



Februar 2021

# Regenerative Kraftstoffe im System betrachtet

## Zur Rolle von reFuels in Energiesystemanalysen

Lisa Schmieder, Dirk Scheer  
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

### Kontakt

Lisa Schmieder  
Email: [lisa.schmieder@kit.edu](mailto:lisa.schmieder@kit.edu)  
Tel. 0721-608-23007

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Ergebnisse zur Rolle von reFuels in Energiesystemanalysen</b> .....	<b>6</b>
3.1	<b>Charakterisierung der Transformationspfade</b> .....	<b>6</b>
3.2	<b>Strategien im Verkehrssektor: vermeiden, verlagern, verbessern</b> .....	<b>9</b>
3.3	<b>Relevanz der Kraftstofftypen, Einsatzgebiete und Mengenpotenziale</b> .....	<b>12</b>
3.4	<b>Potenziale und Grenzen von reFuels</b> .....	<b>16</b>
3.5	<b>Politische Rahmenbedingungen</b> .....	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>23</b>
	<b>Annex: Template zur vergleichenden Analyse der Studien</b> .....	<b>26</b>



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datenbasis.....	5
Tabelle 2: Transformationspfade: Vergleichende Charakterisierung der Studien und Szenarienbündel.....	8
Tabelle 3: Rolle der Klimaschutzstrategien "vermeiden, verlagern und verbessern" in den Studien .....	11
Tabelle 4: Rolle der Kraftstoffe in den Studien .....	13
Tabelle 5: Betrachtete Einsatzgebiete von synthetischen Kraftstoffen .....	15
Tabelle 6: Technologieoffenheit vs. Technologiewahl .....	16
Tabelle 7: Push- und Pull-Maßnahmen für synthetische Kraftstoffe .....	20



## 1 Einleitung

Trotz aller politischen Ziele ist es bislang nicht gelungen, die Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland unter das Niveau des Jahres 1990 zu senken. Erschwerend kommt hinzu, dass die Emissionen seit einigen Jahren im Verkehrsbereich wieder zunehmen. Die Bundesregierung hat in ihrem Energiekonzept aus dem Jahr 2011 für den Verkehrsbereich als Energiewendeziel bis 2020 eine Reduktion des Endenergieverbrauchs im Verkehr um 10% und bis 2050 um rund 40 % gegenüber 2005 vorgegeben; und die Steigerung der Anzahl der Elektrofahrzeuge bis 2020 auf 1 Mio. und bis 2030 auf 6 Mio. Fahrzeuge. Mittlerweile wird klar: die Ziele für 2020 werden aller Voraussicht nach nicht nur nicht erreicht, sondern bei weitem verfehlt. Zum 1. Januar 2020 waren rund 136.000 Elektrofahrzeuge in Deutschland angemeldet – der Endenergieverbrauch im Verkehr lag im Jahr 2018 mit rund 2.705 PJ deutlich über dem Verbrauch von 2.585 PJ des Jahres 2005 (UBA 2020).

Die Bundesregierung hat über den Klimaschutzplan 2050 weitere Zielsetzungen auch für den Verkehrsbereich definiert. Für das Jahr 2030 sieht der Klimaschutzplan 2050 über sog. Sektorziele eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs um 40 bis 42% gegenüber 1990 vor; dies entspricht einem erlaubten Ausstoß von knapp 100 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (BMU 2016). Die Einsparungen sollen über Effizienzsteigerungen und einen verstärkten Einsatz THG-neutraler Energie erreicht werden. Die Zielsetzung, die Emissionen nun innerhalb einer Dekade signifikant zu reduzieren, ist jedoch in Anbetracht der – trotz zahlreicher Maßnahmen – weiteren Stagnation der CO<sub>2</sub>-Emissionen der letzten drei Jahrzehnte sehr ehrgeizig und verlangt ein tiefgehendes Umdenken und akuten Handlungsbedarf.

Regenerativen Kraftstoffen kann dabei eine wichtige Rolle als Beitrag zum Klimaschutz im Verkehrssektor zukommen. Wie dieser Beitrag aussehen kann, wird im Folgenden über eine Literaturanalyse basierend auf aktuellen Studien der Energiesystemanalyse zur deutschen Energiewende untersucht (vgl. nähere Erläuterungen in der Box). Im Rahmen der Energiesystemmodellierung liefern Energieszenarien wichtige Beiträge für die zukünftige Ausrichtung einer klimaschutzorientierten Energie- und Verkehrspolitik. Zudem spielen sie in der gegenwärtigen energiepolitischen Diskussion im Rahmen der Energiewende eine wichtige Rolle, indem sie Entscheidungen unterstützen und Orientierung bieten. Allerdings existiert eine Vielzahl von Einzelstudien mit teilweise unterschiedlichen Modellierungsansätzen, Annahmen und Datengrundlagen. Eine vergleichende Betrachtung der wichtigsten Studien mit Blick auf unterschiedliche Kraftstoffrouten ist daher ein wichtiger Beitrag aus systemanalytischer Sicht, um über eine gemeinsame Wissensbasis fundierte Abschätzung der Rolle von Kraftstoffen für die Diskussion zukünftiger Transformationspfade und deren potenzielle Implikationen zu schaffen.

### „Energieszenarien“

In der Energieforschung und -politik haben sog. Energieszenarien als systemanalytische, oftmals computerbasierte Ansätze große Bedeutung (Börjeson et al. 2006; Nursimulu 2015). Diese lassen sich unterscheiden in vorhersageorientierte, explorative und normative Zukunftsstudien (Nursimulu 2015). Vorhersageorientierte Ansätze sind in der Regel computerbasierte Simulationsrechnungen mit einem quantitativen Design. Verschiedene Aspekte von prognoseorientierten, quantitativen Energieszenarien wurden herausgestellt: Es können top-down (makroökonomische), bottom-up (techno-ökonomische oder ingenieurwissenschaftliche) oder hybride Modellierungen differenziert werden. Diese unterscheiden sich u.a. nach der Fokussierung auf ein ökonomisches Gleichgewicht (partiell oder generell), Optimierung (Minimierung/Maximierung von Variablen wie Kosten, Nachhaltigkeitsmetrik, Wohlfahrt, Gewinn), Input-Output-Modelle, ökonomische oder Multi-Agenten-Modelle (Herbst et al. 2012), die keine bzw. stark vereinfachte Verhaltensannahmen für Akteure unterstellen. Über einen Algorithmus, indem die Wirkungsbeziehungen hinterlegt sind, werden zukünftige Systemausprägungen „errechnet“. Auf Basis einer extrapolierten Trendfortschreibung über historische Daten werden Prognosen unter plausiblen Annahmen von Randbedingungen, wie etwa bestimmte Politikentscheidungen, geliefert. Explorative Ansätze sind oftmals auch quantitativ, können aber auch ein qualitatives Design zugrunde legen. Auch diese Ansätze basieren auf plausiblen Trendfortschreibungen, legen allerdings einen deutlichen Fokus auf sudden events – also Ereignisse, die zu disruptiven Entwicklungen führen können, die dann fortgeschrieben werden. Normative Szenarien im Sinne von Zielszenarien nehmen im Vergleich eine entgegengesetzte Perspektive ein, indem sie die Zukunftsausprägung nach bestimmten normativen Zielsetzungen zugrunde legen, um dann ‚rückwärts‘ den Weg zur Gegenwart zu ‚berechnen‘.

Quelle: Scheer & Nabitz 2019: 17-18



Im Rahmen des reFuels-Projektes wurde daher eine Desk Research-basierte Dokumentenanalyse zur Eruiierung von Kraftstoffen in unterschiedlichen Energiesystemanalysen durchgeführt. Zentrale Forschungsfrage war dabei, die Rolle von regenerativen Kraftstoffen (sowohl fortschrittliche Biokraftstoffe und strombasierte Kraftstoffe) in energiebezogenen Gesamtsystemanalysen zu untersuchen. Dabei stehen unterschiedliche Strategien im Verkehrssektor, einzelne Charakteristika der verschiedenen Kraftstoffrouten sowie die betrachteten Kraftstofftypen im Vordergrund.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der Analyse zusammen. Zunächst wird in **Kapitel 2** die Methode der Dokumentenanalyse näher erläutert. **Kapitel 3** stellt die Ergebnisse der verschiedenen Transformationspfade vor. Abschließend werden in **Kapitel 4** die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und Schlussfolgerungen gezogen.

## 2 Methodik

Die Analyse der verschiedenen Transformationspfade mit Blick auf regenerative Kraftstoffe wurde methodisch über eine Desk Research-basierte Dokumentenanalyse durchgeführt. Hierbei wurden relevante Studien aus den letzten sechs Jahren identifiziert, die auf die Rolle von diesen Kraftstoffen in klimaschutzorientierten Transformationspfaden fokussieren. Das Sample (vgl. dazu Tabelle 1) beinhaltet sowohl Studien zum gesamten Energiesystem als auch sektorspezifische Szenarien zum Verkehr, die jeweils unterschiedliche methodische Vorgehensweisen abdecken.

*Tabelle 1: Datenbasis*

Fokus: Gesamtes Energiesystem	
1.	Ausfelder et al. (2017): Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems
2.	Bründlinger et al. (2018): Teil 1/ Teil 2: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende
3.	Gerbert et al. (2018): Klimapfade für Deutschland
4.	Gerhardt et al. (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr
5.	Pfluger et al. (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland
6.	Repenning et al. (2015): Klimaschutzszenario 2050
Fokus: Verkehrssektor	
7.	Bergk et al. (2018): Beitrag strombasierter Kraftstoffe zum Erreichen ambitionierter verkehrlicher Klimaschutzziele in Baden-Württemberg. Kurzgutachten
8.	Bergk et al. (2016): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050
9.	Erhard et al. (2014): Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland
10.	Hobohm et al. (2018): Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende
11.	Kasten et al. (2016): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050
12.	Klein et al. (2017): Erneuerbare Gase - ein Systemupdate der Energiewende
13.	Kramer et al. (2019): Defossilisierung des Transportsektors
14.	Schnülle et al. (2016): Optionen für die Integration von Power-to-Fuel in den Energiewendeprozess aus einer sozioökonomischen Perspektive
15.	Siegemund et al. (2017): The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU
16.	Zimmer et al. (2016): Renewbility III

Quelle: eigene Darstellung

Auf der Basis einer ersten Sichtung der Studien wurde ein vergleichendes Analyseraster erarbeitet, um die Bedeutung der Kraftstoffe in den Transformationspfaden vergleichend zu erfassen. Das hierbei herangezogene Template als vergleichendes Analyseraster ist im Annex dargestellt. Dabei standen folgende inhaltliche Aspekte bei der vergleichenden Auswertung im Vordergrund:

- *Szenarienbeschreibung und Methodik*: Zieljahr, Systemdimension, Raumdimension, Schwerpunktsetzung Szenarien und Ergebnisdimensionen
- *Zoom 1 „vermeiden“, „verlagern“ und „verbessern“*: Grobe Einordnung zum Verhältnis der 3 Strategien „vermeiden“, „verlagern“ und „verbessern“
- *Zoom 2 Alternative Antriebe und refuels*: Betrachtete Kraftstofftypen, Energie- und Antriebsmix, Verhältnis Kraftstoffe und alternative Antriebe, Rolle der Kraftstoffe in den Szenarien
- *Zoom 3 Fokus Kraftstoffe*: Energieverbrauch reFuels, Positionen zu Biokraftstoffen und strombasierten Kraftstoffen, Hemmnisse und Grenzen von refuels
- *Zoom 4 Lenkungsinstrumente*: Verkehrspolitische Instrumente zur Förderung der Kraftstoffroute

Nachfolgend werden die Ergebnisse der vergleichenden Analyse dargestellt.

## 3 Ergebnisse zur Rolle von reFuels in Energiesystemanalysen

### 3.1 Charakterisierung der Transformationspfade

Die betrachteten Studien entwerfen je unterschiedliche Transformationspfade in die Zukunft. Dadurch sollen wissenschaftlich fundiert mögliche, rationale, wahrscheinliche, optimierte und/oder sozialverträgliche Wege für ein klimaverträgliches Energie- bzw. Verkehrssystem aufgezeigt werden, um Entscheidungsträger\*innen als Handreichung und Orientierung für die Konkretisierung und Ausgestaltung der Transformation zu dienen. Diese unterschiedlichen Energie- und Verkehrszukünfte zeigen die prinzipielle Offenheit und Bandbreite eines avisierten Systemumbaus. Im Folgenden werden die Bandbreite der unterschiedlichen Studien ausgewertet und vergleichend die Grundcharakteristika der Szenarienbündel betrachtet. In Tabelle 2 werden zusammenfassend die wichtigsten Charakteristika der Szenarienbündel studienbezogen dargestellt.

Gemeinsam ist allen Studien eine Festschreibung des **Zielsystems** auf Klimaschutzorientierung. Die zukünftig avisierte Transformation ist als Zielszenario mit ex-ante festgelegten, unterschiedlichen Vorgaben zur CO<sub>2</sub>-Reduktion formuliert. Es lässt sich bei der Zielformulierung eine minimale und ambitionierte Klimaschutzerreichung unterscheiden. Minimale Klimaschutzszenarien orientieren sich am 2-Grad-Ziel mit einer avisierten CO<sub>2</sub>-Reduktion um 80 % im Vergleich zu 1990. Ambitionierte Klimaschutzszenarien orientieren sich am 1,5-Grad-Ziel mit einer CO<sub>2</sub>-Reduktion von 90 bis 95%, das mit dem Übereinkommen von Paris im Jahr 2015 vertraglich festgelegt wurde. Damit haben sich die Vertragsländer zum Ziel gesetzt, den globalen Temperaturanstieg auf möglichst 1,5 Grad zu begrenzen. Neben den Szenarienbündeln zur Klimaschutzerreichung sehen fast alle Studien zudem als Vergleichsgröße sogenannte Basis- oder Referenzszenarien vor. Basisszenarien schreiben die Gegenwart im Sinne eines „so weitermachen wie bisher“ fort. Als Trendfortschreibung verfehlen Basisszenarien in der Regel die Zielfestlegung und sollen über einen Szenarienvergleich die Bandbreite zu notwendigen Maßnahmen und angenommenen Rahmenbedingungen im Vergleich zur Nicht-Zielerreichung verdeutlichen.

Als **Zieljahr** für die Transformationspfade gehen fast alle Studien vom Jahr 2050 aus. Punktgenau zur Mitte des Jahrhunderts ist die weitgehende bzw. vollständige Transformation des Energie- bzw. Verkehrssystems demnach vorgesehen. Vom Jahr 2020 gerechnet sehen die Pfade entsprechend eine Übergangszeit von 30 Jahren für einen minimalen bzw. ambitionierten Klimaschutz vor. Eine Ausnahme bilden Schnülle et al. (2016), die einen Zielhorizont von 15 Jahren bis zum Jahr 2035 definieren, sowie Bergk et al. (2018) mit einer Zielorientierung bis zum Jahr 2030. Die letztgenannte Studie entwickelt allerdings kein eigenständiges Zielszenario, sondern lehnt sich an ein bereits zuvor entwickeltes Zielszenario für Baden-Württemberg mit einem Zielhorizont

2050 an (Schmidt et al. 2017). Auf dieser Basis wird von den Autoren die Betrachtung strombasierter Kraftstoffe zum Erreichen ambitionierter verkehrlicher Klimaschutzziele in Baden-Württemberg für das Zwischenziel 2030 angepasst.

Betrachtet man die **Systemperspektive**, so lassen sich die Studien zunächst eindeutig dem Energiesystem oder Verkehrssystem zuordnen. Der überwiegende Teil der Studien untersucht strombasierte Kraftstoffe aus einer übergeordneten Energiesystemperspektive. Dabei wird die Gesamtenergienachfrage über die Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und ggf. Industrie über Modellrechnungen ermittelt, um die Bedeutung von strombasierten Kraftstoffen abzuschätzen. Dafür werden passgenaue, sektorspezifische Modelle verwendet, die in einem integrierten Modellverbund das vollständige Energiesystem abdecken und über sogenannte bottom-up Modelle Energieverbräuche berechnen und die dafür notwendige Energiebereitstellung über die kosteneffizientesten Technologieoptionen ermitteln. Mit dem Untersuchungsfokus auf Verkehr geht in der Regel eine tiefergehende Sektorbetrachtung einher.

Die **Raumperspektive** der Szenariestudien fokussiert überwiegend auf Deutschland. Es wird damit die Zukunftsentwicklung des deutschen Energie- bzw. Verkehrssystems untersucht. Die Perspektive auf Deutschland wird teilweise ergänzt durch eine internationale Perspektive bezüglich der Energiebereitstellung. Dabei wird insbesondere die Bereitstellung von PtX-Energie bspw. im europäischen oder internationalen Ausland subsumiert. Zwei Studien sehen einen anderen Raumbezug vor: Bergk et al. (2018) analysieren den Beitrag strombasierter Kraftstoffe zum Erreichen ambitionierter verkehrlicher Klimaschutzziele für das Bundesland Baden-Württemberg. Siegemund et al. (2017) untersuchen das Potenzial strombasierter Kraftstoffe im europäischen Verkehrswesen.

Alle Studien sehen bestimmte **Szenarienbündel** vor, die über verschiedene Einzelszenarien unterschiedliche Zukunftsentwürfe entwickeln. Dabei lassen sich zwei grundsätzliche Richtungen unterscheiden. Zum einen Studien mit einer geringen Anzahl unterschiedlicher Szenarien (max. 4) sowie Studien mit einer ausdifferenzierten Anzahl von unterschiedlichen Szenarien (größer 4). In der Regel operieren alle Studien mit der Ausweisung sogenannter Referenz- oder Basisszenarien zur Kontrastierung. Dabei wird der gegenwärtige Zustand als Trend bis zum Zieljahr fortgeschrieben. Diese Zukunftsexploration ergibt in der Regel eine Zielverfehlung im Sinne einer CO<sub>2</sub>-Reduktion zur Erfüllung von Klimaschutzzvorgaben. Demgegenüber stehen dann je nach Studie wenige oder viele Zielszenarien, die bestimmte minimale oder ambitionierte Klimaschutzzvorgaben erfüllen.

Die Szenarienvielfalt erfolgt dann über bestimmte inhaltliche **Schwerpunktsetzungen innerhalb der einzelnen Szenarien**. Dabei werden für das Design einzelner Szenarien inhaltliche Vorgaben über Annahmen gemacht, um spezifische Auswirkungen besser ausleuchten zu können. Es lassen sich drei unterschiedliche Schwerpunktsetzungen identifizieren. Zum einen werden unterschiedliche Klimaschutzpolitiken definiert. Gerbert et al. (2018) unterscheiden Szenarien nach der Art internationaler Klimaschutzkooperation. Während ein Szenario anhand einer globalen, kooperativen Klimaschutzpolitik ausgestaltet ist, orientiert sich ein anderes Szenario an einem nationalen Alleingang. Zum anderen liegt eine Schwerpunktsetzung bei vielen Studien auf Technologiepriorisierung. Dabei werden für einzelne Szenarien bestimmte Technikpfade als Randbedingung vorgegeben – oder aber als bottom-up Ansatz technologieoffen über eine gesamtsystemische Kostenoptimierung untersucht. Technikvorgaben für Szenarien fokussieren auf unterschiedliche Antriebszenarien wie bspw. Wasserstoff, PtX, Elektromobilität oder Brennstoffzelle. Eine dritte Schwerpunktsetzung differenziert nach unterschiedlichen verkehrspolitischen Maßnahmen. Hier unterscheiden sich Szenarien nach verschiedenen Interventionen im Bereich Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung. Über daraus resultierende Unterschiede bei bspw. der Verkehrsträgernutzung (modal split) errechnen sich dann Energiebedarfs- und Technikunterschiede.

**Tabelle 2: Transformationspfade: Vergleichende Charakterisierung der Studien und Szenarienbündel**

Quelle	Szenarien <sup>1</sup>	Jahr	CO <sub>2</sub> -Reduktion	System	Raum <sup>2</sup>	Schwerpunktsetzung Szenarien	Ergebnisdimensionen
Ausfelder et al. 2017	7 (1/6)	2050	-60-90%	Energie	DE	H <sub>2</sub> ; PtG	Stromerzeugung, Brenn- und Kraftstoffe inkl. Importe; Gesamtsystemkosten; Umfang Sektorenkopplung
Bergk et al. 2016	3 (1/2)	2050	-98,5%	Verkehr	DE	Klimaschutzszenarios und Klimaschutzszenario E+ mit weitergehender Elektrifizierung im Straßenverkehr	Endenergieverbrauch; direkte THG-Emissionen
Bergk et al. 2018	1 (0/1)	2030	-90%	Energie	BaWü	Beitrag eines höheren Anteils strombasierter Kraftstoffe in 2030 zur Minderung der Treibhausgasemissionen	Energiebedarf Baden-Württemberg
Bründlinger et al. 2018	5 (1/4)	2050	-80-95%	Energie	DE (EU)	Elektrifizierung; Technologiemix	THG-Emissionen, Endenergieverbrauch, Stromnetz, Gesamtsystem, Kosten
Erhard et al. 2014	1 (0/1)	2050	-95%	Verkehr	DE	Szenario klimafreundlicher Verkehr mit Maßnahmen zu Vermeidung, Verlagerung, Verbesserung	Verkehrsnachfrage, Fahrzeugbestand, Energie- und Treibhausgasbilanz
Gerbert et al. 2018	5 (1/4)	2050	-80-95%	Energie	DE (Welt)	globaler Klimaschutz; nationaler Alleingang	80-95% Machbarkeit; Kosten (Vermeidung, Investitionen)
Gerhardt et al. 2015	1	2050	-80%	Energie	DE, EU	Biomasse- und Verkehrsszenario; Rohstoffverfügbarkeit; rechtliche Rahmenbedingungen	Energieverbrauch & Emissionen Verkehrsträger; Kostenoptimierung, Roadmap Verkehr
Hobohm et al. 2018	3 (1/2)	2050	-80-95%	Energie	DE	PtX mit CO <sub>2</sub> -Einsparung von 80 und 95%	Kostenoptimierung
Kasten et al. 2016	4 (0/4)	2050	THG-neutral	Verkehr	DE	Elektromobilität, PtX	Kostenoptimierung
Klein et al. 2017	2 (0/2)	2050	THG-neutral	System		Elektrifizierung; technologieoffenes optimiertes System	Kosteneffiziente Treibhausgasneutralität
Kramer et al. 2019	3 (1/2)	2050	100% Defossilisierung	Verkehr	DE	Kraftstoff-Antriebs-szenarien: Batterie, Brennstoffzelle, PtX	Elektrischer Energiebedarf; Kosten (Kraftstoff, Infrastruktur, Fahrzeug); Erreichbarkeit TtW-CO <sub>2</sub> -Emissionen
Pfluger et al. 2017	11 (1/10)	2050	-80-95%	Energie	DE	-95 %-Szenarien; dezentrales System; geringeres Biomassepotenzial; geringere europäische Ambitionen	Kostenoptimierung
Repenning et al. 2015	3( 1/2)	2050	-80-95%	Energie	DE	Bei -95%-Szenario Restbudget von ca. 60 Mio. t CO <sub>2</sub> ; Nachfrage	Verkehrsnachfrage, Fahrzeugbestand, Endenergiebedarf,





						nach Strom bzw. synthetischen Brennstoffen als bottom-up durch Aggregation der Nachfrage	
Schnülle et al. 2016	4 (2/2)	2035	k. A.	Verkehr	DE	Förderung und wirtschaftliche Anreize für Power-to-Fuel-Anlagen	Agentenmodellierung für Zubau von P2F-Anlagen
Siegemund et al. 2017	3 (1/2)	2050	-80-95%	Verkehr	EU	PtG-dominated; Electric-powertrain scenario;	Entwicklung E-Fuels, Verkehr, Erneuerbare, Energieeffizienz
Zimmer et al. 2016	6 (1/5)	2050	100% Defossilisierung	Verkehr	DE	Elektromobilität; Lebensqualität Innenstädte; Kraftstoffe, PKW-Maut, ohne Oberleitungs-LKW	Fahrleistung, Bestand PKW/LKW, Energiebedarf, THG-Emissionen, Kosten BIP, Beschäftigung
Legende: (1) In Klammer zuerst Anzahl Basisszenarien als Trendfortschreibung und nach Schrägstrich (/) Anzahl der Zielszenarien mit Klimaschutzorientierung; (2) In Klammern ggf. Energiebereitstellung international (z.B. EU, Welt)							

Quelle: eigene Darstellung

In der Gesamtschau der Studien lassen sich mit Blick auf die Charakterisierung der Transformationspfade die folgenden übergreifenden Aspekte herausdestillieren:

- Die in den einzelnen Studien aufgesetzten Szenarien zielen auf unterschiedliche Ergebnisdimensionen und unterscheiden sich mit Blick auf ihre Schwerpunktsetzung in den Dimensionen übergreifende Klimaschutzpolitiken, Technologiepriorisierung und Konkretisierung von verkehrspolitischen Maßnahmen.
- Häufig ist in den Studien aufgrund des verwendeten ökonomischen Gleichgewichtsmodells eine Kostenoptimierung für das Gesamtsystem enthalten. Dabei werden entweder technologieoffene Pfade oder mit Technologiepräferenzen der kostenoptimale volkswirtschaftliche Pfad berechnet.
- Daneben werden auch zukünftige Nachfrageentwicklungen (bspw. Verkehrsleistung, Fahrzeugbestand etc.) abgeleitet und darauf aufbauend Umweltemissionen, Energiebedarf sowie Bedarf an bestimmten Energieträgern ermittelt. Eine singuläre Ergebnisdimension enthält die agentenbasierte Simulation mit der Frage nach Zubaubedarf für PtX-Anlagen (Schnülle et al. 2016).

### 3.2 Strategien im Verkehrssektor: vermeiden, verlagern, verbessern

Für eine Defossilisierung des Verkehrssektors und eine nachhaltige Stadt- und Verkehrsplanung stehen im Wesentlichen drei zentrale Klimaschutzstrategien zur Verfügung: den Verkehr (1) „vermeiden“, (2) „verlagern“ und (3) „verbessern“. „Vermeiden“ meint dabei, dass durch eine sinnvolle Zuordnung städtischer Funktionen Wege verkürzt und somit das Verkehrsaufkommen reduziert werden kann. „Verlagern“ fokussiert auf eine Verschiebung des Modal Split hin zu nachhaltigen Verkehrsträgern (bspw. vom Auto auf den ÖPNV) und „Verbessern“ schließlich meint effizientere bzw. klimafreundlichere Antriebstechnologien. In der Gesamtschau der 16 analysierten Studien zeigt sich, dass die drei Strategien mit unterschiedlichen Akzentuierungen in nahezu allen Studien behandelt werden. Betrachtet man die Gesamtheit der Datenbasis, so fällt auf, dass die Strategie „verbessern“ mit den Teilbereichen „biogene Kraftstoffe“ und „strombasierte Kraftstoffe“ in allen Studien betrachtet wird, während die Strategien „verlagern“ und „vermeiden“ nur zum Teil diskutiert werden (vgl. Tabelle 3). Wie diese Strategien im Einzelnen inhaltlich in den Studien akzentuiert und ausgestaltet werden, wird in den nachfolgenden drei Abschnitten erläutert.

Im Kontext der Klimaschutzstrategie „**Vermeiden**“ geht die Verkehrs- und Stadtplanung davon aus, dass durch sinnvolle Zuordnung städtischer Funktionen Wege verkürzt und somit das Verkehrsaufkommen reduziert werden können. Dieser Annahme folgend unterstellen einige Studien (Bründlinger et al. 2018, Ausfelder et al.

2017, Bergk et al. 2016, Zimmer et al. 2016, Erhard et al. 2014), dass neben technischen Maßnahmen zur Verringerung des Energiebedarfs vor allem Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung (und -verlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel) ergriffen werden sollten. In welcher Form diese Verkehrsvermeidung allerdings angereizt und erreicht werden kann, wird in den Studien - abgesehen von übergreifenden Konzepten wie eine nachhaltige Stadt- und Regionalplanung (zum Beispiel Bründlinger et al. 2018) - nicht näher erläutert. Repenning et al. (2015) weisen auf eine Verteuerung des motorisierten Individualverkehrs hin. Zimmer et al. (2016) sehen kürzere Wege oder die Verringerung der Anzahl an Arbeitswegen als mögliche Elemente für eine Verkehrsvermeidung vor. Kasten et al. (2016) sehen im Kontext der Klimaschutzstrategie „vermeiden“ vor allem den Flugverkehr im Fokus: Im Flugverkehr gilt „[...] umso stärker das Gebot Verkehr zu vermeiden, zu verlagern und die Flugzeuge besonders effizient auszulegen“ (S. 86).

Die Strategie des „**Verlagerns**“ wird von ausgewählten Studien als wichtige Verkehrswendestrategie erachtet (z.B. Kasten et al. 2016) und in einigen Analysen näher betrachtet (z.B. Bründlinger et al. 2018, Gerbert et al. 2018, Ausfelder et al. 2017, Bergk et al. 2016, Zimmer et al. 2016, Repenning et al. 2015, Erhard et al. 2014), indem eine Modal Split-Verschiebung im Sinne einer Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs auf Fuß, Rad und Öffentlichen Verkehr angenommen wird. Die Studie von Repenning et al. (2015) unterstellt beispielsweise im Klimaschutzszenario 95 eine umfassende Änderung des Mobilitätsverhaltens jüngerer Generationen – weg vom reinen Besitzen eines Pkws hin zum Benutzen statt Besitzen (d.h. insbesondere Nutzung von Car-Sharing-Angeboten). Aus Sicht der Autoren ist damit auch eine Stärkung der Intermodalität verbunden, beispielsweise durch die Einbindung von Fahrradwegen in die gesamte Wegeketten. Dieses Verhalten wird derzeit in der Alterskohorte zwischen 18 und 25 Jahren beobachtet, sodass die Studie annimmt, dass dieses Verhalten auch im höheren Alter fortgeführt wird (sogenannter Kohorteneffekt, vgl. Repenning et al. 2015). Des Weiteren unterstellt die Studie im Kontext des „Verlagerns“ eine Verteuerung des motorisierten Individualverkehrs sowie eine verstärkte gemeinsame Pkw-Nutzung, was dazu führt, dass die Personenverkehrsnachfrage insgesamt zurückgeht. Schließlich betonen die Autoren, dass hiermit keine Mobilitätseinschränkung verbunden sei, sondern vielmehr eine Verlagerung zu nicht motorisierten Verkehrsträgern vorliege.

Auch Zimmer et al. (2016) sehen in ihrer Studie eine Verlagerung auf energieeffizientere und klimafreundlichere Verkehrsmittel, etwa durch die Stärkung multimodaler Lösungen, steuerliche Maßnahmen oder die Förderung des Radverkehrs. Ausfelder et al. (2017) betonen neue Geschäftsmodelle wie Car-Sharing, die bspw. das Problem der geringen Reichweite von Elektroautos entschärfen können, da der Kundschaft unterschiedliche Fahrzeuge für wechselnde Reichweitenbedarfe zur Verfügung gestellt werden. Ähnliche Annahmen finden sich auch bei Erhard et al. (2014), die unter der Prämisse einer höheren gewünschten Flexibilität der Nutzer\*innen eine erhöhte Diffusion von Sharing-Angeboten unterstellen. Besonders im urbanen und suburbanen Raum sehen die Autoren (Leih-)Fahrräder und Pedelecs sowie gut vernetzte Angebote des öffentlichen Verkehrs und elektrisch betriebene Car-Sharing-Fahrzeuge. Diese Angebote in Kombination mit einem leistungsfähigen Bahn- und Fernbusnetz mit bundesweit aufeinander abgestimmten Anschlüssen für längere Strecken veranlassen die Autoren zu der Annahme, dass im Jahr 2050 nur noch halb so viele Pkw wie heute auf den Straßen vorhanden sind. In eine ähnliche Richtung zeigen auch die Ergebnisse von Bergk et al. (2016), die auf Basis der Modal Split-Verschiebung von MIV auf Fuß, Rad und Öffentlichen Nahverkehr zusammengefasst mit der Vermeidungswirkung von einem Rückgang der Pkw-Fahrleistung um 28 % gegenüber der Referenz in 2050 ausgehen. Gerbert et al. (2018) hingegen sehen ein Verlagerungspotenzial von 7 Prozent der gesamten Personen und Güterverkehrsleistung von Pkw und Lkw auf Schiene, Binnenschiff und Bus, sowie nichtmotorisierte Verkehre in Städten. Die Autoren weisen darauf hin, dass „ausgehend von diesen in den Klimapfaden verlagerten 7 Prozent der Personen- und Güterverkehrsleistung möglicherweise ein zusätzliches Verlagerungspotenzial im Bereich einiger Prozentpunkte [besteht], das sich beispielsweise durch weitere Investitionen in die Kosteneffizienz des Systems Schiene und weitere Infrastrukturmaßnahmen realisieren ließe“ (Gerbert et al. 2018, S. 195).



Der Übergang zu alternativen Antrieben, die Steigerung der Antriebseffizienz sowie die Substitution fossiler durch regenerative Kraftstoffe beim Einsatz in Verbrennungsmotoren sind maßgebliche Hebel zur spezifischen Emissionsreduktion. Die Mehrheit der Studien sieht für den Bereich „**Verbessern**“ neben direktelektrischen Antrieben eine klare Relevanz von synthetischen Kraftstoffen für eine vollständige Defossilisierung des Verkehrssektors im Jahr 2050, insbesondere mit Blick auf eine 95%ige Treibhausgasemissionsreduktion (Bründlinger et al. 2018, Gerbert et al. 2018, Ausfelder et al. 2017, Bergk et al. 2016, Schnülle et al. 2016, Zimmer et al. 2016). Bei einer 80%igen Reduktion gibt es aus Sicht der meisten Autoren keinen zwingenden Grund, synthetische Kraftstoffe einzusetzen, denn die Nachfrage derjenigen Bereiche, die sich nur schwer auf erneuerbare Energien oder Strom umstellen lassen, kann mit dem verbleibenden Emissionsbudget durch fossile Energien gedeckt werden (zum Beispiel Pfluger et al. 2017, Repenning et al. 2015). Unabhängig davon, ob man eine stärkere Elektrifizierung oder einen breiteren Technologiemix in den Fokus nimmt, betonen die Studien, dass synthetische Kraftstoffe für die Erreichung der Klimaziele eine wichtige Rolle spielen (zum Beispiel Bründlinger et al. 2018). Auch mit prioritär zu implementierenden ambitionierten Maßnahmen zur Verlagerung, Vermeidung und Effizienzsteigerung verbleibt im Jahr 2050 ein sogenannter „Restbedarf“ an flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen im Verkehrssektor (Erhard et al. 2014). Wenige Studien betonen, dass der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen als flankierende, komplementäre Maßnahme gesehen werden soll und keinesfalls eine Alternative zu den Maßnahmen im Bereich von Vermeidung, Verlagerung und Effizienz darstellt (zum Beispiel Erhard et al. 2014, Zimmer et al. 2016). Andere Autoren plädieren dafür, dass synthetische Kraftstoffe nur dort eingesetzt werden sollen, wo keine direktelektrische Alternative besteht (Klein et al. 2017, vgl. dazu auch Abschnitt 3.4).

Tabelle 3: Rolle der Klimaschutzstrategien "vermeiden, verlagern und verbessern" in den Studien

Quelle	vermeiden	verlagern	verbessern	
			biogen	strombasiert
Ausfelder et al. 2017	✓	✓	✓	✓
Bergk et al. 2016	✓	✓	✓	✓
Bergk et al. 2018	✓	✓	✓	✓
Bründlinger et al. 2018	✓	✓	✓	✓
Erhard et al. 2014	✓	✓	✓	✓
Gerbert et al. 2018	○	✓	✓	✓
Gerhardt et al. 2015	○	○	✓	✓
Hobohm et al. 2018	○	○	✓	✓
Kasten et al. 2016	✓	✓	✓	✓
Klein et al. 2017	○	○	○	✓
Kramer et al. 2019	○	○	✓	✓
Pfluger et al. 2017	○	○	✓	✓
Repenning et al. 2015	✓	✓	✓	✓
Schnülle et al. 2016	○	○	✓	✓
Siegemund et al. 2017	○	✓	✓	✓
Zimmer et al. 2016	✓	✓	✓	✓

Legende: ✓ = Klimaschutzstrategie betrachtet, ○ = Klimaschutzstrategie nicht betrachtet

Quelle: eigene Darstellung

In der Gesamtschau der Studien lassen sich mit Blick auf die Klimaschutzstrategien im Kontext der Verkehrswende die folgenden übergreifenden Aspekte differenzieren:

- In (nahezu) allen Studien werden biogene und strombasierte Kraftstoffe als eine Klimaschutzstrategie für den Bereich des „Verbesserns“ gesehen, wenngleich für erstere aufgrund von Nachhaltigkeitsaspekten sowie Nutzungskonkurrenzen nur ein geringer Beitrag erwartet wird.
- Die Strategie „Verlagern“ wird von etwas mehr als der Hälfte der Studien (9 von 18) aufgegriffen, indem eine Modal Split-Verschiebung im Sinne einer Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs auf Fuß, Rad und Öffentlichen Verkehr in den Szenarien angenommen wird. Inwiefern eine solche avisierte Veränderung tatsächlich politisch und gesellschaftlich erreicht werden kann, bleibt weitestgehend offen und wird in den Studien nicht explizit beantwortet.
- Die Strategie „Vermeiden“ wird von der Hälfte der Studien (8 von 16) als wichtige Strategie sowohl zur Entlastung von Flächen- und Energiebedarfen als auch zur Verringerung des Verkehrsaufkommens thematisiert. In welcher Form diese Verkehrsvermeidung allerdings angereizt und erreicht werden kann, wird in den Studien abgesehen von übergreifenden Konzepten wie einer nachhaltigen Stadt- und Regionalplanung nicht näher erläutert.

### 3.3 Relevanz der Kraftstofftypen, Einsatzgebiete und Mengenpotenziale

Die Mehrzahl der Studien sieht eine geringe Rolle für **Biokraftstoffe** und damit ein begrenztes Potenzial zur Deckung des Kraftstoffbedarfs im Rahmen der Defossilisierung des Verkehrssektors (Hobohm et al. 2018, Kasten et al. 2016, Zimmer et al. 2016, Gerhardt et al. 2015). Eine Studie stuft Biokraftstoffe kurz- und mittelfristig als wichtig ein während zwei Studien keine Verwendung von Biokraftstoffen im Transformationsprozess (Erhard et al. 2014, Bergk et al. 2016) vorsehen. Pfluger et al. (2017) und Gerbert et al. (2018) weisen zudem darauf hin, dass alternative Optionen für den Biomasseinsatz in konkurrierenden Sektoren bestehen. Biomasse kann beispielsweise volkswirtschaftlich effizienter in der Industrie und im Energiesektor mit höheren Wirkungsgraden eingesetzt werden (Gebert et al. 2018). Bründlinger et al. (2018) betonen, dass nachhaltige Biokraftstoffe weiterhin eine wichtige Rolle spielen; sie allerdings im Vergleich zu anderen erneuerbaren Kraftstoffen u.a. aufgrund von Nutzungskonkurrenzen und Flächenverbrauch (Schnülle et al. 2016) sukzessive an Bedeutung verlieren. Ausfelder et al. (2017) beschreiben verschiedene Konzepte zum Einsatz von Bioenergie im Verkehrssektor ohne aber dabei eine Abschätzung zu deren Stellenwert zu geben. Das inländische Potenzial zur Deckung des Kraftstoffbedarfs ist begrenzt, sodass Hobohm et al. (2018, S. 147) zu einer „Analyse der langfristigen Positionierung der national verfügbaren Biomasse im Sinne eines optimalen Allokationspfades innerhalb des zukünftigen THG-neutralen Energiemixes in Deutschland“ raten. Auch Zimmer et al. (2016), die eine ausschließliche Nutzung von Abfall- und Reststoffen in den Renewability-Szenarien unterstellt, errechnet für das Jahr 2030 einen Beitrag von biogenen Kraftstoffen von rund 90 PJ (Zimmer et al. 2016). In der Gesamtschau lässt sich festhalten, dass die Mehrheit der Studien ein geringes Mengenpotenzial von biogenen Kraftstoffen als Beitrag zum Transformationsprozess prognostiziert.

Mit Blick auf **strombasierte Kraftstoffe** sind sich die Studien weitgehend einig, dass insbesondere für die Erreichung einer 95%igen Treibhausgasreduktion (gegenüber 1990) der Einsatz dieser Kraftstoffe von Relevanz ist. Die meisten Autoren sind sich zudem einig, dass für eine (kostenoptimale) Erreichung des 80%-Klimaziels strombasierte Kraftstoffe nicht zwingend notwendig sind (z.B. Gebert et al. 2018, Repenning et al. 2015). Kurzgefasst: für einen ambitionierten Klimaschutz sind synthetische Kraftstoffe notwendig – für einen minimalen Klimaschutz dagegen nicht. Bründlinger et al. (2018) weisen darüber hinaus darauf hin, dass für einen weitreichenden Einsatz von synthetischen Energieträgern ehrgeizige internationale Klimaschutzbemühungen eine zentrale Voraussetzung sind, die mit einer breiten internationalen Durchdringung der Technologien und den benötigten Energieträgerimporten nach Deutschland in 2050 einhergehen müssen. Hobohm et al. (2018) bezeichnen in diesem Zusammenhang den Einsatz von flüssigen, strombasierten Energieträgern unter Klima-



schutzaspekten als „No-Regret-Maßnahme“. Synthetische Kraftstoffe sind dabei aus Sicht der meisten Autoren stets als Ergänzung zu anderen Technologien, wie der Elektromobilität, zu sehen und sollen aufgrund von Energieumwandlungsverlusten insbesondere dort Anwendung finden, wo es keine direktelektrischen Alternativen gibt (z.B. Kramer et al. 2019, Gerbert et al. 2018, Klein et al. 2017 Zimmer et al. 2016, Gerhardt et al. 2015). Im Straßenverkehr werden Kraftstoffe nach heutigem Stand in schweren Nutzfahrzeugen noch langfristig benötigt; ebenso werden im Personenverkehr Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren auch bei sehr ambitionierter Elektrifizierung noch bis 2050 existieren (Gerbert et al. 2018). Mit Blick auf den Markthochlauf synthetischer Kraftstoffe sehen Kasten et al. (2019) den Schwerpunkt in den Jahren 2030 bis 2050 und im Jahr 2030 einen Anteil von 10% von PtX-Kraftstoffen bezogen auf den jeweiligen PtX-Endenergiebedarf im Jahr 2050. Ausfelder et al. (2017) beschreiben verschiedene Konzepte zum Einsatz von strombasierten Kraftstoffen im Verkehrssektor ohne dabei eine Abschätzung zu deren Stellenwert zu geben.

Tabelle 4: Rolle der Kraftstoffe in den Studien

Quelle	Biogene Kraftstoffe	Strombasierte Kraftstoffe
Ausfelder et al. 2017	Keine Abschätzung zum Stellenwert von biogenen und strombasierten Kraftstoffen; allgemein Beschreibung von Konzepten zum Einsatz dieser im Verkehrssektor	
Bergk et al. 2016	Aufgrund des ambitionierten THG-Minderungsziels und der aktuellen Diskussion über die Treibhausgasbewertung von Biokraftstoffen verwendet THGND keine Biokraftstoffe im Hauptszenario	Kernelement eines treibhausgasneutralen Verkehrs ist dabei eine konsequente Energiewende im Verkehr, die den Einsatz von aus erneuerbarem Strom hergestellten Kraftstoffen einschließt
Bergk et al. 2018	Die THG-Minderung durch den Einsatz von Biokraftstoffen aus Nahrungs-/Futterpflanzen und Altpflanzenöl/Tierfett wird gegenüber heute vermutlich nicht weiter steigen	Kernelement eines treibhausgasneutralen Verkehrs ist konsequente Energiewende im Verkehr, die Einsatz von aus erneuerbarem Strom hergestellten Kraftstoffen einschließt
Bründlinger et al. 2018	Wichtige Rolle, Kraftstoffe verlieren jedoch im Vergleich zu anderen erneuerbaren Kraftstoffen sukzessive an Bedeutung	Zur Erreichung des 95-Prozent-Ziels wichtig, ehrgeizige internationale Klimaschutzbemühungen notwendig
Erhard et al. 2014	Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse bleiben im Verbändekonzept aufgrund der bisher bestehenden Zweifel an ihrer Nachhaltigkeit sowie der effektiv erzielbaren Treibhausgasemissionsreduktion als Lösungsoption unberücksichtigt	Auch mit ambitionierten Maßnahmen zur Verlagerung, Vermeidung und Effizienzsteigerung verbleibt im Jahr 2050 ein „Restbedarf“ an flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen; Einsatz nachhaltiger Kraftstoffalternativen keinesfalls als Alternative zu o.g. Maßnahmen, sondern als Ergänzung
Gerbert et al. 2018	Erhöhung des Volumens an Biokraftstoffen im Verkehr volkswirtschaftlich nicht effizient	Langfristig zur weitergehenden Emissionsreduktion in allen Verkehren zwingend erforderlich; aber hohe Umwandlungsverluste im Vergleich zum direkten Stromantrieb
Gerhardt et al. 2015	Können nur zu einem geringen Anteil den Kraftstoffbedarf decken	Zur Erreichung der Klimaziele müssen auch strombasierte chemische Energieträger im Verkehr eingesetzt werden
Hobohm et al. 2018	Inländisches Biomassepotenzial ist begrenzt	Da flüssige Energieträger weiter benötigt werden, ist Entwicklung Power-to-Liquid unter Klimaschutzaspekten No-Regret-Maßnahme
Kasten et al. 2016	Nachhaltig, aus Restholz oder Stroh produzierte Biokraftstoffe der 2.Generation werden zukünftig zwar energiebezogene THG-Minderungen zwischen 80 und 90 % ermöglichen; vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs mit diesen Kraftstoffen nicht machbar	Bei der Verwendung von THG-freien Flüssigkraftstoffen (z. B. PtL-Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom) besteht im Verkehrssektor der geringste Transformationsbedarf, da alleine die Energiebereitstellung umgestellt werden müsste



Klein et al. 2017	Nicht betrachtet	Die Bereitstellung von Kraftstoffen mittels Power-to-Liquid ist mit sehr hohen Investitionskosten verbunden und sollte daher nur eingesetzt werden, wenn keine Alternative besteht
Kramer et al. 2019	Nutzung von Rest- und Abfallstoffen als Input für die Synthesen von E-Kraftstoffen	Synthetische Kraftstoffe (E-Kraftstoffe) und Elektromobilität ergänzen sich gegenseitig. E-Kraftstoffe können als notwendige und sinnvolle Unterstützung einer Elektromobilitätsstrategie dienen
Pfluger et al. 2017	Nutzungskonkurrenz bei knappen Ressourcen wie Biomasse; alternativen Optionen in konkurrierenden Sektoren vorhanden	In kostenoptimierten Zielszenarien der Studie werden Benzin- und Diesel-PKW zunächst durch Hybrid- und später durch batterieelektrische Fahrzeuge ersetzt
Repenning et al. 2015	KS 80: ab 2030 Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe auf Basis von Abfall- und Reststoffen; KS 95: aufgrund geringer Nachfrage der übrigen Sektoren und eines insgesamt reduzierten Energiebedarfs steigt der Biokraftstoffanteil im Straßenverkehr nach 2030 auf 40 %	Im KS 80 sind stromgenerierte Kraftstoffe zur Zielerreichung nicht notwendig und kommen nicht zum Einsatz; der Einsatz stromgenerierter Kraftstoffe wird im KS 95 relevant
Schnülle et al. 2016	Biokraftstoffe bieten aufgrund von Flächennutzungskonflikten nur begrenzte Perspektiven	Ohne Integration von synthetischen, strombasierten Kraftstoffen (wie regenerativ erzeugtem Wasserstoff, Methan und Flüssigkraftstoff) kann eine vollständige Transformation voraussichtlich nicht gelingen
Siegemund et al. 2017	In Bezug auf erneuerbare Kraftstoffe sind fortschrittliche Biokraftstoffe und synthetische erneuerbare Kraftstoffe zu stärken, während Biokraftstoffe auf Lebensmittelbasis auslaufen sollten	
Zimmer et al. 2016	Beitrag der Biokraftstoffe ist aufgrund der abschließlichen Nutzung von Abfall- und Reststoffen in den Renewbility-Szenarien auf maximal rund 90 PJ beschränkt, im Jahr 2030 sind das nur rund 5 %	Bei den strombasierten Kraftstoffen wird langfristig eine Verwendung nur dort für sinnvoll erachtet, wo es keine anderen Optionen gibt

Quelle: eigene Darstellung

Mit Blick auf die betrachteten **Einsatzgebiete** von synthetischen Kraftstoffen sind sich die Autor\*innen der Studien einig, dass strombasierte Kraftstoffe insbesondere für jene Bereiche, die nicht (wirtschaftlich) direkt elektrisch versorgt werden können – also der Flug- und Schiffsverkehr auf längeren Strecken – zukünftig von besonderer Relevanz sind (z.B. Kramer et al. 2019, Bründlinger et al. 2018, Ausfelder et al. 2017, Kasten et al. 2016, Erhardt et al. 2014). Bründlinger et al. (2018) betonen darüber hinaus, dass das Erreichen des Klimaziels im Schwerlastverkehr ohne den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen nicht möglich sein wird. Andere Autoren (bspw. Kramer et al. 2019, Bergk et al. 2016) sehen alle Verkehrsträger, die heute mit fossilen Kraftstoffen bzw. fossil erzeugten Energieträgern betrieben werden als relevant für den zukünftigen Einsatz synthetischer Kraftstoffe an; hierzu gehören folglich ebenfalls Pkw-Langstreckenfahrzeuge sowie Nutzfahrzeuge als auch Pkw-Fahrzeuge im Bestand. In den Modellierungen von Klein et al. (2017) wird aller Voraussicht nach dem Einsatz von reFuels in sicherheitssensiblen Sektoren (Gesundheitswesen, Hilfswerke, Sicherheitsdienste und Militär) weiter eine relevante Bedeutung beigemessen. Eine zusammenfassende Darstellung aufgeschlüsselt nach Verkehrsträgern ist in Tabelle 5 dargestellt.

Mit Blick auf die **Mengenpotenziale** für den Einsatz von reFuels im Jahr 2050 sehen Bründlinger et al. (2018) national einen Einsatz zwischen 130 und 164 TWh pro Jahr an synthetischen Brennstoffen, die unter optimierter Nutzung von Einspeisespitzen erneuerbarer Energien erzeugt werden. In der Studie von Gerbert et al. (2018) beschränkt sich die inländische Erzeugung im 95 %-Klimapfad auf 23 TWh Wasserstoff sowie 1,4 TWh in Power-to-Liquid-Demonstrationsanlagen. Die Autor\*innen erwarten aus heutiger Perspektive, dass synthetische Brennstoffe aus Ländern mit besseren (Kosten-)Bedingungen für die Gewinnung erneuerbarer Energien importiert werden müssen. Im 95 %-Klimapfad wird daher der Import von 340 TWh Power-to-Liquid und Power-to-Gas angenommen, wovon 244 TWh auf den Verkehrssektor entfallen (sowie 90 TWh für den Sektor

Energie und Umwandlung und 6 TWh für die Versorgung der verbliebenen Öl- und Gaskessel im Sektor Haushalte und GHD). Aus Sicht von Bergk et al. (2018) würde ein entsprechender Hochlaufpfad strombasierter Kraftstoffe – bei einem Aufbau von Produktionskapazitäten in der MENA-Region – bei einem maximalen Beimischungsanteil von 7 Prozent bundesweit ca. 115 PJ (*Anmerkung der Verf.:* umgerechnet ca. 32 TWh) im Jahr 2030 erlauben.

Tabelle 5: Betrachtete Einsatzgebiete von synthetischen Kraftstoffen

	Ausfelder et al. 2017	Bründlinger et al. 2018	Gerbert et al. 2018	Gerhardt et al. 2015	Pflugger et al. 2017	Repenning et al. 2015	Erhard et al. 2014	Hobohm et al. 2018	Kramer et al. 2019	Zimmer et al. 2016	Bergk et al. 2016	Kasten et al. 2016	Klein et al. 2017	Siegemund et al. 2017	Schnülle et al. 2016
Pkw	X	X	X			X			X	X	X	X		X	X
Lkw		X		X		X	X		X	X	X	X	X	X	X
Schiff	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X			X	X
Flugzeug	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X

X = wird in Studie als notwendig betrachtet

Quelle: eigene Darstellung

In der Gesamtschau der Studien lassen sich mit Blick auf die Relevanz der Kraftstofftypen, deren Einsatzgebiete und Mengenpotenziale die folgenden übergreifenden Aspekte schlussfolgern:

- Für Biokraftstoffe sieht die Mehrheit der Studien nur ein begrenztes Mengenpotenzial zur Deckung des Kraftstoffbedarfs im Rahmen der Defossilisierung des Verkehrssektors. Dies wird vor allem sowohl mit Nachhaltigkeitsaspekten, wie bspw. Flächennutzungskonkurrenzen oder dem Verlust von Biodiversität begründet. Zudem bestehen alternative Optionen für den Biomasseeinsatz in konkurrierenden Sektoren.
- Mit Blick auf strombasierte Kraftstoffe sind sich die Studien weitgehend einig, dass insbesondere für die Erreichung einer 95%igen Treibhausgasreduktion gegenüber 1990 der Einsatz dieser Kraftstoffe von Relevanz ist.
- Hinsichtlich der betrachteten Einsatzgebiete von synthetischen Kraftstoffen sind sich die Autor\*innen der Studien einig, dass strombasierte Kraftstoffe insbesondere für jene Bereiche, die nicht (wirtschaftlich) direktelektrisch versorgt werden können – also der Flug- und Schiffsverkehr auf längeren Strecken – zukünftig von besonderer Relevanz sind. Darüber hinaus sieht eine Mehrheit der Studien auch einen Einsatz im Güter- bzw. Schwerlastverkehr als auch (für Langstreckenfahrten) im Pkw-Bereich.
- Die zukünftigen Mengenpotenzialen für den Einsatz synthetischer Kraftstoffe unterscheiden sich je nach Studie und deren getroffenen Annahmen (Zeitpunkt, Herstellungsort, Technologie, Energieverfügbarkeit, etc.) erheblich.



### 3.4 Potenziale und Grenzen von reFuels

Der nachfolgende Abschnitt diskutiert anhand des Studiensamples Potenziale und Grenzen der Produktion und des Einsatzes von reFuels. Dabei werden unter die Abschätzung von Potenzialen und Grenzen unterschiedliche Aspekte thematisiert, die nachfolgend aufgeführt sind:

- Technologieoffenheit vs. Technologieselektion
- Ort der Energieerzeugung sowie Relevanz des Imports
- Einschätzungen zur Wirtschaftlichkeit
- Rolle von reFuels für die Standortsicherung in Deutschland
- Stellenwert von reFuels für die Speicherung und Flexibilität (Systemdienlichkeit)
- Einschätzungen zur Akzeptanz von reFuels
- Einschätzungen zur Nachhaltigkeit von reFuels

Im Kontext der Fragestellung **Technologieoffenheit vs. Technologieselektion** nimmt die Mehrheit der Studien technologieoffene Szenarien an (vgl. Tabelle 6). Bründlinger et al. (2018, S. 30) kommen sogar zu dem Ergebnis, dass „[...] die technologieoffenen Szenarien auch bei Annahme deutlich geringerer Kostensenkungen für die darin erforderlichen Technologien vorteilhafter als Szenarien mit hohem Anteil an strombasierten Endenergieanwendungen und den dafür notwendigen Anpassungen und Investitionen in den Verbrauchssektoren [sind].“ Während die Mehrzahl der Studien im Jahr 2050 im Bereich der Luft- und Schifffahrt vorrangig auf synthetische Kraftstoffe fokussiert, werden insbesondere im Pkw- und Lkw-Bereich verschiedene, alternative Technologien angenommen, die sich gegenseitig ergänzen. Kramer et al. (2019, S. 8) sehen reFuels bspw. als „[...] notwendige und sinnvolle Unterstützung einer Elektromobilitätsstrategie“. Agora Verkehrswende (2020, S. 139) konstatiert in ihrer Studie Folgendes: „In der Praxis ist die Technologiewahl im motorisierten Straßenverkehr typischerweise aufgrund diverser Marktunvollkommenheiten, politischer Fehlsteuerung und Pfadabhängigkeiten verzerrt. Hier ist technologie neutrale Regulierung jedoch gerade nicht in der Lage, Technologieoffenheit herzustellen. Um die vorgefundenen Verzerrungen effizient zu beheben, müssen vielmehr spezifische Eingriffe vorgenommen werden. Mithin besteht eine ökonomische Indikation für technologiespezifische Regulierung, wenn und soweit sich das vorgefundene Entscheidungsfeld (noch) nicht technologieoffen präsentiert.“

Tabelle 6: Technologieoffenheit vs. Technologieselektion

Ausfelder et al. 2017	Bründlinger et al. 2018	Gerber et al. 2018	Pflüger et al. 2017	Repenning et al. 2015	Erhard et al. 2014	Hobohn et al. 2018	Kramer et al. 2019	Zimmer et al. 2016	Bergk et al. 2018	Kasten et al. 2016	Klein et al. 2017	Stegemund et al. 2017	Schnulle et al. 2016
O	O	O	S	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
O = Technologieoffenheit; S = Technologieselektion													

Quelle: eigene Darstellung

Die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe zieht einen erheblichen Strom- und Flächenbedarf mit Blick auf den Ausbau von PV- und Windenergieanlagen nach sich. Hinsichtlich des **Ortes der Energieerzeugung sowie zur**





**Relevanz des Imports** sind sich die Studien weitgehend einig, dass die Produktion von reFuels im Wesentlichen im (außereuropäischen) Ausland realisiert werden wird, da dort die Produktionskosten deutlich kostengünstiger sind und größere Flächenpotenziale bestehen (z.B. Hobohm et al. 2018, Gerbert et al. 2018, Bründlinger et al. 2018, Bergk et al. 2016). Zimmer et al. (2016) gehen in ihren Szenarien sogar von einer 100-prozentigen Auslandsproduktion strombasierter Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien aus. Hobohm et al. (2018) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass erhebliche Investitionen im Ausland notwendig sind, um die dafür notwendigen Produktionskapazitäten aufzubauen. Bründlinger et al. (2018) sehen vor allem einen Import der Kraftstoffe aus Regionen Nordafrikas; Kramer et al. (2019) sehen einen Schwerpunkt der Produktion in der MENA-Region beziehungsweise im Mittelmeerraum. Bründlinger et al. (2018) kommen zu dem Schluss, dass, wenn die Importmöglichkeiten aus dem außereuropäischen Ausland nicht im angenommenen Maße verfügbar sind, die benötigten reFuels auch aus dem europäischen Ausland bezogen werden könnten. Kasten et al. (2016) berücksichtigen im Kontext der Produktionsstandorte Großbritannien (Wind-Onshore und Wind Offshore), die Türkei (Photovoltaik) und Ägypten (Solarthermische Kraftwerke/CSP). Repenning et al. (2015) hingegen führen Gründe auf, die für als auch gegen eine Produktion im Ausland sprechen. Für eine Produktion im Ausland spricht aus Sicht der Autor\*innen eine begrenzte Verfügbarkeit von EE-Standorten zur Produktion der Elektrizität in Deutschland sowie die Tatsache, dass es im Ausland deutlich günstigere Standorte gibt, die eine effizientere und kostengünstigere Produktion der Kraftstoffe ermöglichen. Für eine Produktion in Deutschland sehen die Autor\*innen auf der anderen Seite u.a. die Ressource „Wasser“ als zentral, die im Rahmen der Elektrolyse neben CO<sub>2</sub> für die Produktion strombasierter Kraftstoffe benötigt wird. Dies kann aus Sicht der Autor\*innen besonders an Solarstandorten eine Restriktion darstellen. Daneben bestünde bei einer inländischen Erzeugung durch die Flexibilität in der Produktion die Möglichkeit das EE-Dargebot umfassend zu nutzen. Bergk et al. (2016) verweisen in ihrer Studie zusätzlich auf die Notwendigkeit von hohen Nachhaltigkeitsstandards, die bei einer Produktion im Ausland einen internationalen Ordnungsrahmen garantiert, so dass die importierten Kraftstoffe zu 100 % EE-basiert, ökologisch nachhaltig und sozial verträglich produziert worden sind.

Mit Blick auf die **Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit** sieht die Mehrheit der Studien eine kostengünstigere Erzeugung von reFuels im Ausland, vorwiegend in der MENA-Region sowie im Mittelmeerraum, verglichen mit Deutschland (z.B. Kramer et al. 2019, Schnülle et al. 2016). Aus der Sicht von Schnülle et al. (2016) können reFuels aufgrund von höheren Gestehungskosten, hohen Umwandlungsverlusten, hohen Investitionskosten und ungünstigen rechtlichen Rahmenbedingungen derzeit nicht mit fossilen Treibstoffen konkurrieren. Nach Ansicht der Autor\*innen ergeben sich Geschäftsmodelle derzeit nur in kleinen Nischenmärkten, in denen entweder eine deutlich erhöhte Zahlungsbereitschaft für Stromkraftstoffe gegeben ist oder die Betriebskosten durch die vergebenen Fördergelder gedeckt werden können. Des Weiteren verweist die Studie darauf, dass ein Anstieg der Preise für fossile Energieträger in Anlehnung an die Prognosen der Internationalen Energieagentur im „Current Policy Scenario“ von durchschnittlich etwa zwei Prozent pro Jahr sowie deutliche Preissteigerungen von jährlich vier Prozent langfristig nicht ausreichen, um reFuels aus betriebswirtschaftlicher Sicht konkurrenzfähig zu machen. Auch Gerbert et al. (2018, S. 190) betonen das Argument der Systemeffizienz und verweisen darauf, dass „ein effizienter Verbrennungsmotor mit synthetischem Kraftstoff in 2050 immer noch etwa drei- bis viermal so viel Strom pro Personenkilometer benötig[t] wie ein Batteriefahrzeug. Aus diesem Grund sind synthetische Brennstoffe aus heutiger Perspektive sogar bei Importen aus Ländern mit deutlich niedrigeren Erzeugungskosten für erneuerbare Energien vergleichsweise teuer.“ Zimmer et al. (2016) gehen davon aus, dass die Herstellungskosten bis zum Jahr 2050 durch Skaleneffekte erheblich sinken, dass allerdings die Kosten zur Erzeugung von reFuels selbst bei optimistischen Annahmen im Jahr 2050 vermutlich noch rund 50 % über denen fossiler Kraftstoffe liegen. Gerbert et al. (2018) konstatieren, dass sehr verschiedene Annahmen bspw. bei Herstellungsort, Technologie, Berücksichtigung des Transports, etc. über zukünftig mögliche Kosten am Ende der Lernkurve in zahlreichen Studien getroffen werden. Sie gehen in ihren Annah-



men von Importkosten in Höhe von 150 Euro pro MWh aus. Andere Studien nehmen bei einer CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft Importkosten von 110 bis 120 Euro pro MWh an (Gerbert et al. 2018). Bergk et al. (2018) sehen Gestehungskosten in Höhe von etwa 1,00 bis 1,90 Euro pro Liter Dieseläquivalent bei einer Erzeugung in der MENA-Region vor, inkl. Transport nach Deutschland. Mit einem innerdeutschen Transport, der Verarbeitung, Marge und Energiesteuern ergeben sich laut den Autor\*innen Verbraucherpreise von ca. 2,00 bis 3,00 Euro pro Liter. Bei einem Beimischungsanteil von 7 % und einer Bandbreite des Dieselpreises von 1,10 bis 1,50 Euro pro Liter würde dies laut der Studie zu einem maximalen Preisanstieg von 13 ct pro Liter führen. Wendet man den Blick auf einen zukünftigen Markthochlauf von reFuels, so verweisen Bründlinger et al. (2018) darauf, dass dieser aufgrund der zu erwartenden Kostendegression bei den verwendeten Technologien nicht linear, sondern wie bei anderen technologischen Innovationen exponentiell ansteigend erfolgen sollte.

Mit Blick auf die **Standortsicherung** in Deutschland resümieren Bründlinger et al. (2018, S. 30), dass „selbst bei starkem Einsatz die Importmengen synthetischer Energieträger in 2050 insgesamt deutlich geringer [sind] als die heutigen Importmengen an fossilen Brennstoffen. Eine vollständige Energieautarkie in Deutschland oder Europa sollte aber aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit nicht angestrebt werden.“

ReFuels können erneuerbaren Strom unter Nutzung der entsprechenden Infrastrukturen saisonal **speichern**, sodass erneuerbare Energien im internationalen Handel weiträumig verfügbar werden (Bründlinger et al. 2018).

Die Kosten und (Kunden)**Akzeptanz** sind für den Erfolg und den ökologischen Hebel aller Energieträger und Antriebsformen entscheidend (Kramer et al. 2019). Einige der Studien betonen, dass mögliche Akzeptanzprobleme frühzeitig erkannt und berücksichtigt werden sollten (z.B. Ausfelder et al. 2017). Ausfelder et al. (2017) betonen bspw., dass aus Sicht der Nutzer\*innen sich keine spürbaren Veränderungen ergeben. Ausfelder et al. (2017) verweisen in ihrer Studie zudem auf die negative Diskussion im Kontext der Einführung des Bio-Treibstoffs, aus der entsprechende Lehren für die Zukunft gezogen werden können. Schnülle et al. (2016) weisen darauf hin, dass es ähnlich wie im Strommarkt bei gegebener Akzeptanz Kund\*innen geben wird, die für einen regenerativen Kraftstoff bereit sind eine Prämie zu zahlen. Biokraftstoffe hingegen weisen aus Sicht der Autor\*innen eine geringere Akzeptanz bei den Endnutzer\*innen auf (Beispiel E10-Kraftstoff). Bergk et al. (2018) sehen eine mögliche Steigerung der Akzeptanz mittels einer Verringerung der Auswirkungen auf die Nutzerkosten z.B. durch Senkung der Energiesteuer. Andere Autoren verweisen darauf, dass ihre Szenarien unabhängig von „Akzeptanzhürden“ (Hobohm et al. 2014) beschrieben sind. Insgesamt lässt sich festhalten, dass alle Akzeptanzbasierten Aussagen nicht auf empirischen Akzeptanzuntersuchungen basieren.

Die Autor\*innen der Studien sind sich einig, dass ein treibhausgasneutraler Verkehr im Jahr 2050 vollständig aus erneuerbarem Strom versorgt werden soll (z.B. Kasten et al. 2016; aus Sicht der Autor\*innen gilt diese Annahme auch für die Einführungsphase von reFuels bis 2050). Hobohm et al. (2018) schlagen einen Herkunftsnachweis des benötigten Stroms für die Elektrolyse oder auch der Wasser- und Kohlenstoffquelle als **Nachhaltigkeitsstandard** vor. Aus Sicht der Autor\*innen kann mittels verbindlicher, international vereinbarter Standards die Nachhaltigkeit von synthetisch erzeugten Kraftstoffen transparent nachgewiesen werden. Bergk et al. (2016) betonen außerdem, dass im Kontext von Überlegungen zur Nachhaltigkeit auch indirekte Effekte zu beachten sind. So ist aus Sicht der Autor\*innen bei Strom oder strombasierten Kraftstoffen sicherzustellen, dass für die Verkehrsanwendungen zusätzlicher EE-Strom genutzt wird. Das heißt, dass insbesondere neue Verbraucher wie bspw. E-Autos im Verkehrsbereich nicht dazu führen sollten, dass konventionelle Kraftwerke im Stromsektor länger laufen. Zudem sollten bei der Herstellung von Biokraftstoffen insbesondere Mehremissionen durch Landnutzungsänderungen vermieden werden. Aus der Sicht von Erhard et al. (2014, S. 8) sind im Kontext der Nachhaltigkeit i. w. S. Effizienzanstrengungen besonders relevant: „Die Unsicherheit, die mit der Mengenverfügbarkeit von nachhaltigen Kraftstoffalternativen verbunden ist, macht umso deutlicher, dass die

drastische Reduktion des Endenergiebedarfs den unabdingbaren Kern einer erfolgreichen Klimaschutzstrategie für den deutschen Verkehrssektor darstellt.“ Auch Kamer et al. (2019, S. 8) verweisen auf einen hohen Energiebedarf zur Produktion von reFuels: „Werden Verbrennungsmotoren mit synthetischen Kraftstoffen (PtX) betrieben, ist der Primärenergiebedarf im Bestfall (Methan) etwa 2,7- bis 3,1-mal so groß wie der Energiebedarf für ein reines BEV-Szenario (entspricht 35.000 bis 40.000 5-MW-Offshore-Windrädern); im schlechtesten Fall (OME) kann er bis zu 4,7-mal größer sein (entspricht bis zu 60.000 5-MW-Offshore-Windrädern).“

In der Gesamtschau der Studien lassen sich mit Blick auf Potenziale und Grenzen der Produktion und des Einsatzes von reFuels die folgenden übergreifenden Aspekte herausdestillieren:

- Die Mehrheit der Studien nimmt für die analysierten Transformationspfade eine Technologieoffenheit bzw. -neutralität an.
- Hinsichtlich des Ortes der Energieerzeugung sowie zur Relevanz des Imports sind sich die Studien weitgehend einig, dass die Produktion von reFuels im Wesentlichen im (außereuropäischen) Ausland realisiert werden wird, da dort die Produktionskosten kostengünstiger sein können und größere Flächenpotenziale bestehen.
- Eine Mehrheit der Studien sieht verglichen mit Deutschland zukünftig die Möglichkeit für eine kostengünstigere Erzeugung von reFuels im Ausland, vorwiegend in der MENA-Region sowie im Mittelmeerraum.
- ReFuels bieten den Vorteil, erneuerbaren Strom unter Nutzung der entsprechenden Infrastrukturen saisonal zu speichern, sodass erneuerbare Energien im internationalen Handel weiträumig verfügbar werden.
- Das Thema der (Kunden)Akzeptanz wird von einigen Autor\*innen als wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Diffusion synthetischer Kraftstoffe hervorgehoben. Ein Lernen aus vergangenen Fallbeispielen, wie bspw. die Einführung von Biokraftstoff-Beimischungen bei E10 kann hier Ansatzpunkte bieten – eine Herstellergarantie für die Motorenverträglichkeit von reFuels ist hier essentiell.
- Angesichts eines hohen Energiebedarfs zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe sollen verbindliche, international vereinbarte Standards die Nachhaltigkeit von synthetisch erzeugten Kraftstoffen sicherstellen.

### 3.5 Politische Rahmenbedingungen

Eine umfassende Transformation des Verkehrssystems in Richtung Klimaschutz und Nachhaltigkeit kann nur gelingen, wenn zielorientierte politische Handlungsoptionen und aufeinander abgestimmte Maßnahmenpakete die avisierten Transformationspfade auslösen und weiterführen. Denn einzelne Transformationspfade in Richtung Klimaschutz, wie bspw. ein verstärkter Einsatz von regenerativen Kraftstoffen, müssen durch politische Entscheidungen und Interventionen „initiiert“ werden und idealerweise mit sozialen, politischen, ökonomischen und institutionellen Veränderungen in die gleiche Richtung weisen. Gleichzeitig ist bedingt durch die Komplexität der Verkehrswende ein erhebliches Maß an Koordination und politischer Steuerung erforderlich, damit politische Handlungsoptionen zielgerichtet effektiv, wirkungsvoll und bestmöglich implementierbar sind. Staatliches Handeln ist in diesem Zusammenhang unverzichtbar, denn kein anderer Akteur hat vergleichbare Möglichkeiten und Ressourcen, um zielorientierte Veränderungen und den Erfolg der Verkehrswende voranzubringen.

Ähnlich wie bei der Markteinführung erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung in den 90er Jahren, benötigt die Einführung von reFuels geeignete Rahmenbedingungen. Wurden in der Vergangenheit die Sektoren Strom, Wärme und Mobilität in der Instrumentierung weitgehend separat betrachtet, so ist in Zukunft für die Etablierung von Technologien im Bereich der Sektorkopplung eine integrierte Betrachtung notwendig. So sollten aus Sicht der meisten Autoren, die Rahmenbedingungen der verschiedenen Sektoren und ein sogenanntes *Level Playing Field* mit Blick auf Marktdesign, Tarifgestaltung, Förderung und Steuern geschaffen werden, auf

dem alle Energieträger und Technologien miteinander konkurrieren können (z. B. Ausfelder et al. 2017). Die Autor\*innen (Ausfelder et al. 2017, S. 127) betonen darüber hinaus, dass es für „[...] einen echten Wettbewerb zwischen erneuerbaren und fossilen Energieträgern [...], entscheidend [ist], dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen und andere Umweltkosten eingepreist werden.“

Die verschiedenen in den Studien vorgeschlagenen Instrumentierungsvorschläge können übergreifend in sogenannte „Pull- und Push-Maßnahmen“ unterschieden werden (vgl. Tabelle 7). „**Push-Maßnahmen**“ fokussieren auf eine Abkehr von fossilen Antriebssträngen, wie bspw. die Einführung von Strafzahlungen bei Nichteinhalten der Mindestquoten zum Inverkehrbringen von THG-neutralen Kraftstoffen. „**Pull-Maßnahmen**“ hingegen adressieren die (wünschenswerte) Innovation reFuels direkt und setzen Anreize für deren Produktion und Verwendung (Bergk et al. 2016, Schnülle et al. 2016). Nicht alle betrachteten Studien erläutern explizit reFuels fördernde Instrumente im Detail. So reicht der Differenzierungsgrad von sehr konkreten Instrumentenvorschlägen bis hin zu übergreifenden Zielen, Strategien und Konzepten, deren Ausgestaltung noch zu erarbeiten ist (bspw. eine politisch vorangetriebene Markthochlaufstrategie für regenerative Kraftstoffe oder eine konkrete Förderung von Pilot- und Demonstrationsvorhaben) (z.B. Kramer et al. 2019, Bergk et al. 2018, Schnülle et al. 2016). Als übergreifendes und zentrales Instrument verweisen alle Quellen, die sich mit Fragen zu politischen Rahmenbedingungen beschäftigen, auf ein einheitliches und transparentes Preissignal über den europäischen Emissionshandel (EU ETS). Insbesondere Erhardt et al. (2014) und Bergk et al. (2018) betonen, dass zusätzlich zu politischen Maßnahmen, die auf den Bereich des „Verbesserns“ abzielen, Maßnahmen zur „Vermeidung“ und „Verlagerung“ von besonderer Relevanz sind.

Tabelle 7: Push- und Pull-Maßnahmen für synthetische Kraftstoffe

	Instrument	Quelle
<i>Push-Maßnahmen</i>	Erhöhung der Energiesteuern für konventionellen Diesel	Bergk et al. 2018
	Strafzahlungen bei Zielverfehlung von Mindestquoten zum Inverkehrbringen von THG-neutralen Kraftstoffen	Bergk et al. 2018
	Beibehalten der THG-Minderungsquote (anstelle der RED II-Beimischquoten)	Bergk et al. 2018
	EE-Ausbaukorridore	Schnülle et al. 2016
	CO <sub>2</sub> -abhängige Kfz-Besteuerung	Zimmer et al. 2016
	Integration von PtL in den Pkw-Flottenzielwert	Bergk et al. 2018
<i>Pull-Maßnahmen</i>	Ermäßigung der Energiesteuer von reFuels-Kraftstoffen	Bergk et al. 2018
	Ausschreibungsmodelle für reFuels Produktionsanlagen	Hobohm et al. 2018
	Senkung der Netzentgelte und Umlagen für erneuerbaren Strom	Ausfelder et al. 2017
	Technologieförderungen/ Forschungsförderung und Förderprogramme, Unterstützung Forschung und Entwicklung und Pilotvorhaben	Bergk et al. 2018, Schnülle et al. 2016
	Markteinführungsprogramm durch einen adäquaten CO <sub>2</sub> -basierten „Innovationsbonus“	Kramer et al. 2019
	Instrumente zur Minderung der Länderrisiken/ „Hermesbürgschaften“	Bergk et al. 2018

Quelle: eigene Darstellung

In der Gesamtschau der Studien lassen sich mit Blick auf die politischen Rahmenbedingungen die folgenden übergreifenden Aspekte zusammenfassen:

- Eine umfassende Transformation des Verkehrssystems in Richtung Klimaschutz und Nachhaltigkeit kann nur gelingen, wenn zielorientierte politische Handlungsoptionen und aufeinander abgestimmte Maßnahmenpakete die intendierten Transformationspfade auslösen und weiterführen.



- Für einen Markthochlauf von reFuels bedarf es klarer politischer Rahmenbedingungen sowie ggf. eine Roadmap für die Produktion und den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen in Deutschland (sowie mit Blick auf deren Herstellung darüber hinaus).
- Mit Blick auf die Umsetzung der Maßnahmen sollte ein sogenanntes *Level Playing Field* für Marktde-sign, Tarifgestaltung, Förderung und Steuern geschaffen werden, auf dem alle Energieträger und Tech-nologien miteinander konkurrieren können.

## 4 Fazit

Die Analyse der Rolle von erneuerbaren Kraftstoffen (biogen und strombasiert) stand im Mittelpunkt der hier vorgelegten Dokumenten-basierten Analyse. reFuels-Kraftstoffe wurden dabei aus einer systemanalytischen Perspektive in ihrer Rolle in aktuellen Energiesystemmodellierungen untersucht. Die vergleichende Betrachtung über insgesamt sechzehn Modellierungsstudien erfolgte über unterschiedliche Inhaltsdimensionen. Zunächst wurden die in den Studien ausgewiesenen Transformationspfade charakterisiert. Die den Szenarien unterlegten Pfade wurden über die Anzahl der Szenarienbündel, Zeit-, Ziel- und Raumorientierung sowie inhaltliches Szenariodesign und Ergebnisdimensionen differenziert. Des Weiteren wurden die Pfade im Rahmen der Verkehrswende Strategietrias *Vermeiden–Verlagern–Verbessern* betrachtet. reFuels-Kraftstoffe adressieren den Bereich des Verbesserns als zentralen Baustein einer Klimaschutzstrategie. Die Relevanz von Kraftstoff-typen sowie avisierte Einsatzgebiete und Mengenpotenziale waren ein weiterer Untersuchungsfokus. Potenzi-ale und Grenzen der Produktion und des Einsatzes von reFuels wurden schließlich über verschiedene sozio-technische Aspekte analysiert. Darunter wurden innovationstechnische Variablen wie Technologieoffenheit, betriebs- und volkswirtschaftliche Aspekte wie internationale Arbeitsteilung, die Abschätzung der Kostenstruk-tur sowie nationale Wettbewerbsfähigkeit und Standortsicherung, Energiesystem bezogene Aspekte wie Sys-temdienlichkeit als auch soziale und ökologische Variablen (Nachhaltigkeitsbewertung, Akzeptanz) betrachtet. Abschließend standen politische Rahmenbedingungen zur Realisierung der avisierten Transformationspfade im Mittelpunkt. Zusammenfassend werden die wichtigsten Ergebnisse zur Rolle von reFuels in Energiesystem-analysen im Folgenden als Ergebnisthesen präzisiert:

*These 1: Das technisch-ökonomische Design der Szenarien erfasst wichtige Strukturmerkmale einer Energie-transformation – berücksichtigt aber ungenügend institutionelle Faktoren und individuelle Entscheidungen.*

Die zur Abschätzung von Transformationspfaden zugrunde gelegten Modelle orientieren sich an Aspekten der technischen Machbarkeit und ökonomischen, gesamtgesellschaftlichen Optimierung. Damit sind notwendige Strukturmerkmale für eine Abschätzung möglicher Energiezukünfte angesprochen. Zugleich sind aber wichtige Aspekte wie politische und soziale Machbarkeit unterbeleuchtet. Fragen der Ausgestaltung politischer Rah-menbedingungen und Interventionen sowie valide Abschätzungen von Verbraucherverhalten bspw. bei Investition und Nutzung von Verkehrsträgern sind bestenfalls über Annahmen hinterlegt. Damit bieten Energiesys-temanalysen zwar notwendige Hinweise auf mögliche Zukünfte, können die Komplexität, Kontingenz und Am-bivalenz solcher Zukünfte aber nicht hinreichend abschätzen.

*These 2: Grundlegende Übereinstimmung von Klimaschutzszenarien mit großer Diversität bei konkreter Szena-rienspezifikation*

Die Grundstruktur der identifizierten Transformationspfade ist in den Studien sehr ähnlich angelegt: Basissze-narien als Trendfortschreibung eines „weiter so“ – minimale (Fokus 2 Grad) und ambitionierte (Fokus 1,5 Grad) Klimaschutzorientierung bei nahezu identischer Raum- und Zeitperspektive. Bei der Schwerpunktsetzung un-terscheiden sich die Szenarien hinsichtlich konkreter Klimaschutzpolitiken, Technologiepriorisierung und Kon-kretisierung von verkehrspolitischen Maßnahmen. Häufig ist in den Studien aufgrund des verwendeten öko-nomischen Gleichgewichtsmodells eine Kostenoptimierung für das Gesamtsystem enthalten. Dabei wird ent-weder technologieoffen oder mit Technologiepräferenzen der kostenoptimalste volkswirtschaftliche Pfad be-



rechnet. Daneben werden auch zukünftige Nachfrageentwicklungen (bspw. Verkehrsleistung, Fahrzeugbestand etc.) abgeleitet und darauf aufbauend Umweltemissionen, Energiebedarf sowie Bedarf an bestimmten Energieträgern ermittelt. Eine singuläre Ergebnisdimension enthält die agentenbasierte Simulation mit der Frage nach Zubaubedarf für PtX-Anlagen (Schnülle et al. 2016).

*These 3: Unterschiedliche Akzentuierung bei Verkehrswendestrategien „vermeiden, verlagern, verbessern“ entscheidet substantiell über die Rolle von reFuels-Kraftstoffen*

Die drei grundlegenden Strategien für eine Verkehrswende mit Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung sind die zentralen Anknüpfungspunkte für den Wandel. Dabei ist klar, dass jeder der Wandlungsmechanismen eine Rolle für die Verkehrswende zu leisten hat. Ihr genaues Mischungsverhältnis aber ist Gegenstand wissenschaftlicher, politischer und gesellschaftlicher Debatten. Darüber kann es auch keine rein objektiv-wissenschaftliche Feststellung geben. Als Zukunftsaussage ist dieses Mischungsverhältnis variabel, da die konkrete Ausgestaltung nicht zuletzt auf normativer Prioritätensetzungen und Güterabwägungen bei bestehenden Zielkonflikten basiert: Wirtschaftsstandort Deutschland, lebenswerte Stadt, Technologieoffenheit bei alternativen Antrieben, Automobilwirtschaft als Wohlstandsfaktor, Minimierung ökologischer Fußabdrücke beim Verkehr, nachhaltige Mobilitätsmuster zugunsten des Umweltverbundes, Einmalereignisse wie die Covid-Pandemie als (Un-)Möglichkeitsfenster für die Verkehrswende. Im Dickicht dieser Zielkonflikte sind unterschiedliche, normativ fundierte Akzentuierungen möglich – und spiegeln sich entsprechend auch in der Szenarienausgestaltung der Energiesystemmodellierungen.

*These 4: Der Einsatz von strombasierten Kraftstoffen ist insbesondere in Szenarien zur Erreichung einer 95%igen Treibhausgasreduktion gegenüber 1990 von Relevanz – allerdings unterscheiden sich die Einsatzgebiete (Flug, Schiff, Lkw und Pkw) in der Bandbreite der Studien*

Für Biokraftstoffe sieht die Mehrheit der Studien nur ein begrenztes Mengenpotenzial zur Deckung des Kraftstoffbedarfs im Rahmen der Defossilisierung des Verkehrssektors. Dies wird vor allem sowohl mit Nachhaltigkeitsaspekten, wie bspw. Flächennutzungskonkurrenzen oder dem Verlust von Biodiversität begründet. Zudem bestehen alternative Optionen für den Biomasseeinsatz in konkurrierenden Sektoren. Um mehr Klarheit über die nationalen Biomassepotenziale zu gewinnen, sollte eine Analyse zur langfristigen Verfügbarkeit und Allokation erfolgen. Mit Blick auf strombasierte Kraftstoffe sind sich die Studien weitgehend einig, dass insbesondere für die Erreichung einer 95%igen Treibhausgasreduktion gegenüber 1990 der Einsatz dieser Kraftstoffe von Relevanz ist, insbesondere für jene Bereiche, die nicht (wirtschaftlich) direktelektrisch versorgt werden können. Die zukünftigen Mengenpotenziale für den Einsatz synthetischer Kraftstoffe unterscheiden sich je nach Studie und deren getroffenen Annahmen (Zeitpunkt, Herstellungsort, Technologie, Energieverfügbarkeit, etc.) deutlich. Es besteht Forschungsbedarf zu Möglichkeiten einer nachhaltigen Produktion und Anwendung strombasierter Kraftstoffe, der sowohl die nationale als auch weltweite Dimension von Erzeugung und Verbrauch berücksichtigt.

*These 5: reFuels Kraftstoffpfade – bestehende Infrastruktur nutzen, internationale Partnerschaften ausbauen und gesellschaftliche Akzeptanz stärken*

Bei der Verwendung von treibhausgasneutralen Flüssigkraftstoffen (z. B. PtL-Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom) besteht im Verkehrssektor der geringste Transformationsbedarf, da die Energiebereitstellung umgestellt und die bestehende Anwendungsinfrastruktur weiter genutzt werden kann. Das Thema der (Kunden)Akzeptanz wird von einigen Autor\*innen als wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Diffusion synthetischer Kraftstoffe hervorgehoben. Ein Lernen aus vergangenen Fallbeispielen, wie bspw. die Einführung von Biokraftstoff-Beimischungen bei E10 kann hier Ansatzpunkte bieten – eine Herstellergarantie für die Motorenverträglichkeit von reFuels ist hier essentiell. Zudem sollten internationale Partnerschaften möglichst frühzeitig initiiert und Wissensaustausch sowie eine Verstärkung politischer Beziehungen im Kontext von reFuels avisiert werden.



*These 6: Eine umfassende Transformation des Verkehrssystems in Richtung Klimaschutz und Nachhaltigkeit kann nur gelingen, wenn zielorientierte politische Handlungsoptionen und aufeinander abgestimmte Maßnahmenpakete die intendierten Transformationspfade auslösen und weiterführen.*

Für einen Markthochlauf von reFuels bedarf es klarer politischer Rahmenbedingungen sowie ggf. eine Roadmap für die Produktion und den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen in Deutschland. Mit Blick auf die Umsetzung der Maßnahmen sollte ein sogenanntes Level Playing Field für Marktdesign, Tarifgestaltung, Förderung und Steuern geschaffen werden, auf dem alle Energieträger und Technologien miteinander konkurrieren können. Damit diese Mengen bis 2050 verfügbar sind und zu möglichst niedrigen Kosten produziert werden können, sollten die ersten großtechnischen Anlagen bereits bis etwa 2025 in Betrieb genommen werden. Dazu sind erhebliche Anstrengungen für die Technologieerprobung und -skalierung, Projektentwicklung und -finanzierung sowie entsprechende politische Sondierungen und Energieforschungsaktivitäten notwendig.

## 5 Literatur

- Agora Verkehrswende (2020): Technologieneutralität im Kontext der Verkehrswende. Kritische Beleuchtung eines Postulats. URL: [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Technologieneutralitaet/33\\_Technologieneutralitaet\\_LANGFASSUNG\\_Version-2.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Technologieneutralitaet/33_Technologieneutralitaet_LANGFASSUNG_Version-2.pdf), zuletzt abgerufen am: 25.09.2020.
- Ausfelder, F.; Drake, F.-D.; Erlach, B.; Fishedick, M.; Henning, H.-M.; Kost, C.; Münch, W.; Pittel, K.; Rehtanz, C.; Sauer, J.; Schätzler, K.; Stephanos, C.; Themann, M.; Umbach, E.; Wage-mann, K.; Wagner, H.-J.; Wagner, U. (2017): Sektorkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. München, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.
- Bergk, F.; Fehrenbach, H.; Lambrecht, U.; Räder, D.; Fuchs, A.-L.; Schmidt, M.; Schwarz, S.; Wolf, P. (2018): Beitrag strombasierter Kraftstoffe zum Erreichen ambitionierter verkehrlicher Klimaschutzziele in Baden-Württemberg. Kurzgutachten. Heidelberg, Stuttgart, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, ZSW - Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung.
- Bergk, F.; Biemann, K.; Heidt, C.; Knörr, W.; Lambrecht, U.; Schmidt, T.; Ickert, L.; Schmied, M.; Schmidt, P.; Weindorf, W. (2016): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 56/2016.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. URL: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf), zuletzt abgerufen am 25.09.2020.
- Bründlinger, T.; König, J. E.; Gründing, D.; Jugel, C.; Kraft, P.; Krieger, O.; Mischinger, S.; Prein, P.; Seidl, H.; Siegemund, S.; Stolte, C.; Teichmann, M.; Willke, J.; Wolke, M.; (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen (dena), Teil B: Gutachterbericht (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH). Berlin, dena, ewi Energy Research & Scenarios gGmbH.
- Erhard, J.; Reh, W.; Treber, M.; Oeliger, D.; Riegler, D.; Müller-Görnert, M. (2014): Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland. Weichenstellungen bis 2050. WWF Deutschland, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND), Germanwatch e.V., Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU), Verkehrsclub Deutschland e.V. (VCD).
- Gerbert, P.; Herhold, P.; Burchardt, J.; Schönberger, S.; Rechenmacher, F.; Kirchner, A.; Kemmler, A.; Wünsch, M. (2018): Klimapfade für Deutschland. München, Berlin, Hamburg, Basel, BCG, Prognos.



- Gerhardt, N.; Sandau, F.; Scholz, A.; Hahn, H.; Schumacher, P.; Sager, C.; Bergk, F.; Kämper, C.; Knörr, W.; Kräck, J.; Lambrecht, U.; Antoni, O.; Hilpert, J.; Merke, K.; Müller, T. (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme, Verkehr. Endbericht. Kassel, Heidelberg, Würzburg: Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Stiftung Umweltenergierecht.
- Hobohm, J.; Auf der Maur, A.; Kemmler, A.; Koziel, S.; Kreidelmeyer, S.; Piégsa, A.; Wendring, P.; Meyer, B.; Apfelbacher, A.; Dotzauer, M.; Zech, K.; (2018): Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende. Basel, Prognos AG, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UM-SICHT, Deutsches Biomasseforschungszentrum DBFZ.
- Kasten, P.; Mottschall, M.; Köppel, W.; Degünther, C.; Schmied, M.; Wüthrich, P. (2016): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Des-sau-Roßlau: Umweltbundesamt. UBA-Texte 72/2016.
- Klein, S.; Klein, S. W.; Steinert, T.; Fricke, A.; Peschel, D. (2017): Erneuerbare Gase - ein System-update der Energiewende. Berlin, enervis energy advisors GmbH.
- Kramer, U.; Ortloff, F.; Stollenwerk, S.; Thee, R. (2019): Defossilisierung des Transportsektors. Optionen und Voraussetzungen in Deutschland. Frankfurt am Main, Ford-Werke GmbH, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut (EBI), Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Gastechologie, innogy SE, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V.
- Pfluger, B.; Tersteegen, B.; Franke, B. (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. Karlsruhe, Aachen, Heidelberg: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Consentec, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung.
- Repenning, J., L. Emele, R. Blanck, H. Böttcher, G. Dehoust, H. Förster, B. Greiner, R. Harthan, K. Henneberg, W. Jörß, C. Loreck, S. Ludig, F.C. Matther, M. Scheffler, K. Schumacher, K. Wiegmann, C. Zell-Ziegler, S. Braungardt, W. Eichhammer, R. Elsland, T. Fleiter, J. Hartwig, J. Kockat, B. Pfluger, W. Schade, B. Schloemann, and F. Sensfuß (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau Und Reaktorsicherheit, Öko-Institut e. V. (Hrsg.), Berlin, Karlsruhe.
- Scheer, D., Nabitz, L. (2019): Klimaverträgliche Energiezukünfte (nicht) wissen: Möglichkeiten und Grenzen von Zukunftswissen für die Energiewende, in: TATuP Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis, Vol 28 No 3 (2019), S. 14-19.
- Schmidt, M.; Fuchs, A.-L.; Kelm, T.; Abdalla, N.; Bergk, F.; Fehrenbach, H.; Jamet, M.; Lambrecht, U.; Mellwig, P.; Pehnt, M.; Vogt, R.; Bürger, V.; Dehoust, G.; Förster, H.; Greiner, B.; Hennenberg, K.; Scheffler, M.; Wiegmann, K., Elsland, R.; Fleiter, T.; Maaß, C.; Sandrock, M.; Nitsch, J. (2017): Energie- und Klimaschutzziele 2030. Stuttgart, Heidelberg, Freiburg, Karlsruhe, Hamburg, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Öko-Institut e.V., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, HIR Hamburg Institut Research.
- Schnülle, C.; von Gleich, A.; Gössling-Reisemann, S.; Kisjes, K.; Nikolic, I.; Stühmann, T.; Thier, P. (2016): Optionen für die Integration von Power-to-Fuel in den Energiewendeprozess aus einer sozioökonomischen Perspektive. Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung, DIW Berlin, 85. Jahrgang, S. 53–74.





- Siegemund, S.; Trommler, M.; Kolb, O.; Zinnecker, V. (2017): «E-FUELS» STUDY. The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU. An expertise by LBST and dena. München, Ottobrunn, Berlin, LBST, dena.
- UBA (2020): Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs, Dessau. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#kraftstoffe-dominieren>. Abgerufen am: 14. August 2020.
- Zimmer, W.; Blanck, R.; Bergmann, T.; Mottschall, M.; von Waldenfels, R.; Förster, H.; Schumacher, K.; Cyganski, R.; Wolfrmann, A.; Winkler, C.; Heinrichs, M.; Dünnebeil, F.; Fehrenbach, H.; Kämper, C.; Biemann, K.; Kräck, J.; Peter, M.; Zandonella, R.; Bertschmann, D. (2016): Renewability III. Berlin, Darmstadt, Freiburg, Heidelberg, Zürich, Öko-Institut, Institut für Verkehrsforschung im DLR, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, INFRAS.



## Annex: Template zur vergleichenden Analyse der Studien

Kurzprofil Studie	
Quelle	
Auftragnehmer	
Auftraggeber	
Regionaler Fokus	
Szenarienbeschreibung und Methodik Studie	
Szenarienanzahl	
Zieljahr	
System	
Raumdimension	
Schwerpunktsetzung Szenarien	
Ergebnisdimensionen	
Zoom 1: „vermeiden“, „verlagern“ und „verbessern“	
Grobe Einordnung zum Verhältnis der 3 Strategien	
„vermeiden“	
„verlagern“	
„verbessern“	
Zoom 2: Alternative Antriebe vs. refuels	
Betrachtete Kraftstofftypen	
Energie- und Antriebsmix	
Verhältnis Kraftstoffe und alternative Antriebe	
Rolle der Kraftstoffe in den Szenarien	
Zoom 3: Fokus Kraftstoffe (Ressourceneinsatz, Verfahren, etc.)	
Energieverbrauch reFuels	
Position Biokraftstoffe	
Position synthetische Kraftstoffe	
Hemmnisse & Grenzen reFuels	
Zusammenfassung Potenzial reFuels	
Zoom 4: Lenkungsinstrumente	
Verkehrspolitische Instrumente zur Förderung der Kraftstoffroute	
Sonstiges // Hinweise // Anmerkungen	