr in Zahlen 2015/2016. Sept. 2015
- [20] Franz Söldner (EU Commission): Alternative Fuels Infrastructure. Fachgespräch zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung. Berlin, 12.09.2012
- [21] AIREG: Fakten und Handlungsempfehlungen zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung. Berlin, Dezember 2013
- [22] MKS Kurzstudie: Erneuerbare Energien im Verkehr – Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Berlin, März 2015
- [23] Verbändestudie: Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland – Weichenstellungen bis 2050. WWF DE, BUND, Germanwatch, NABU, VCD, Juni 2014
- [24] UBA-Studie: Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung. Dessau-Roßlau, April 2015
- [25] Shell-Studie: Nach Super E10: Welche Rolle für Biokraftstoffe? – Fakten, Trends und Perspektiven. Darmstadt, Heidelberg, Hamburg, September 2012
- [26] AG Energiebilanzen e.V.: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2014. Berlin, März 2015
- [27] Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung: Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen. BGBl. I 3182, 30. September 2009
- [28] European Industrial Bioenergy Initiative (EIBI) Key Performance Indicators (KPI), Dezember 2011
- [29] Thomas Willner: Thermochemische Direktverflüssigung. ProcessNet Infotag „Alternative Brenn- und Kraftstoffe“. Frankfurt/Main, 18.10.2011

- [30] Axel Graf Bülow: Diversifizierung der Energiebasis im Verkehr – Herausforderungen für die Kraftstoffinfrastruktur. Fachgespräch zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung. Berlin, 12.09.2012
- [31] Armin Günther: Herausforderungen und Potentiale für den Anlagenbau im erneuerbaren Brenn- und Kraftstoffsektor. ProcessNet Infotag „Alternative Brenn- und Kraftstoffe“. Frankfurt/Main, 18.10.2011
- [32] BMVBS-Studie: Globale und regionale Verteilung von Biomassepotenzialen. Berlin, November 2010
- [33] EU Studie: Biomass Futures – Atlas of EU biomass potentials. Brüssel, Februar 2012
- [34] S. Majer, K. Stecher, P. Adler, D. Thrän, F. Müller-Langer: Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen: Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima; Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) AZ Z14/SeV/288.3/1179/UI40 [online]. Leipzig, Juli 2013
- [35] UBA-Studie: Globale Landflächen und Biomasse. Dessau-Roßlau, Juni 2013
- [36] FNR-Studie: Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen – Status quo in Deutschland. Gülzow, 2015
- [37] IRENA-Studie: Boosting Biofuels – Sustainable Paths to Greater Energy Security. 2016
- [38] IEA Bioenergy Task 39: State of Technology Review – Algae Bioenergy. An IEA Bioenergy Inter-Task Strategic Project. January 2017
- [39] DECHEMA e.V.: Mikroalgen-Biotechnologie – Gegenwärtiger Stand, Herausforderungen, Ziele. Frankfurt/Main, Februar 2016
- [40] F. Müller-Langer, S. Majer, S. O’Keeffe: Benchmarking biofuels – a comparison of technical, economic and environmental indicators. Energy, Sustainability and Society 2014, 4:20
- [41] F. Müller-Langer, N. Dahmen: Biofuels for transport in Germany. IEA Task 39 Bioenergy, Newsletter Issue 41, pp 4-12, December 2015
- [42] IEA Task 39 Bioenergy: Commercializing Liquid Biofuels from Biomass. Bioenergy2020+ database on facilities for the production of advanced liquid and gaseous biofuels for transport: <http://demoplants.bioenergy2020.eu/>
- [43] EU Horizon 2020 – Work Programme 2014-2015, General Annexes: Technology readiness levels (TRL)
- [44] I. Krossing et. al.: Die Konversion von CO<sub>2</sub> mit H<sub>2</sub> zu Methanol als nachhaltiger chemischer Energiespeicher. Abschlussbericht zum DBU-Projekt „MethaKats“ AZ 29629. Freiburg, Dezember 2014
- [45] M. D. Seefeldt: Erfolgreiche Realisierung einer kommerziellen 2G Bioraffinerie. 14. Internationaler Fachkongress für erneuerbare Mobilität „Kraftstoffe der Zukunft“. Berlin, 24.01.2017



DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e.V.

Theodor-Heuss Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

Telefon: 069 7564-0

Telefax: 069 7564-117

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