



09.12.2021

Ökobilanzen im Projekt reFuels – Kraftstoffe neu denken

Stellungnahme zur kritischen Prüfung der Ökobilanzstudien

Christian Bauer, Paul Scherrer Institut (PSI)

Modell- und Datendokumentation zur Ökobilanz der Kraftstoffproduktion im Rahmen des Projektes reFuels

Verfasst durch Manuel Andresh, Dr. Andreas Patyk und Dr. Martina Haase

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Modell- und Datendokumentation zur Ökobilanz von PKWs mit verbrennungsmotorischen Antriebssystemen im Rahmen des Projektes reFuels

Verfasst durch Dr. Olaf Toedter und Philipp Weber

Institut für Kolbenmaschinen (IFKM)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kontakt

Dr.-Ing. Olaf Toedter

Email: olaf.toedter@kit.edu

Tel.: 0721-608 43639

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

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Ökobilanzen im Projekt reFuels – Kraftstoffe neu denken

Die Analyse der Einführung und des Hochlaufes von reFuels als Baustein einer CO₂-neutralen Mobilität bedarf einer ganzheitlichen Betrachtung der **Herstellung** und **Nutzung** der reFuels.

Die sachlichste ganzheitliche Betrachtung erfolgt durch eine Ökobilanzierung – auch Umweltbilanzierung genannt (engl. Life Cycle Assessment LCA). Die Durchführung einer derartigen Ökobilanz wird in der ISO 14040 und ISO 14044 genormt. Die in diesem Forschungsbericht vorgestellten Ökobilanzen sind deswegen in Anlehnung an diese Normen durchgeführt worden und auch extern durch das Paul Scherrer Institut gesichtet (engl. reviewed) worden.

Eine Ökobilanz gliedert sich in vier Schritte, die Definition des Untersuchungsrahmens (was wird betrachtet, was ist Teil des Systems, was ist Teil der Flüsse in die Umgebung außerhalb des Betrachtungsrahmens), das Erstellen einer sogenannten Sachbilanz (welche Materialien und Energien sind in der Produktion, der Nutzung, Instandhaltung oder dem Recycling notwendig), der Wirkungsabschätzung (Was sind die Zusammenhänge zwischen der Sachbilanz und den Umweltauswirkungen) und der Auswertung (Ist die Betrachtung vollständig, welche Sensitivitäten sind dominant).

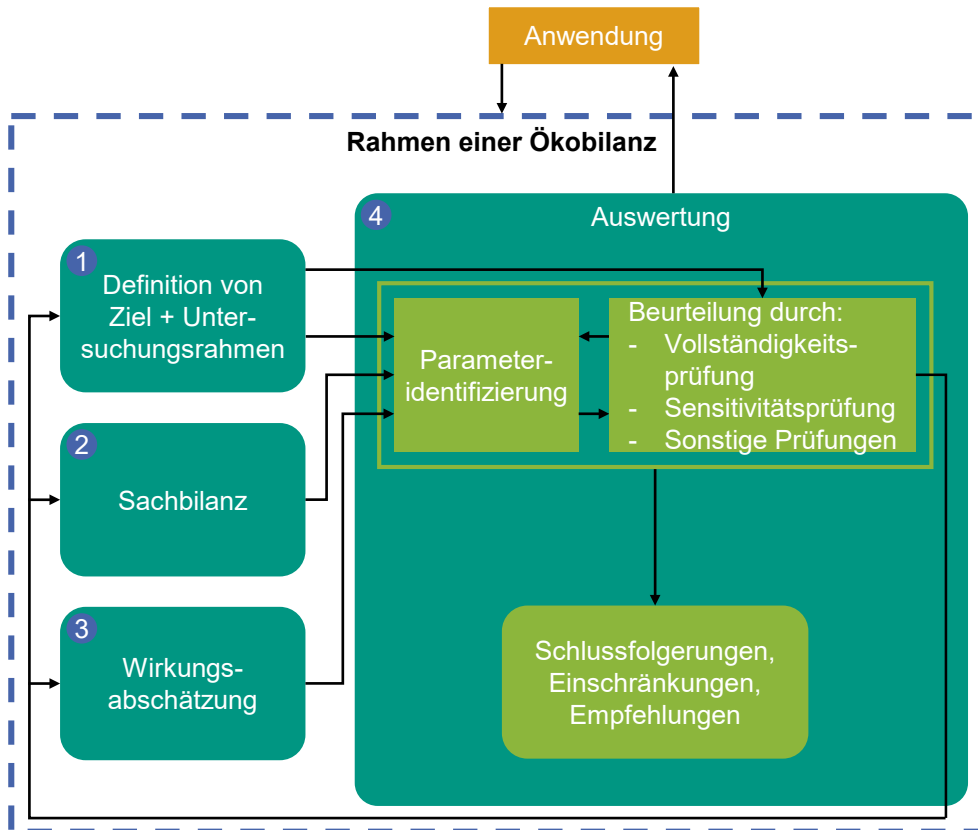


Abbildung 1: Visualisierung der Phasen einer Ökobilanz¹

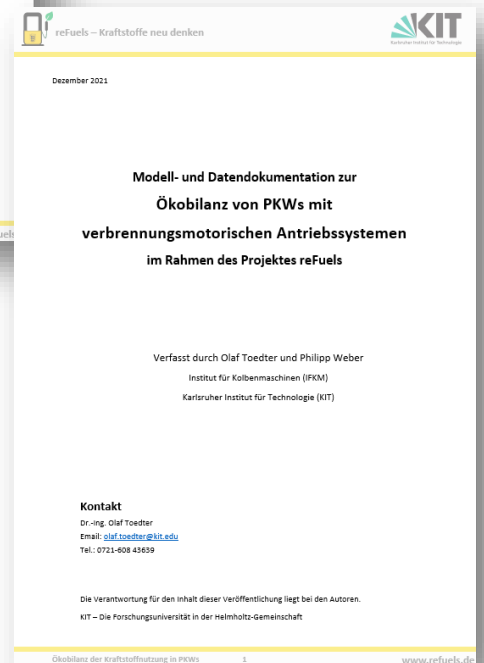
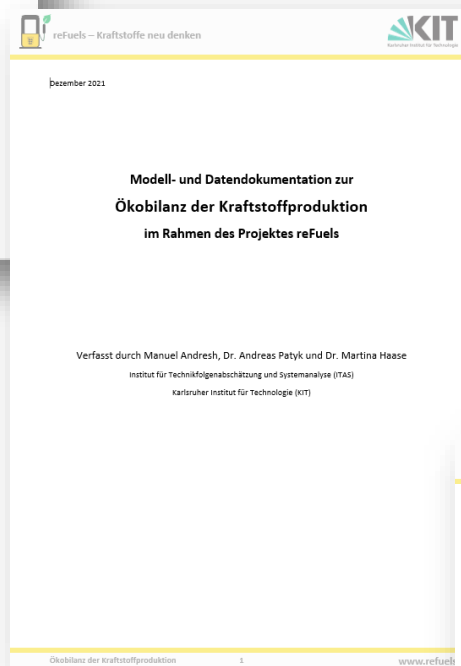
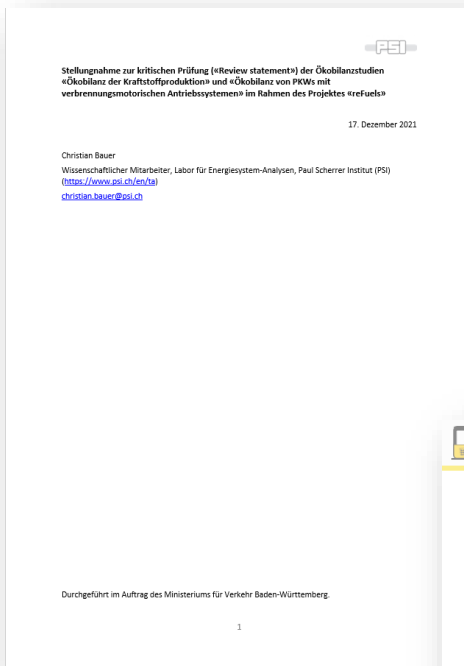
Im Falle der Kraftstoffe und ihrer Nutzung wurden hier die Ökobilanzen von zwei Teams durchgeführt, bei dem das Team, das die Nutzung der Kraftstoffe betrachtet hat, seine Ergebnisse an das zweite Team weitergeleitet hat. Dieses Team hat diese Ergebnisse als sogenannte „Vorkette“ der Wirkungen der Kraftstoffe in die Nutzung und damit die Berechnung der gesamten Umwelt-Wirkungen eingesetzt.

¹ Aus [Weber et al. 2019: „Ökobilanzierung – Kontroversen vorprogrammiert?“](#) nach DIN EN ISO 14044



Die beiden Studien sind in diesem Forschungsbericht in Form zweier separater Unterabschnitte dargestellt. Hierdurch können sowohl separate Randbedingungen bei der Kraftstoffsynthese betrachtet werden (funktionelle Einheit ist die Energieeinheit kWh) oder die Wirkungen inklusive der Nutzung der Kraftstoffe im Fahrzeug betrachtet werden (funktionelle Einheit ist die zurückgelegte Strecke eines Fahrzeuges in km).

Sobald hier verschiedene Produkte oder Prozesse verglichen werden sollen, ist die Ökobilanz zusätzlich einer Begutachtung, einem sogn. Review zu unterziehen. Hierbei werden die erstellten Datenbanken und die beschreibenden Berichte von einem externen Gutachter analysiert, ggf. Korrekturmaßnahmen und Ergänzungen vorgeschlagen, diese dann implementiert und nochmals begutachtet.



**Stellungnahme zur kritischen Prüfung («Review statement») der Ökobilanzstudien
«Ökobilanz der Kraftstoffproduktion» und «Ökobilanz von PKWs mit
verbrennungsmotorischen Antriebssystemen» im Rahmen des Projektes «reFuels»**

17. Dezember 2021

Christian Bauer

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Labor für Energiesystem-Analysen, Paul Scherrer Institut (PSI)

<https://www.psi.ch/en/ta>

christian.bauer@psi.ch

Durchgeführt im Auftrag des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg.

Hintergrund

Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erforscht im Rahmen des Projekts «reFuels – Kraftstoffe neu denken» zusammen mit verschiedenen Partnern die Herstellung und Nutzung von regenerativen Kraftstoffen, sogenannten «reFuels».

Teil dieser Arbeit ist die Quantifizierung von Umweltauswirkungen der Produktion und Nutzung solcher Kraftstoffe für den Antrieb von Personenwagen mittels Lebenszyklusanalyse («Life Cycle Assessment» – LCA) (auch bezeichnet als Ökobilanzierung). Um etablierten Standards zu entsprechen und eine hohe Qualität der Arbeit sicherzustellen, werden Ökobilanzen im Allgemeinen einer externen kritischen Prüfung unterzogen, auch «critical review» genannt. So auch hier – mit der kritischen Prüfung wurde die Gruppe Technologiebewertung des Paul Scherrer Instituts (PSI) in der Schweiz beauftragt, welche langjährige Erfahrung im Bereich Ökobilanzen von Fahrzeugen und Kraftstoffen aufweist. Die Prüfung wurde von Christian Bauer, wissenschaftlichem Mitarbeiter am PSI, und dort verantwortlich für den Bereich Ökobilanzen, durchgeführt.

Geprüfte Studien

Geprüft wurden folgende beiden Arbeiten:

- 1) Andresh, M., Patyk, A. und Haase, M. (2021) Modell- und Datendokumentation zur Ökobilanz der Kraftstoffproduktion. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- 2) Toedter, O. und Weber, P. (2021) Modell- und Datendokumentation zur Ökobilanz von PKWs mit verbrennungsmotorischen Antriebssystemen. Institut für Kolbenmaschinen (IFKM), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Die erste Arbeit beinhaltet die Dokumentation zur Ökobilanz bestimmter Herstellungspfade von synthetischen Kraftstoffen, basierend auf Strom bzw. Biomasse.

Die zweite Arbeit beinhaltet die Dokumentation zur Ökobilanz ausgewählter Personenwagen, betrieben mit (fossilen) Referenzkraftstoffen oder den synthetischen Treibstoffen, welche im ersten Bericht behandelt wurden.

Ausserdem wurden dem Reviewer die Sachbilanzdaten der einzelnen Prozesse, welche in den genannten Ökobilanzen erstellt wurden, zur Prüfung zur Verfügung gestellt.

Ziel und Umfang der kritischen Prüfung

Primäres Ziel der kritischen Prüfung war es, die Plausibilität und Korrektheit der Resultate der Ökobilanzen sicherzustellen. Damit verbunden war die Prüfung der Vorgangsweise der Autorentams bzgl. methodischer Korrektheit, der Verwendung korrekter Inputdaten und Annahmen sowie die Sicherstellung einer verständlichen, ausreichenden und transparenten Dokumentation der Arbeit.

Insgesamt sollte die kritische Prüfung sicherstellen, dass die Ökobilanzen den in diesem Bereich relevanten ISO Standards ISO 14040 und 14044 entsprechen, welche auch eine kritische Prüfung als verpflichtendes Element einer für die Öffentlichkeit vorgesehenen Ökobilanz vorsehen.

Vorgangsweise

Die kritische Prüfung fand im Zeitraum Februar bis November 2021 statt. Zu Beginn wurden die ersten für das Review vorliegenden Versionen beider Berichte sowie der Ökobilanzberechnungen geprüft. Sowohl die Sachbilanzdaten als auch die Ökobilanzberechnungen wurden wegen des enormen Umfangs der Inventardaten nur stichprobenartig auf Korrektheit geprüft. Basierend darauf wurden

den Autorenteams erste Kommentare und Verbesserungsvorschläge übermittelt, welche auch direkt zwischen Reviewer und den Autorenteams besprochen wurden, um allfällige Missverständnisse zu vermeiden. Die für legitim und umsetzbar erachteten Vorschläge zur Überarbeitung der Ökobilanzen und der Berichte wurden anschliessend von den Autorenteams umgesetzt.

Schliesslich wurden dem Reviewer überarbeitete Berichte übermittelt, welche wiederum geprüft wurden. Darauf folgten letzte, geringfügige Verbesserungsvorschläge des Reviewers, welche in den Schlussberichten umgesetzt werden sollten.

Kernelemente der kritischen Prüfung und der darauffolgenden Überarbeitung

Im ersten Teil der kritischen Prüfung, bei der Durchsicht der Berichtsversionen von Februar 2021 und der zugehörigen Sachbilanzdaten, wurde Potenzial zur Verbesserung der Ökobilanzen sowie der Berichte festgestellt, und zwar vor allem in folgenden Bereichen:

- Vollständigkeit der Beschreibung der Prozesse, welche in den Ökobilanzen der Kraftstoffproduktion und der Fahrzeuge abgebildet sind, und deren Dokumentation in den Ökobilanz-Berichten

Eine vollständige Beschreibung der Prozesse ist essentiell, um Verständlichkeit und Transparenz der Arbeit zu gewährleisten. Manche der Ökobilanzergebnisse hängen stark davon ab, wie einzelne Prozesse im Detail modelliert sind und welche Annahmen dabei getroffen werden. Ergebnisse sind deswegen oft nur verständlich, wenn die Prozessmodellierung nachvollziehbar ist.

Im Bereich der Arbeit zur Kraftstoffproduktion bezogen sich die Kommentare dieser Art vor allem auf eine vollständige Beschreibung der mikrostrukturierten Fischer-Tropsch-Synthese und des bioliq-Prozesses; im Bereich der Fahrzeug-LCA vorrangig auf eine transparente Beschreibung der Annahmen und genutzten Daten zum Betrieb der Autos.

- Verwendung neuester Datenquellen

Die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen und deren Ökobilanz ist derzeit ein Thema, bei dem laufend neue Erkenntnisse entstehen und neue Veröffentlichungen, welche als Datenquellen in Ökobilanzen genutzt werden können, regelmässig zur Verfügung stehen. Es ist deswegen wichtig, Ökobilanzen basierend auf dem neuesten Stand des Wissens zu erstellen – einerseits um technologisch den «state-of-the-art» abzubilden, andererseits aber auch, um die Glaubwürdigkeit der Arbeit zu sichern.

Hinweise bezüglich neuerer und zusätzlicher Daten- und Informationsquellen konnten hinsichtlich CO₂-Abscheidung und Umgang mit diesem CO₂ als «Rohstoff» in Ökobilanzen generell – wofür es verschiedene Ansätze gibt – gegeben werden.

- Ergänzung der Ökobilanz mit zusätzlichen Sensitivitätsanalysen

Eine Art, mit den in Ökobilanzen im Bereich von Prozessdaten bestehenden Unsicherheiten umzugehen, sind Sensitivitätsanalysen. Diese erlauben es, den Einfluss von einzelnen (oder mehreren) Prozessparametern auf die Ergebnisse der Ökobilanz abzuschätzen. Ausserdem kann so veranschaulicht werden, wie sich unterschiedliche Allokationsmethoden in der Ökobilanz auswirken.

Während der kritischen Prüfung angeregt wurden zusätzliche Sensitivitätsanalysen zum Umgang mit CO₂ als Rohstoff, der Frage, ob Biomasse als Abfall ohne Umweltauswirkungen gelten kann, sowie zu den Betriebsparametern der Fahrzeuge. Diese Faktoren haben zum Teil erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzen.

- Diskussion der Limitationen und Unsicherheiten der Daten und Ergebnisse sowie Einordnung der Ergebnisse

Zur Interpretation von Ökobilanzergebnissen ist es sehr hilfreich, wenn die Belastbarkeit der Resultate diskutiert wird, da diese oft nur unter ganz bestimmten Rahmenbedingungen und Annahmen gelten, welche für die Ökobilanz definiert und bestimmt wurden. Ebenfalls nützlich ist es, allenfalls vorhandene Lücken in den Daten aufzuzeigen sowie deren potenziellen Einfluss auf die Ergebnisse, um einen Bedarf an weiteren Arbeiten festzuhalten.

In diesem Zusammenhang wurde in den ursprünglichen Versionen der Berichte ein Bedarf an ausführlicherer Diskussion der Ökobilanzergebnisse festgestellt. Primär, um die Verständlichkeit für eine breite Leserschaft zu gewährleisten.

Abschliessende Stellungnahme

Sämtliche Review-Kommentare, welche unter Berücksichtigung der Ziele dieser Arbeit als bedeutend erachtet werden können, wurden während der Überarbeitung von den Autorenteams weitgehend vollständig berücksichtigt und umgesetzt.

Die Ökobilanzen und die beiden zugehörigen Berichte zur Kraftstoffproduktion und deren Nutzung in Personenwagen entsprechen in ihren Endversionen im Grossen und Ganzen den zu erwartenden Standards. Sie können demnach als geeignete Informationsquellen zu den Umweltauswirkungen von Personautos, die mit synthetischen Kraftstoffen der analysierten Art betrieben werden, betrachtet werden.

Die Ökobilanzergebnisse sind plausibel sowie korrekt und weitgehend ansprechend dargestellt. Die Kernbotschaften, die sich aus den Ökobilanzen ergeben, fassen die wichtigsten Erkenntnisse gut zusammen. Die Berichte sind in ansprechender Form verfasst und sollten auch für eine breitere Leserschaft verständlich sein.

Besonders positiv hervorzuheben sind der aussergewöhnliche Detaillierungsgrad in der Modellierung des Antriebsstrangs der Fahrzeuge sowie die Bilanzierung eines neuartigen Verfahrens zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe.

Die weitgehende Beschränkung der Arbeit auf Treibhausgasemissionen als Umweltindikator von primärem Interesse wird als eine legitime Schwerpunktsetzung angesehen. Dies vor allem angesichts der bestehenden Unsicherheiten und der methodologischen Einschränkungen, die bei vielen anderen Umweltindikatoren bei Ökobilanzen von neuartigen Kraftstoffen und Fahrzeugen derzeit gegeben sind.

Aus Sicht des Reviewers wäre eine öffentliche Verfügbarkeit der Inventardaten wünschenswert, um den allgemein zugänglichen Inventardatenbestand im Bereich Personenwagen zu verbessern und darauf aufbauende Analysen zu ermöglichen.

Falls die vorliegenden und geprüften Arbeiten für einen Vergleich zwischen Autos mit Verbrennungsmotoren, Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen genutzt werden sollen, dann wird empfohlen, die Sensitivitätsanalysen deutlich zu erweitern. Zu beachtende und näher zu untersuchende Aspekte wären beispielsweise der Treibstoffverbrauch unter Realbedingungen im Vergleich zum Normzyklus, die zu erwartende zukünftige Entwicklung der Fahrzeuge und der Treibstoffproduktion sowie die Infrastruktur, die für nicht fossile Treibstoffe (inkl. Strom und Wasserstoff) benötigt wird.



Dezember 2021

Modell- und Datendokumentation zur Ökobilanz der Kraftstoffproduktion im Rahmen des Projektes reFuels

Verfasst durch Manuel Andresh, Dr. Andreas Patyk und Dr. Martina Haase

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



Inhalt

| | |
|---|----|
| Inhalt..... | 2 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 4 |
| Tabellenverzeichnis..... | 4 |
| Abkürzungsverzeichnis..... | 4 |
| 1 Hintergrund..... | 5 |
| 2 Methodischer Ansatz „Ökobilanz“..... | 5 |
| 3 Ziel und Untersuchungsrahmen..... | 6 |
| 3.1 Projektgegenstand und -ziele..... | 6 |
| 3.2 Funktion und funktionelle Einheit..... | 6 |
| 3.3 Systemgrenzen..... | 7 |
| 3.4 Bezugsraum und -zeit..... | 7 |
| 3.5 Allokation..... | 7 |
| 3.6 Wirkungsabschätzung..... | 7 |
| 3.7 Erhebung und Aufbereitung der Sachbilanzdaten, Datenqualität, Annahmen, Einschränkungen.. | 8 |
| 3.8 Kritische Prüfung..... | 8 |
| 4 Prozessketten..... | 9 |
| 4.1 Allgemein..... | 9 |
| 4.2 Mikrostrukturierte Fischer-Tropsch-Synthese..... | 10 |
| 4.2.1 Strombereitstellung..... | 11 |
| 4.2.2 PEM-Elektrolyse..... | 11 |
| 4.2.3 Direct Air Capture (DAC)..... | 12 |
| 4.2.4 Zwei-Schritt-Synthese mit CPO..... | 12 |
| 4.2.5 Produktaufbereitung (Hydrocracking)..... | 12 |
| 4.2.6 Transport und Bereitstellung..... | 13 |
| 4.3 Konventionelle Fischer-Tropsch-Synthese..... | 13 |
| 4.3.1 Strombereitstellung..... | 14 |
| 4.3.2 Zementwerk (CO ₂ -Quelle)..... | 14 |
| 4.3.3 PEM-Elektrolyse..... | 14 |
| 4.3.4 Reverse wasser-Gas-Shift-Reaktor..... | 15 |
| 4.3.5 Fischer-Tropsch (FT)-Reaktor..... | 15 |
| 4.3.6 Produktaufbereitung und Gasrecycling..... | 15 |
| 4.3.7 Transport und Bereitstellung..... | 15 |
| 4.4 bioliq-Prozess (DMetG)..... | 15 |



| | | |
|-------|--|----|
| 4.4.1 | Strohbereitstellung | 16 |
| 4.4.2 | Lagerung und Konditionierung | 16 |
| 4.4.3 | Pyrolyse..... | 16 |
| 4.4.4 | Vergaser | 17 |
| 4.4.5 | Synthese..... | 17 |
| 4.4.6 | Gas- und Dampfturbine..... | 17 |
| 4.4.7 | Transport und Bereitstellung..... | 17 |
| 5 | Ergebnisse | 18 |
| 6 | Sensitivitätsanalyse | 22 |
| 6.1 | Allokation und Heizwert | 22 |
| 6.2 | bioliq-Modell mit nicht lastenfreier Strohbereitstellung | 26 |
| 7 | Diskussion | 27 |
| 8 | Literatur | 28 |
| 9 | Anhang..... | 29 |
| 9.1 | Annahmen und Sachbilanz zum Modell des bioliq-Prozesses | 29 |
| 9.2 | Annahmen und Sachbilanz zum Modell der mikrostrukturierten FT-Synthese | 31 |
| 9.3 | Annahmen und Sachbilanz zum Modell der konventionellen FT-Synthese..... | 33 |



Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Übersichtsschema Bereitstellung von FT-Diesel-Synthese mit mikrostrukturierten Reaktoren . | 10 |
| Abbildung 2: Verwendetes Modell aus Vázquez et al. (2018) [24] | 11 |
| Abbildung 3: Prozess der konventionellen Fischer-Tropsch-Synthese..... | 13 |
| Abbildung 4: Verwendetes Modell für die konventionelle FT-Synthese, IIP..... | 14 |
| Abbildung 5: Fließbild des bioliq-Prozesses [10]..... | 15 |
| Abbildung 6: Verwendetes Modell aus Trippe (2013)..... | 16 |
| Abbildung 7: Treibhauseffekt von reFuels und fossilen Kraftstoffen in kg CO ₂ Äq. / MJ Kraftstoff..... | 19 |
| Abbildung 8: Feinstaubbildung von reFuels und fossilen Kraftstoffen in kg PM _{2,5} Äq. / MJ Kraftstoff..... | 20 |
| Abbildung 9: Verknappung fos. Ressourcen von reFuels und fossilen Kraftstoffen in MJ Rohöl-Äq. / MJ Krst.21 | |
| Abbildung 10: Treibhauseffekt bei Allokation nach Heizwert..... | 23 |
| Abbildung 11: Partikelbildung bei Allokation nach Heizwert..... | 24 |
| Abbildung 12: Verknappung fossiler Ressourcen bei Allokation nach Heizwert..... | 25 |
| Abbildung 13: Treibhauseffekt von bioliq bei nicht lastenfrier Strohbereitstellung..... | 26 |
| Abbildung 14: Landflächennutzung von bioliq bei nicht lastenfrier Strohbereitstellung..... | 27 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Zusammensetzung der modellierten Strommixe | 9 |
| Tabelle 2: Modellierung der Strombereitstellung aus erneuerbaren Quellen..... | 10 |
| Tabelle 3: bioliq-Prozess: Pyrolyse | 30 |
| Tabelle 4: bioliq-Prozess: Vergasung (inkl. Gasbehandlung)..... | 30 |
| Tabelle 5: bioliq-Prozess: Synthese (inkl. GuD) | 31 |
| Tabelle 6: bioliq-Prozess: Gesamtbilanz des elektrischen Stroms | 31 |
| Tabelle 7: Mikrostrukturierte FT-Synthese: DAC..... | 32 |
| Tabelle 8: Mikrostrukturierte FT-Synthese: PEM-Elektrolyse | 32 |
| Tabelle 9: Mikrostrukturierte FT-Synthese: Zwei-Schritt-Synthese mit CPO und Produktaufbereitung | 33 |
| Tabelle 10: Konventionelle FT-Synthese: PEM-Elektrolyse | 33 |
| Tabelle 11: Konventionelle FT-Synthese: Reverse Wasser-Gas-Shift..... | 34 |
| Tabelle 12: Konventionelle FT-Synthese: FT-Synthese mit Produktaufbereitung..... | 34 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------|---|
| CPO | katalytische partielle Oxidation |
| DAC | Direct Air Capture |
| DME | Dimethylether |
| DMEtG | Dimethylether-to-Gasoline |
| FT | Fischer-Tropsch |
| GuD | Gas- und Dampfturbine |
| HC | Hydrocracken |
| IFKM | Institut für Kolbenmaschinen |
| IIP | Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion |
| IKFT | Institut für Katalysatorforschung und -technologie |
| IMVT | Institut für Mikroverfahrenstechnik |
| ITAS | Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse |
| KIT | Karlsruher Institut für Technologie |
| PEM | Protonen-Austausch-Membran |
| PSI | Paul Scherrer Institut |



1 Hintergrund

Im Forschungsprojekt **reFuels – Kraftstoffe neu denken** werden am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gefördert vom Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg gemeinsam mit drei weiteren Ministerien und Partnern aus der Automobil-, Automobilzuliefer- und Mineralölindustrie die Herstellung und Nutzung von regenerativen Kraftstoffen, sogenannten reFuels, erforscht. Die Kraftstoffe sollen für den Einsatz in der bestehenden Fahrzeugflotte geeignet sein. Neben der Weiterentwicklung der Produktionsprozesse und Analyse der Kraftstoffeigenschaften werden die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit sowie die gesellschaftliche Akzeptanz für diese Kraftstoffe analysiert und erprobt. Das Projekt umfasst die gesamte Wertschöpfungskette. Entsprechend sind die relevanten Akteursgruppen von Energieversorgern, Kraftstoffentwicklern und -erzeugern, über Zulieferer und Systementwickler bis hin zu Motoren- und Fahrzeugherstellern eingebunden.

Inwiefern diese regenerativen Kraftstoffe eine ökologisch nachhaltigere Lösung als fossile Kraftstoffe darstellen, wird im Cluster C1 des reFuels-Projekts erforscht. Mit einer Ökobilanz werden die potenziellen Umweltwirkungen der Kraftstoffbereitstellung und -nutzung, d. h. entlang des gesamten Kraftstoff-Lebenszyklus, untersucht.

2 Methodischer Ansatz „Ökobilanz“

Ökobilanzen sind Zusammenstellungen und Interpretationen

- der In- und Outputflüsse zwischen Technosphäre und Umwelt sowie
- der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktes oder Produktsystems

entlang seines gesamten Lebensweges.

Damit liefern Ökobilanzen nicht nur über einzelne Produktionsstufen oder Umweltprobleme, sondern über eine Vielzahl an Umwelteffekten von Produkten und Dienstleistungen "von der Wiege bis zur Bahre" umfassende Informationen. Ökobilanzen bilden somit die Basis zur umweltgerechten Produktgestaltung sowie für Grundsatzentscheidungen in Energie-, Umwelt- und Technologiepolitik und zur Unternehmensstrategie.

Das Vorgehen bei der Erstellung von Ökobilanzen ist durch die DIN/EN/ISO-Normen 14040/44 weitgehend vorgegeben [14, 15].

Danach besteht eine Ökobilanz aus vier Phasen:

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
2. Sachbilanz (anschaulich: Stoffstrommodell; Energie-, Ressourcen- und Emissionsbilanz)
3. Wirkungsabschätzung (anschaulich: "Zuordnung von Emissionen zu Umweltwirkungen")
4. Auswertung (Ergebnisqualität, Interpretation, Empfehlungen)

In der Praxis sind gewisse Vereinfachungen hinsichtlich der betrachteten Prozesse und Beschränkungen bei den analysierten Umweltwirkungen aus methodischen und praktischen Gründen üblich und z.T. unumgänglich. Dieses Vorgehen stellt weder den ganzheitlichen Anspruch in Frage noch schränkt es die Aussagefähigkeit der Ergebnisse ein, wenn es dokumentiert, begründet und hinsichtlich seiner Effekte auf die Ergebnisse bewertet wird sowie in Übereinstimmung mit dem Erkenntnisinteresse der jeweiligen Studie erfolgt.



3 Ziel und Untersuchungsrahmen

Die hier getroffenen Festlegungen sind wesentlich für den Erfolg des Projektes. Dazu gehören z. B. das Ziel der Studie und inhaltliche Festlegung wie prozessbezogene Systemgrenzen, betrachtete Umweltwirkungen, geographische und zeitliche Bezüge.

3.1 Projektgegenstand und -ziele

Gegenstand des Teilprojektes ist die Erstellung von vergleichenden Ökobilanzen nach ISO 14040/44 für die Bereitstellung von erneuerbaren Kraftstoffen (reFuels) und ihren fossilen Pendanten:

- A Dieselkraftstoff aus der mikrostrukturierten Fischer-Tropsch-Synthese mit reverse Water-Gas-Shift und Protonen-Austausch-Membran (PEM)-Elektrolyse
- B Dieselkraftstoff aus der konventionellen Fischer-Tropsch-Synthese mit reverse Water-Gas-Shift und PEM-Elektrolyse
- C Ottokraftstoff aus dem bioliq-Prozess – Dimethylether-to-Gasoline (DMEtG)

Alle drei Prozessrouten werden von der Strom- / Kohlenstoffquelle bis zur Bereitstellung des Kraftstoffs an der Tankstelle modelliert. Die anschließende Nutzungsphase wird durch die Ökobilanz der Kraftfahrzeuge durch das Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) ergänzt.

Das Teilprojekt soll

1. die umweltbezogenen Vor- und Nachteile der einzelnen reFuels-Pfade gegenüber fossilen Kraftstoffen identifizieren und quantifizieren,
2. Hot Spots identifizieren und soweit möglich in diesem Zusammenhang Vorschläge zur Optimierung entwickeln,
3. die Ergebnisse in einer für Kommunikationszwecke nutzbaren Weise dokumentieren und diskutieren.

Adressaten sind die Öffentlichkeit, Politik und Teile der Industrie, welche mit der Fahrzeug- und Kraftstoffproduktion in Verbindung stehen.

3.2 Funktion und funktionelle Einheit

Die Funktion der untersuchten Systeme besteht in der Bereitstellung von Kraftstoffen. In der Erweiterung auf Fahrzeuglebenszyklen besteht die Funktion in einem Beitrag zur Bereitstellung von Transportleistung. Die funktionelle Einheit ist die Bereitstellung von Kraftstoff jeweils für die drei Kraftstoffrouten A bis C. Diese funktionelle Einheit muss in eine entsprechende Bezugsgröße im Stoffstrommodell übersetzt werden, den sogenannten Referenzfluss. Als Referenzfluss wird in dieser Studie ein Megajoule (MJ) Kraftstoff definiert.

Für die verschiedenen Kraftstoffe werden folgende Heizwerte angenommen:

- Fossiler Dieselkraftstoff: 42,6 MJ / kg [4]
- Fossiler Ottokraftstoff: 42,3 MJ / kg [4]
- Fischer-Tropsch-Dieseldieselkraftstoff: 44 MJ / kg [23]
- DME-Benzin: 40,95 MJ / kg [21]



3.3 Systemgrenzen

Strombereitstellung für Power-to-X

Bilanziert wird die Produktion der FT-Dieselmotorkraftstoffe beginnend mit der Bereitstellung von elektrischem Strom.

Strohbereitstellung für bioliq

Für das bioliq-Verfahren zur Bereitstellung von Ottokraftstoff beginnt die Prozesskette mit der Bereitstellung von Stroh.

Betriebsmittel, Infrastruktur

Die Material- und Energieaufwände zur Fertigung von Anlagen, Maschinen und anderen Komponenten werden durch Primär- und Literaturdaten bzw. darauf basierenden Schätzungen beschrieben.

Produktion der reFuels

Die Produktion ist – soweit möglich – in den Modellen aller drei Prozesskonzepte in die Schritte Synthesegas-erzeugung, Synthese, Upgrading und anfallende Transporte untergliedert.

Transporte und Bereitstellung der Kraftstoffe

Es wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Prozessschritte der Power-to-X-Anlagen zusammen an einem Standort stehen, also keine Zwischenprodukt-Transporte anfallen. Für den bioliq-Prozess fallen hingegen mehrere Transporte von Rohstoffen, Zwischenprodukten und Abfällen an und wurden entsprechend modelliert. Der abschließende Transport der Kraftstoffe zu Tankstellen wird in allen Prozessen berücksichtigt.

3.4 Bezugsraum und -zeit

Den Bezug bildet grundsätzlich Deutschland im Jahr 2020. Streng einhaltbar ist dieser Bezug nur für die eigentlichen Produktionsprozesse, sowie in der Pkw-Bilanz, die die Nutzungsphase beschreibt. Für die Bereitstellung der eingesetzten Energieträger und Materialien wird der Bezugsraum auf die für die Bereitstellung relevanten Länder ausgedehnt.

3.5 Allokation

Allokationen in Datensätzen erfolgen wie in den ecoinvent-Datensätzen (ecoinvent 3.7.1, cut-off) hinterlegt. Für weitere Prozesse wurden außer für die Sensitivitätsanalyse keine Allokationen durchgeführt. Soweit notwendig wurde Allokation durch Systemerweiterungen gemäß ISO 14044 Abschnitt 4.3.4.2 [14] vermieden. Beispielsweise wurde der Aufwand zur Bereitstellung von Wachs aus der FT-Synthese nicht zwischen Kraftstoff und Wachs alloziert. Stattdessen wurde das System um die vermiedene gleichwertige Wachs-Produktion erweitert. Allerdings wird eine Allokation nach Energiegehalt in der Sensitivitätsanalyse betrachtet.

3.6 Wirkungsabschätzung

Die Auswahl der Wirkungskategorien und Durchführung der Wirkungsabschätzung orientieren sich an aktuellen und umfassenden Ökobilanzen zu alternativen Kraftstoffen. Berücksichtigt werden damit sowohl die Relevanz von Umweltproblemen als auch Limitierungen der Datenverfügbarkeit und die methodischen Möglichkeiten einer belastbaren Bewertung von Sachbilanzdaten. Erfasst werden die Wirkungskategorien

- Treibhauseffekt (GWP 100)



- Feinstaubbildung
- Verknappung fossiler Ressourcen

Die Wirkungskategorien Treibhauseffekt und Feinstaubbildung wurden gewählt, da diese im Zusammenhang mit Mobilitätsthemen vorrangig in der Öffentlichkeit diskutiert werden. Die Wirkungskategorie Verknappung fossiler Ressourcen wurde gewählt, um einen Vergleich zwischen den Ressourcenaufwendungen für die Synthese erneuerbarer Energieträger und der konventionellen Gewinnung fossiler Energieträger zu erzielen. Die Wirkungsabschätzung in den genannten Kategorien erfolgt gemäß ReCiPe 2016 Midpoint (Hierarchist). Eine Normierung findet nicht statt. Die Indikatorwerte der reFuels werden mit denen fossiler Kraftstoffe verglichen.

3.7 Erhebung und Aufbereitung der Sachbilanzdaten, Datenqualität, Annahmen, Einschränkungen

Datengenerierung

Für die untersuchten Beispiele lassen sich grundsätzlich zwei Prozess- und Datenkategorien unterscheiden:

- spezifische Prozesse der Kraftstoffproduktion, für die von ebenfalls am Projekt beteiligten Instituten (Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT), Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Institut für Katalysatorforschung und -technologie (IKFT)) Simulationen durchgeführt worden sind (Software Aspen Plus).
- generische Prozesse, für die ITAS Daten bereitstellt: Vorgelagerte Prozesse wie Bereitstellung der eingesetzten Werkstoffe, Hilfs- und Betriebsstoffe, Energieträger, Konstruktion der Anlagen. Diese Daten werden aus etablierten, validierten Datenbanksystemen (ecoinvent 3.7.1, cut-off) und einschlägigen Studien entnommen oder darauf und auf Expertenbefragungen basierend generiert.

Datenqualität

Die Simulations-Daten aus Aspen Plus sind in jedem Fall belastbarer als Surrogatdaten. Allerdings dürften trotzdem erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich repräsentativer oder durchschnittlicher Werte bestehen, die aus den Bandbreiten der In- und Outputs verschiedener Techniken, Standards und Prozessführungen mit dem gleichen Produkt entstehen.

Die Datenqualität der generischen Datensätze ist "sehr gut" bis nur "mäßig" (Energie und Transport bzw. einzelne Werk-, Hilfs- und Betriebsstoffe).

Hinsichtlich der Datenqualität ist grundsätzlich zwischen ökonomischen Flüssen (i. d. R. Flüsse zwischen Prozessen) und Elementarflüssen (Wechselwirkungen zwischen Technosphäre und Umwelt) zu unterscheiden. Ökonomische Flüsse sind aufgrund eines technischen und/oder wirtschaftlichen Interesses besser dokumentiert als Elementarflüsse. Wo Elementarflüsse direkt an ökonomische Flüsse gekoppelt sind, ist auch die Datenqualität entsprechend gut. Beispielsweise kann die Freisetzung von CO₂ aus Verbrennungsprozessen direkt aus dem Brennstoffeinsatz ermittelt werden, was für andere Emissionen wie NO_x oder NMHC nur bedingt möglich ist. Insgesamt wird die Datenqualität als mindestens ausreichend eingeschätzt, d.h. für richtungssichere Entscheidungen geeignet.

3.8 Kritische Prüfung

Der Bericht wird durch das *Paul Scherrer Institut* (PSI) einer Kritischen Prüfung - angelehnt an die DIN/EN/ISO-Normen 14040/44 - unterzogen. Das Gutachten bestätigt die fachliche Güte und Ergebnisplausibilität der Studie.



4 Prozessketten

Die betrachteten Prozessketten im reFuels Projekt wurden im Rahmen von Technologie-Workshops und Diskussionen festgelegt. Für die FT-Dieselmotoren-Route werden mehrere mögliche CO₂-Quellen betrachtet sowie Containeranlagen mit mikrostrukturierten Reaktoren und typische Großanlagen mit konventioneller Technik betrachtet. Für die Ottomotoren-Route wird der bioliq-Prozess mit DME-Synthese betrachtet. In den folgenden Abschnitten werden für die einzelnen Prozessschritte jeweils die wichtigsten Eigenschaften / Funktionen und Materialflüsse beschrieben.

4.1 Allgemein

A) Strommixe

Zur Gewährleistung möglichst großer Aktualität wurde die Zusammensetzung der Strommixe (auf Ebene der Energieträger) für Deutschland und Europa aus Agora Energiewende (2020) und Agora Energiewende und Sandbag (2020) entnommen [1, 2]. Anschließend wurden die Anteile verschiedener Technologien je Energieträger (z. B. Aufteilung von Erdgas auf verschiedene Erdgaskraftwerktypen) aus der ecoinvent-Datenbank mit den Strommischen und der jeweiligen Spannungsstufe verknüpft.

Die zugrunde gelegte Zusammensetzung der Strommixe ist in Tabelle 1 aufgeführt:

Tabelle 1: Zusammensetzung der modellierten Strommixe

| | Europa | Deutschland |
|----------------------|--------|-------------|
| Biomasse | 6,2 % | 8,3 % |
| Braunkohle | 7,8 % | 18,8 % |
| Erdgas | 21,7 % | 15,1 % |
| Nuklear | 25,5 % | 12,4 % |
| Öl + Sonstige | 3,6 % | 4,2 % |
| Solar | 4,2 % | 7,7 % |
| Steinkohle | 6,8 % | 9,4 % |
| Wasser | 10,8 % | 3,1 % |
| Wind | 13,4 % | 20,9 % |

B) Strom aus erneuerbaren Quellen

Als potenzielle Technologien zur Strombereitstellung aus erneuerbaren Quellen wurden Photovoltaik (PV)- und Windkraftanlagen (WKA) mit dem Standort Deutschland und den damit verbundenen Volllaststunden gewählt. Es wird davon ausgegangen, dass die regenerative Strombereitstellung für die Kraftstoffproduktion mit Anlagen erfolgt, die zusätzlich zu den bestehenden gebaut werden, da anderenfalls der erneuerbare Anteil des allgemein verfügbaren Strommix negativ beeinflusst werden würde. Die durchschnittlichen Volllaststunden wurden simultan zu den Strommischen ebenfalls aktualisiert und in den jeweiligen Datensätzen angepasst (siehe Tabelle 2). Diese wurden für den Standort Deutschland für PV und WKA, onshore mithilfe des Tools www.renewables.ninja auf Basis von [17, 20] ermittelt. Die Volllaststunden für WKA, offshore wurden aus den durchschnittlichen Werten bestehender deutscher Offshore-Windparks aus dem gesamten Jahr 2020 aus den

Energy-Charts des Fraunhofer ISE-Instituts entnommen [9], da anderenfalls ein genauer offshore-Standort für die Ermittlung durch das Tool Renewables.ninja notwendig gewesen wäre, welcher nicht Teil des Projekts ist.

Tabelle 2: Modellierung der Strombereitstellung aus erneuerbaren Quellen

| | Datensatz ecoinvent[9] | Anpassung Volllaststunden pro Jahr | Quelle Volllaststunden |
|----------------------------------|--|------------------------------------|------------------------|
| Photovoltaik (PV) | Electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si electricity, low voltage Cutoff, U | 1191 | [17, 20] |
| Windkraftanlagen (WKA), onshore | Electricity production, wind, >3MW turbine, onshore electricity, high voltage Cutoff, U | 1717 | [17, 20] |
| Windkraftanlagen (WKA), offshore | Electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore electricity, high voltage Cutoff, U (ecoinvent) | 3530 | [9] |

C) Fossile Referenzen

Zur Einschätzung der potenziellen Umweltwirkungen der untersuchten Prozessketten werden Referenzprozesse aus der ecoinvent-Datenbank zum Vergleich eingesetzt. Als Referenz für den Dieselkraftstoff dient der ecoinvent-Datensatz *Market for diesel, low-sulfur (Europe without Switzerland)*, als Referenz für den Ottokraftstoff dient der ecoinvent-Datensatz *Market for petrol, low-sulfur (Europe without Switzerland)*.

4.2 Mikrostrukturierte Fischer-Tropsch-Synthese

In Abbildung 1 ist das Übersichtsschema der betrachteten FT-Diesel-Synthese dargestellt.

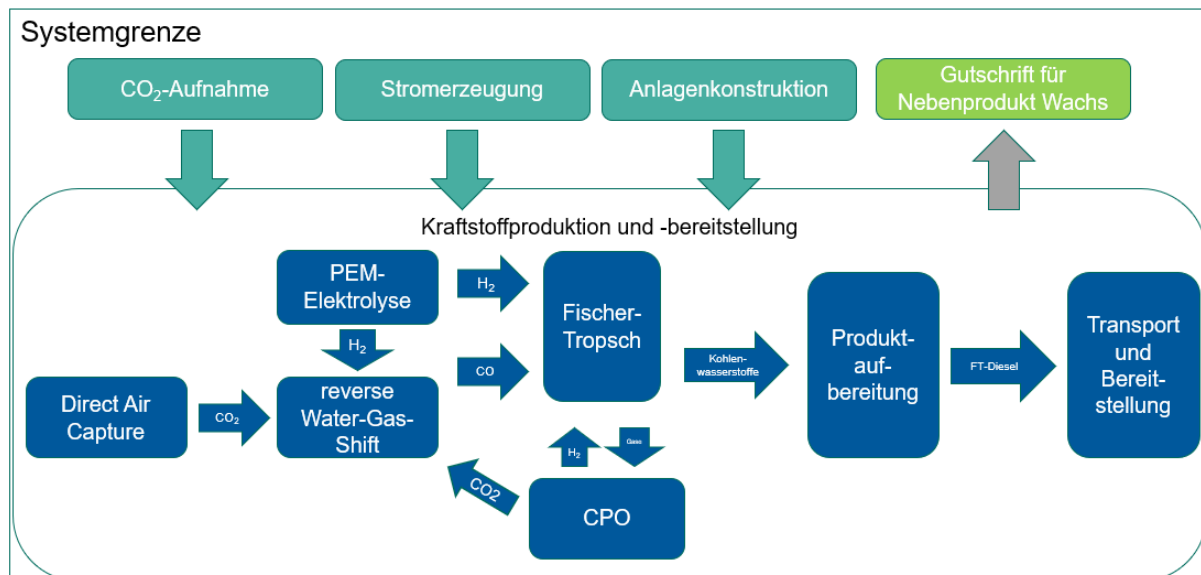


Abbildung 1: Übersichtsschema Bereitstellung von FT-Diesel-Synthese mit mikrostrukturierten Reaktoren

Das Modell der mikrostrukturierten Fischer-Tropsch-Synthese wurde auf Grundlage der Publikation *Vázquez et al. (2018): Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: SOLETAIR proof-of-concept and improved process concept* erstellt [24].

Das Modell nach Vazquez et al. (2018), siehe auch , umfasst die Prozesse von der Strombereitstellung bis zur reFuels-Synthese. Die Aufbereitung der Produkte (Hydrocracking und Hydrotreatment) ist hier noch nicht inbegriffen und wurde nachträglich hinzugefügt.

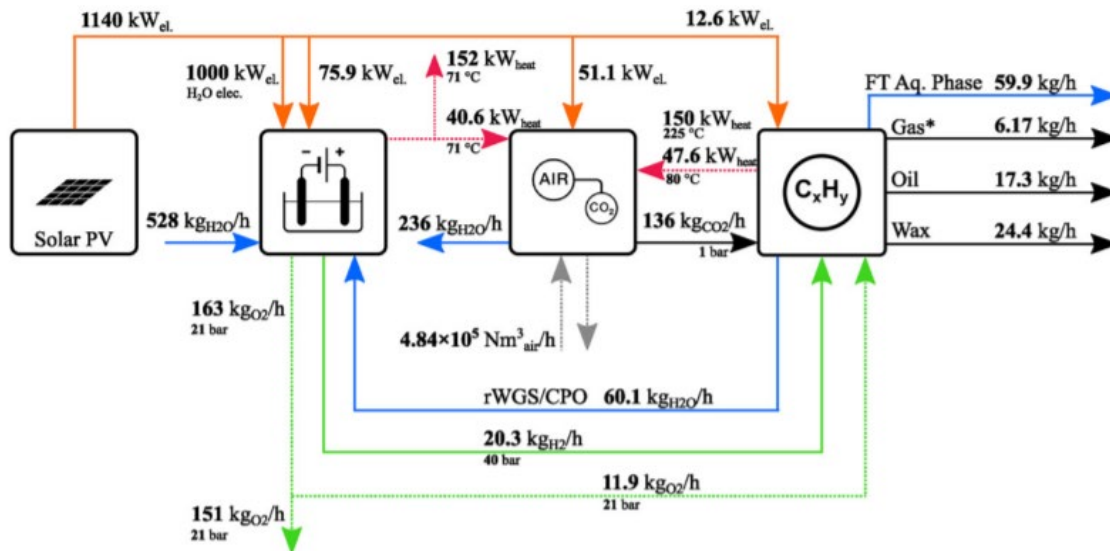


Abbildung 2: Verwendetes Modell aus Vázquez et al. (2018) [24]

4.2.1 Strombereitstellung

Während das Modell aus Vázquez et al. (2018) nur auf PV-Strom zurückgreift, werden in reFuels alle in 4.1 beschriebenen Stromquellen betrachtet. Die Verfügbarkeit der gesamten Anlage wird hierbei jeweils mit der Anzahl an Volllaststunden der Stromquelle gleichgesetzt, da die Stromquelle zusätzlich und deshalb unabhängig vom Stromnetz betrieben wird (siehe Abschnitt 4.1 B)). Bei Verwendung der Strommixe aus dem Netz wird eine Auslastung von 90 % angenommen. Zusätzlich wird aber auch jeweils ein Szenario betrachtet, in dem die Anlage trotz volatilen Stroms aus erneuerbaren Quellen mit 90 % Auslastung betrieben werden kann (hierbei wird angenommen, dass der Strom aus erneuerbaren Quellen in ausreichendem Maße gespeichert, bzw. über weitere Quellen bezogen werden kann. Die durch einen entsprechenden Speicher potenziell anfallenden Umweltwirkungen werden im Modell jedoch nicht berücksichtigt).

4.2.2 PEM-Elektrolyse

Als Wasserstoff (H₂)-Quelle wird im Modell ein Protonen-Austausch-Membran (PEM)-Elektrolyseur eingesetzt. Dieser besitzt eine Nennkapazität von 1,01 MW, womit 20,6 kg H₂ / h (Synthese + Produktaufbereitung) erzeugt werden. Für den zusätzlichen Wasserstoffbedarf für die Produktaufbereitung wurde der Strombedarf linear skaliert.

Das Wasser zur H₂-Erzeugung wird im Modell aus mehreren Quellen bezogen. Ein Teil wird aus der Direct Air Capture (DAC)-Anlage zur CO₂-Bereitstellung entnommen. Diese DAC-Anlage entnimmt neben CO₂ auch Wasser aus der Luft. Ein anderer Teil wird aus der Synthese-Einheit entnommen. Der Rest wird als aufbereitetes Wasser aus einer externen Quelle durch den ecoinvent-Datensatz *Market for deionised water* bereitgestellt. Für den zusätzlichen H₂-Bedarf für die Produktaufbereitung wurde auch der Wasserbedarf linear skaliert und der externen Quelle zugeschrieben.

Zur Fertigung des Elektrolyseurs wurde der ecoinvent-Datensatz *Fuel cell production, polymer electrolyte membrane, 2kW electrical, future*, für die Instandhaltung des Elektrolyseurs und den Austausch der Stacks der ecoinvent-Datensatz *Maintenance, polymer electrolyte membrane fuel cell 2kW electrical* verwendet und linear auf die modellierte Kapazität von 1,01 MW skaliert.



4.2.3 Direct Air Capture (DAC)

Die DAC-Anlage dient der CO₂-Bereitstellung. Für die Entnahme von CO₂ aus der Umgebungsluft wird zum einen elektrische Energie hauptsächlich zur Bewegung des Luftstroms und zum anderen thermische Energie zur Desorption benötigt. Die elektrische Energie wird aus der allgemeinen Stromquelle des Prozesses bereitgestellt. Die Wärme wird aus Abwärme der PEM-Elektrolyse, der Synthese und der katalytischen partiellen Oxidation gewonnen. Dadurch fallen mehrere Energieströme mit unterschiedlichen Temperaturen an. Es wird davon ausgegangen, dass diese für den Wärmebedarf der DAC-Anlage ausreichen.

Zur Abbildung der Konstruktion der Anlage werden die Daten aus Deutz und Bardow (2021) [5] zur Fertigung einer typischen DAC-Anlage mit 4 kt CO₂ / a verwendet und linear auf die Kapazität der Anlage skaliert. Eine Lebensdauer von 20 Jahren wird angenommen. Die benötigte Menge an Sorbens wurde ebenfalls aus Deutz und Bardow (2021) übernommen. Zur Bereitstellung des Sorbens wird der Datensatz *Market for anionic resin* verwendet. Die Massen- und Energieströme zum Betrieb der DAC-Anlage basieren auf dem Modell von Vázquez et al. (2018), um die Konsistenz mit dem Gesamtprozess zu bewahren.

Das eingehende CO₂ wird mit einem Charakterisierungsfaktor von -1 kg CO₂ Äq / kg CO₂ bewertet, um die Entziehung von CO₂ aus der Atmosphäre darzustellen.

4.2.4 Zwei-Schritt-Synthese mit CPO

Um aus CO₂ und H₂ flüssige Kohlenwasserstoffe zu synthetisieren, wird im Modell ein Reverse Water Gas Shift (rWGS)-Reaktor mit einem mikrostrukturierten Fischer-Tropsch (FT)-Reaktor kombiniert. Durch den rWGS wird CO₂ unter Zugabe von H₂ zu Kohlenstoffmonoxid (CO) reduziert. Anschließend werden H₂ und CO durch die FT-Synthese zu Kohlenwasserstoffen umgesetzt. Dabei fallen gasförmige, flüssige und feste Produkte nach der Anderson-Schulz-Flory-Verteilung an. Neben RWGS und FT-Synthese ist eine katalytische partielle Oxidation (CPO) zur Systemoptimierung integriert. Das anfallende Purge-Gas teilt sich in verschiedene Produkte auf. Die Verteilung wurde beim Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) angefragt und übernommen und als Emissionen modelliert. Die Fertigung der Anlage wird durch den ecoinvent-Datensatz *Chemical factory construction dargestellt*. Für die Skalierung des Prozesses wird davon ausgegangen, dass das zulässige Ladegewicht eines 40-Fuß-Containers vollständig mit der Synthese und Aufbereitungs-Anlage ausgelastet wird (26.620 kg). Eine Lebensdauer von 20 Jahren wird angenommen. Als Katalysatoren wurde für die FT-Synthese ein Cobalt (Co)-basierter Katalysator nach Kirsch et al. (2020) [12], für den rWGS ein Fe/Al₂O₃ Katalysator nach Pastor-Pérez et al. (2018) [16] modelliert. Die benötigte Menge Katalysator für die FT-Synthese pro kg Endprodukt wurde aus Loewert et al. (2019) [13] entnommen. Die benötigte Menge Katalysator für den rWGS wurde anhand der benötigten Menge FT-Katalysator und der Oberfläche beider Katalysatoren berechnet. Dies ist eine vereinfachte Annahme, die aufgrund der Datenlage angewandt wurde, jedoch hat die Katalysatorbereitstellung gewöhnlich keinen signifikanten Einfluss auf die potenziellen Umweltwirkungen. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Katalysatoren alle zwei Jahre ausgetauscht werden müssen.

4.2.5 Produktaufbereitung (Hydrocracking)

Durch das Hydrocracking und Hydrotreatment werden die verschiedenen Produkte nach der FT-Synthese in die erforderliche Kohlenstoffkettenlänge gebrochen und weiterverarbeitet. Der hierfür anfallende H₂-Bedarf wurde aus dem Modell der konventionellen FT-Synthese übernommen. Dieser Wasserstoff wird aus der PEM-Elektrolyse bereitgestellt. Die anschließende Verteilung nach Gasen, flüssigen Kohlenwasserstoffen und Wachsen wurde aus Expertenschätzungen u. a. auf Basis vertraulicher Messdaten übernommen.

Die Anlagen der Produktaufbereitung und der Zwei-Schritt-Synthese wurden in einem Prozessschritt zusammengefasst und wurden für die Fertigung nicht unterteilt. Beide werden gemeinsam durch den ecoinvent-Datensatz *Chemical factory construction* dargestellt. Die Zusammensetzung und benötigten Mengen der Katalysatoren für das Hydrocracking und das Hydrotreatment wurden auf Basis interner Projektdaten modelliert.

Die Zusammensetzung des Purge-Gases wurde aus den Daten für die FT-Synthese übernommen. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Produktverteilung im gasförmigen Bereich nicht signifikant durch die Produktaufbereitung verändert. Neben dem flüssigen Endprodukt bleibt auch nach dem Hydrocracking noch ein Anteil an festem Endprodukt (FT-Wachs), für welches eine Gutschrift mit dem ecoinvent-Datensatz *Petroleum slack wax production, petroleum refinery operation* anfällt. Es wird davon ausgegangen, dass das Wachs als gleichwertiges Produkt verwendet werden kann. Eine alternative Allokation nach Energiegehalt wird in der Sensitivitätsanalyse betrachtet.

4.2.6 Transport und Bereitstellung

Der flüssige Anteil der Produkte aus der Produktaufbereitung wird als Dieselkraftstoff klassifiziert. Der ecoinvent-Datensatz *Market for diesel* wird für die Abbildung der Nutzung der Kraftstoffinfrastruktur verwendet. Der fossile Kraftstoff des originären Prozesses wird durch den FT-Diesel aus der Produktaufbereitung ersetzt.

4.3 Konventionelle Fischer-Tropsch-Synthese

In Abbildung 3 Abbildung 1 ist das Übersichtsschema der betrachteten konventionellen FT-Diesel-Synthese dargestellt.

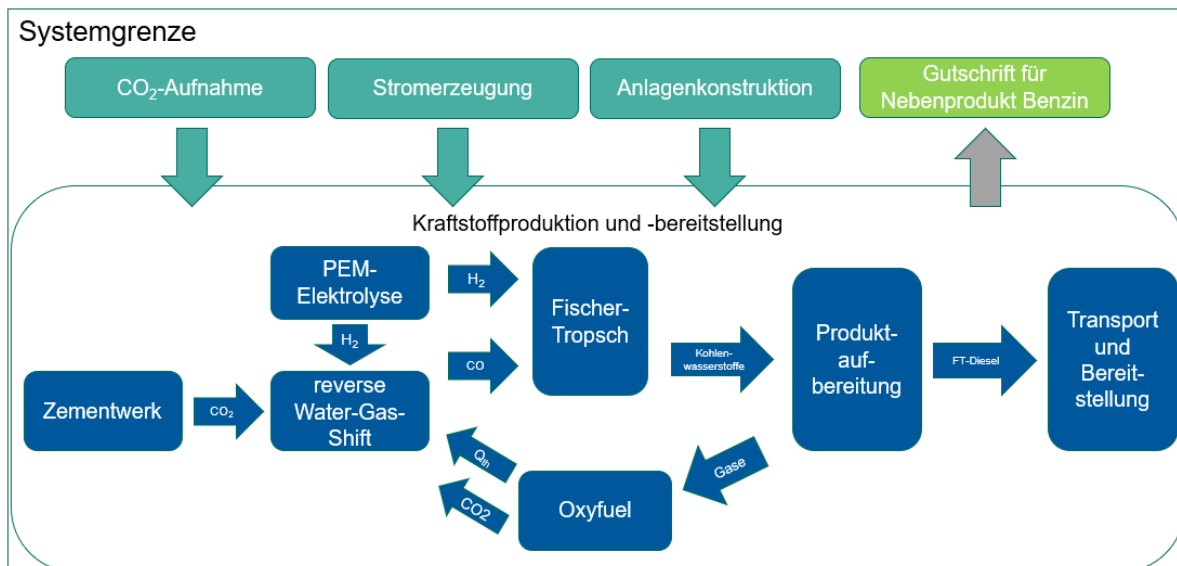


Abbildung 3: Prozess der konventionellen Fischer-Tropsch-Synthese

Der Prozess wurde auf Grundlage einer Aspen Plus-Simulation für die techno-ökonomische Analyse im reFuels-Projekt aus dem Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) modelliert, siehe Abbildung 4.

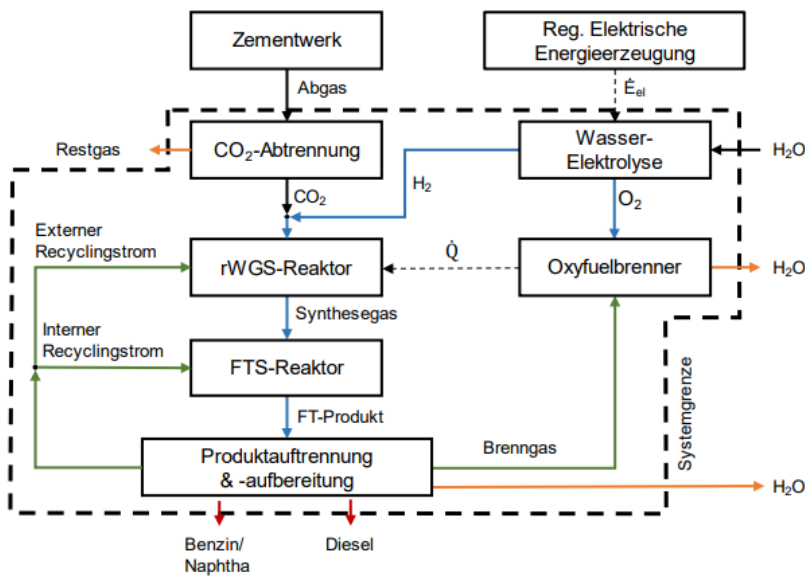


Abbildung 4: Verwendetes Modell für die konventionelle FT-Synthese, IIP

4.3.1 Strombereitstellung

Die in 4.1 beschriebenen Stromquellen werden in verschiedenen Szenarien betrachtet. Die Verfügbarkeit der gesamten Anlage wird hier ebenfalls jeweils mit der Anzahl an Volllaststunden der Stromquelle gleichgesetzt. Bei Verwendung der Strommixe aus dem Netz wird eine Auslastung von 90 % angenommen. In jeweils einem Szenario wird für diesen Prozess ebenfalls die Möglichkeit betrachtet, dass die Anlage trotz volatilen Stroms aus erneuerbaren Quellen mit 90 % Auslastung betrieben werden kann (hierbei wird angenommen, dass der Strom aus erneuerbaren Quellen in ausreichendem Maße gespeichert, bzw. über weitere Quellen bezogen werden kann. Die durch einen entsprechenden Speicher potenziell anfallenden Umweltwirkungen werden im Modell jedoch nicht berücksichtigt).

4.3.2 Zementwerk (CO₂-Quelle)

Die CO₂-Abtrennung aus dem Abgas von Zementwerken erfolgt mit einem chemischen Absorptionsverfahren auf Basis einer wässrigen Aminlösung. Als Absorbens wird Diethanolamin (DEA) verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass dieselbe Masse an DEA / kg CO₂ verbraucht wird wie Monoethanolamin (MEA) im ecoinvent-Datensatz *Carbon dioxide production*. Der Energieverbrauch wurde nach den Werten des Aspen Plus Modells des IIP angepasst, die restlichen Materialflüsse wurden aus dem ecoinvent-Datensatz übernommen.

Das CO₂ aus dem Zementwerk wird trotz fossiler Klassifizierung wie das aus der Atmosphäre entzogene mit einem Charakterisierungsfaktor von - 1 kg CO₂ Äq / kg CO₂ bewertet, da dieses CO₂ durch die Abtrennung aus dem Abgas vorläufig eingespart und nicht emittiert wird. Die Unterscheidung zwischen fossilem und regenerativem CO₂ wird in den Ergebnissen farblich dargestellt. Diese Unterscheidung ist wichtig, da in Summe mehr CO₂ in die Atmosphäre emittiert wird, als wenn das CO₂ vorher aus der Atmosphäre entzogen wird (DAC). Das Zementwerk gilt jedoch als eine industrielle CO₂-Quelle, bei welcher die Emission in nächster Zeit wahrscheinlich nicht vermieden werden kann, da diese größtenteils prozessbedingt und nur zu einem geringen Teil wegen fossiler Energieträger stattfindet.

4.3.3 PEM-Elektrolyse

Als Wasserstoff (H₂)-Quelle wird ein Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyseur eingesetzt. Dieser versorgt den Oxyfuelbrenner mit Sauerstoff (O₂) und die Synthese mit H₂. Die Fertigung wurde wie im Prozess der mikrostrukturierten FT-Synthese durch den ecoinvent-Datensatz *Fuel cell production, polymer electrolyte membrane, 2kW electrical, future*, die Instandhaltung des Elektrolyseurs und der Austausch der Stacks durch den

ecoinvent-Datensatz *Maintenance, polymer electrolyte membrane fuel cell 2kW electrical* mit entsprechender Skalierung abgebildet.

4.3.4 Reverse wasser-Gas-Shift-Reaktor

Der Reverse Wasser-Gas-Shift (rWGS)-Reaktor dient der Reduktion von CO₂ zu CO. Das Verfahren entspricht dem des mikrostrukturierten Prozesses, da hier noch keine großtechnische Umsetzung vorhanden ist. Dementsprechend wurde auch die Bereitstellung des Katalysators wie in 4.2.5 modelliert.

4.3.5 Fischer-Tropsch (FT)-Reaktor

Aufgrund des Fokus auf Mitteldestillat-Produkte und Skalierbarkeit wurde als Verfahren ein Festbettreaktor als Niedertemperatur-FTS-Rohrbündelreaktor mit Co-basiertem Katalysator im Modell gewählt. Der Katalysator und die benötigte Menge / kg Produkt wurden ebenfalls aus dem Modell der mikrostrukturierten FT-Synthese übernommen.

4.3.6 Produktaufbereitung und Gasrecycling

Durch Hydrocracking werden die langkettigen, wachsartigen Kohlenwasserstoffe zu flüssigen Kraftstoffen verarbeitet. Übriges Gas wird in mehrere Schritte des Prozesses geleitet. Ein Teil geht zurück in den FT-Reaktor, ein anderer zurück in den rWGS-Reaktor und der Rest in den Oxyfuelbrenner, welcher den rWGS-Reaktor erwärmt. Zusätzlich fällt Purge-Gas an. Die Fertigung der Anlagen aller Prozessschritte außer der PEM-Elektrolyse werden durch den ecoinvent-Datensatz *Chemical factory construction, organics* dargestellt und auf die Kapazität skaliert.

Neben dem FT-Dieselmotorkraftstoff wird auch Ottokraftstoff erzeugt, für welchen eine Gutschrift verrechnet wird (ecoinvent-Datensatz *Petroleum production*). In der Sensitivitätsanalyse wird auch eine Allokation nach Energiegehalt der Produkte betrachtet.

4.3.7 Transport und Bereitstellung

Der restliche flüssige Anteil der Produkte wird als Dieselmotorkraftstoff klassifiziert. Der Datensatz *Market for diesel* wird für die Nutzung der Kraftstoffinfrastruktur für den Dieselmotorkraftstoff verwendet. Der eingehende fossile Kraftstoff des originären Prozesses wird durch den FT-Diesel aus der Produktaufbereitung ersetzt.

4.4 bioliq-Prozess (DMEtG)

In Abbildung 5 ist das Fließbild des bioliq-Prozesses dargestellt [10]

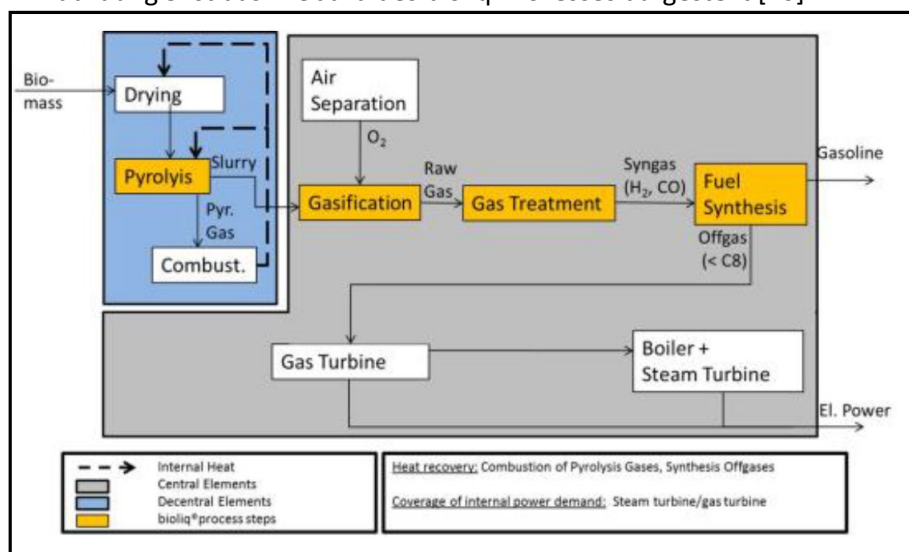


Abbildung 5: Fließbild des bioliq-Prozesses [10]

Die Prozesskette wurde auf Grundlage von Trippe (2013) (Abbildung 6) und unter Verwendung der Modelle und Daten aus Haase und Rösch (2018) und Haase und Rösch (2019) modelliert [10, 11, 21].

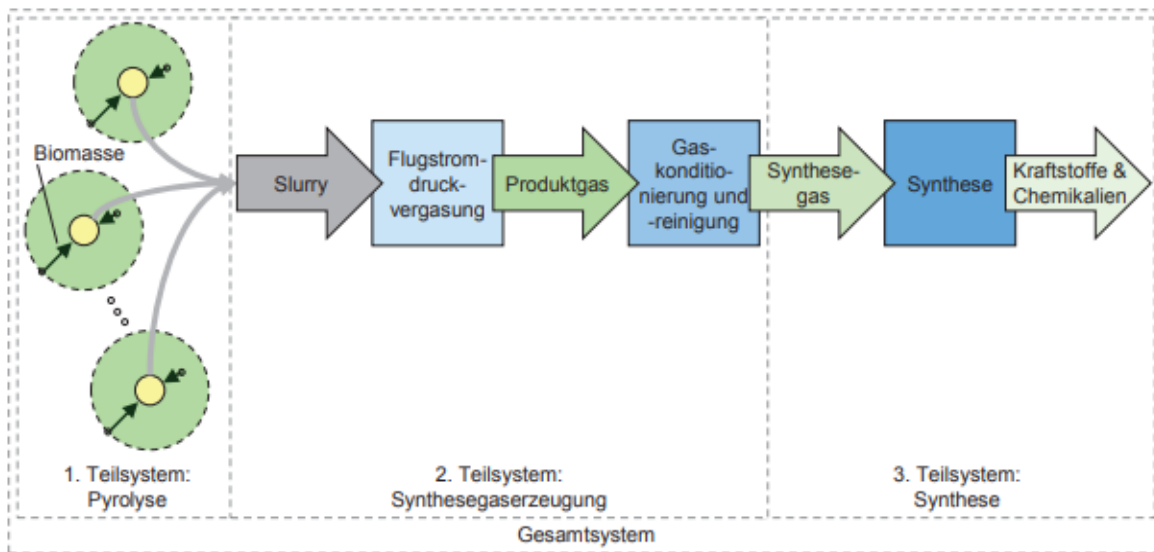


Abbildung 6: Verwendetes Modell aus Trippe (2013)

4.4.1 Strohbereitstellung

Als Biomasse wird Getreidestroh eingesetzt, welches als ungenutzter Rest definiert wird, weshalb der Getreideanbau hier wie in Haase und Rösch (2018) nicht berücksichtigt wird [10]. Das Pressen, das Verladen auf Anhänger und der Transport der Strohballen mit Traktor und Anhänger über 30 km werden mit den ecoinvent-Datensätzen *Baling*, *Bale loading* und *Transport, tractor and trailer, agricultural* berücksichtigt. Alternativ wird in der Sensitivitätsanalyse betrachtet, wie sich die Verwendung des ecoinvent-Datensatzes *Market for straw* für die Bereitstellung des Strohs (mit den verbundenen ökologischen Lasten) auf die Ergebnisse auswirkt. Dieser Datensatz umfasst neben der Ernte und dem Transport auch die Saat, Düngung und Verwendung von Pestiziden.

4.4.2 Lagerung und Konditionierung

Die Infrastruktur zur Lagerung und Konditionierung des Strohs wurde durch die ecoinvent-Datensätze *Building, hall, wood construction* und *Chemical factory construction, organics* modelliert. Zur Konditionierung gehören die Zerkleinerung auf 5-10 cm und die Trocknung von 15 % auf 8 % H₂O. Abwärme aus der Pyrolyse (Verbrennung des Pyrolysegases) und elektrischer Strom aus der Gas- und Dampfturbine (GuD) decken den Wärme- und Strombedarf der Konditionierung.

4.4.3 Pyrolyse

Die Pyrolyse dient der Verflüssigung der eingesetzten Biomasse, wie in Trippe (2013) dargestellt [21]. Für die Pyrolyse im Modell werden Stahlkugeln als Wärmeträger verwendet. Elektrischer Strom wird aus dem GuD-Prozess bereitgestellt, Wärme für die Beheizung des Wärmeträgers stammt aus der Verbrennung des Pyrolysegases. Als Produkt der Pyrolyse entsteht ein sog. Slurry (Biosyncrude). Kühlwasser wird durch den ecoinvent-Datensatz *Market for tap water* bereitgestellt, die Infrastruktur wird durch die ecoinvent-Datensätze *Chemical factory construction, organics* und *Steel production, converter, unalloyed* (Wärmeträger Stahlkugeln) dargestellt.

Die angenommene Zusammensetzung des Pyrolysegases beruhen auf Versuchsdaten des Instituts für Katalysatorforschung und -technologie. Es wird angenommen, dass die Anorganik, die Schwermetalle und N-Verbindungen alle in den Slurry übergehen. Darüber hinaus werden SO₂-Emissionen aus der Pyrolysegasverbrennung



unter Verwendung von Daten zur Pyrolysegaszusammensetzung (H_2S) in Verbindung mit einer angenommenen SO_2 -Emissionsminderung von 92 % einbezogen [11]. Der dort angegebene Wert von 92 % wurde abgeleitet aus Umweltbundesamt, Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU) Merkblatt über beste verfügbare Techniken für Großfeuerungsanlagen (2006). Laut BVT-Dokument des UBA können mittels Sprühabsorption 85-92 % Minderung von SO_2 erzielt werden. Mittels Nasswäsche 92-98 %. Laut BVT-Dokument gilt bei Anlagen kleiner 100 MW das Nasswäschverfahren aufgrund der hohen Kosten nicht als BVT [22].

4.4.4 Vergaser

Zur Bereitstellung von Synthesegas wird der Slurry aus der Pyrolyse vergast. Der Transport des Slurrys über 250 km zur Vergasungsanlage wurde durch die ecoinvent-Datensätze *Transport, freight train, electricity* und *Transport, freight train, diesel* modelliert. Der notwendige Sauerstoff für die Vergasung wird durch den ecoinvent-Datensatz *Air separation, cryogenic* bereitgestellt, welcher mit elektrischem Strom aus dem internen GuD-Prozess versorgt wird. Der Abtransport von anfallender Schlacke über 100 km wird analog zum Slurry-Transport modelliert. Es wird davon ausgegangen, dass die Schlacke anschließend für den Straßenbau verwendet werden kann [10]. Spurenmetalle im Filterstaub wurden abgeschätzt und die anschließende Behandlung von Filterstaub wie in Haase und Rösch (2019) mit dem ecoinvent-Datensatz *Treatment of filter dust from Al electrolysis* modelliert [11]. Die Abschätzung in Haase und Rösch (2019) beruht auf Pudasainee et al. (2014) [18]. Hinzu kommen der Einsatz von Erdgas für die Vergasung, welcher durch den ecoinvent-Datensatz *Market for natural gas, high pressure* modelliert wird und die Infrastruktur, welche durch den ecoinvent-Datensatz *Synthetic gas factory construction* modelliert wurde. Außerdem wird die Abwasseraufbereitung anhand des Datensatzes *Tap water production, conventional treatment* berücksichtigt.

4.4.5 Synthese

Die Synthese erfolgt in zwei Schritten: Dimethylethersynthese (DME) mit anschließender Benzin-Synthese. Die Abwasserbehandlung wird durch den ecoinvent-Datensatz *Wastewater treatment, average* dargestellt, Kühlwasser wird durch den Prozess *Market for tap water* modelliert. Die übrige Infrastruktur wird durch den Prozess *Chemical factory construction, organics* modelliert. Der gasförmige Anteil der Produkte wird in die GuD zur Stromerzeugung geleitet, das flüssige Produkt wird als Ottokraftstoff klassifiziert.

4.4.6 Gas- und Dampfturbine

Der GuD-Prozess wird durch den ecoinvent-Datensatz *Electricity production, natural gas, combined cycle power plant* dargestellt.¹ Wie in Haase und Rösch (2018) und Haase und Rösch (2019) wird unterstellt, dass die Emissionen bei Verbrennung des Brenngases und bei der Verbrennung von Erdgas identisch sind [12, 16]. Lediglich die CO_2 -Emissionen werden bei der Verbrennung des Brenngases als biogen deklariert. Trotz des Hilfsenergiestroms durch Erdgas (siehe Abschnitt 4.4.4) wird das Brenngas als biogen klassifiziert, da dadurch nur ca. 0,1 % des Brenngases fossilen Ursprungs sind. Die GuD versorgt den Prozess mit dem notwendigen Strom und erzeugt darüber hinaus 1,99 kWh / kg produziertes Benzin überschüssigen Strom.

4.4.7 Transport und Bereitstellung

Für die Berücksichtigung der Kraftstoffinfrastruktur für den Ottokraftstoff wird der Datensatz *Market for petrol, low-sulfur* modifiziert: Der fossile Kraftstoff des originären Datensatzes wird durch den Ottokraftstoff aus dem bioliq-Prozess ersetzt.

¹ Der hier verwendete Datensatz basiert auf einem Kraftwerk mit höherer Kapazität als der im Modell benötigten. Dadurch könnten sich Unterschiede in der Effizienz ergeben, welche hier nicht berücksichtigt werden.



5 Ergebnisse

Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf die Bereitstellung des Kraftstoffs, nicht auf die anschließende Nutzung, bzw. Verbrennung. Lediglich bei der Wirkungskategorie Treibhauseffekt wird vorher gebundener Kohlenstoff wieder als anschließend emittiertes CO₂ ausgewiesen. Da es in allen Kategorien sowohl negative als auch positive Werte vorkommen, was mit der in Abschnitt 3.5 erwähnten Systemerweiterung (Gutschrift) und negativen Emissionen zusammenhängt, ist es wichtig das Summensymbol jeweils als ausschlaggebenden Wert zu betrachten

Wie in 4.2.1 und 4.3.1 beschrieben, wird für die Fischer-Tropsch-Prozesse mit Strom aus erneuerbaren Quellen jeweils ein Szenario betrachtet, in welchem die Auslastung der gesamten Anlage abhängig von den Volllaststunden der erneuerbaren Stromquelle ist (stromgebundene Auslastung) und ein Szenario, in welchem der Prozess trotz des volatilen Stroms aus erneuerbaren Quellen zu 90 % ausgelastet wird.

Im Nachfolgenden sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Kraftstoffsyntheserouten inkl. der genannten Randbedingungen dargestellt für die drei vorgestellten Wirkungskategorien Treibhauseffekt (Abbildung 7), Feinstaubbildung (Abbildung 8) und Verknappung fossiler Ressourcen (Abbildung 9).

Bei der mikrostrukturierten und bei der konventionellen FT-Synthese ist der Einfluss der Stromquelle in allen betrachteten Wirkungskategorien deutlich erkennbar. Mit dem Betrieb der Anlage durch Strom aus erneuerbaren Quellen mit einer möglichst hohen Anzahl an Volllaststunden können gegenüber der fossilen Referenz sowohl CO₂-Äquivalente eingespart werden, als auch die Verknappung fossiler Ressourcen verringert werden. Bei der Feinstaubbildung hingegen wird unter den angenommenen Bedingungen kein Vorteil gegenüber der fossilen Referenz erreicht. Es wird deutlich, dass der Betrieb der mikrostrukturierten und konventionellen FT-Synthese aus ökologischen Aspekten nur mit Strom aus erneuerbaren Quellen sinnvoll ist. Zudem spielt deren Anzahl an Volllaststunden eine signifikante Rolle bei den potenziellen Umweltwirkungen.

Der bioliq-Prozess kann in allen drei Wirkungskategorien einen Vorteil gegenüber der fossilen Referenz erreichen, jedoch wird für die Kraftstoffproduktion begrenzt vorhandene Biomasse benötigt [8]. Dieser Aspekt wird in der Diskussion genauer betrachtet. In der Sensitivitätsanalyse wird außerdem ein Szenario betrachtet, in welchem das Stroh nicht ohne Lasten im modellierten System vorliegt.

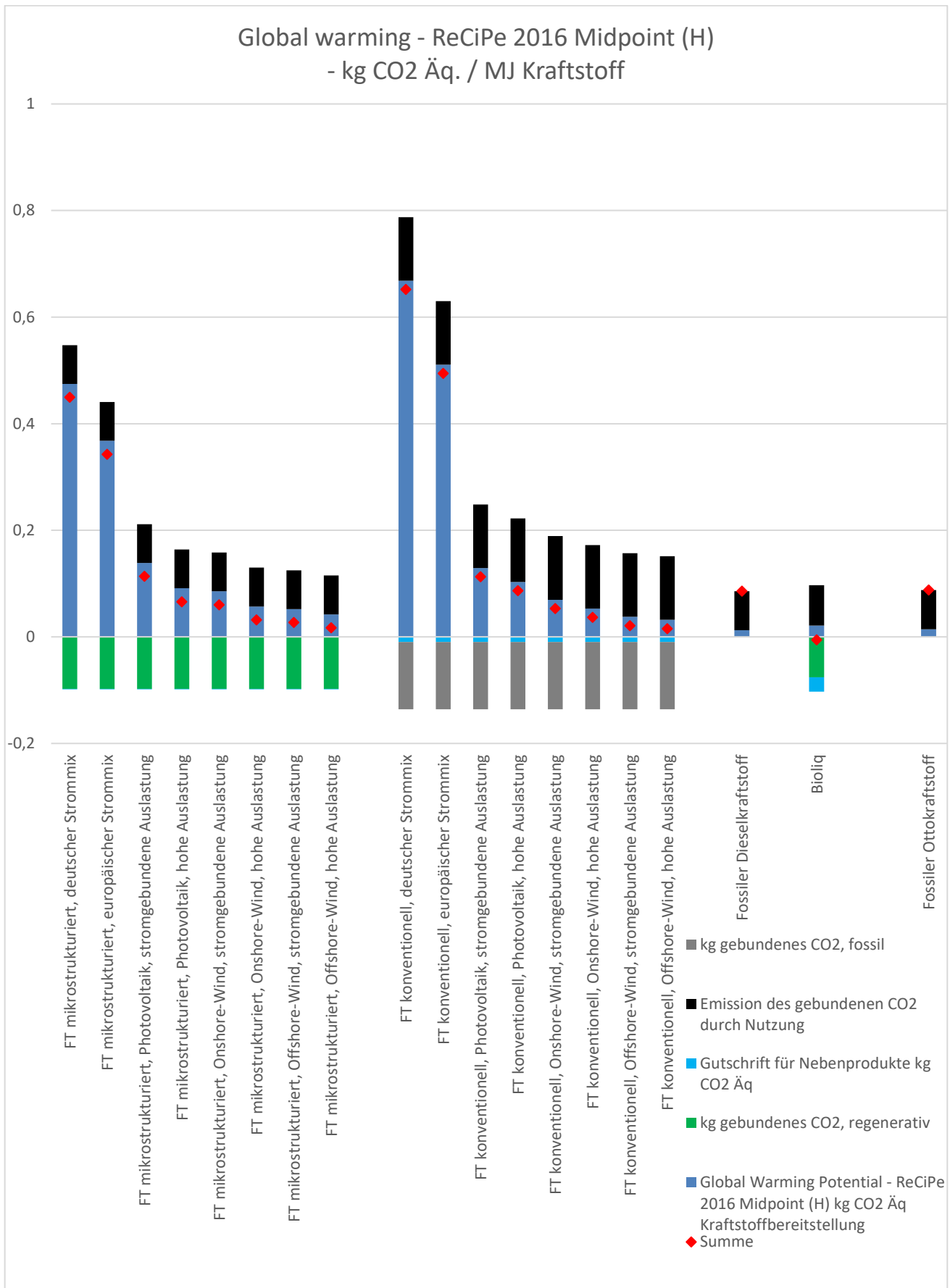


Abbildung 7: Treibhauseffekt von reFuels und fossilen Kraftstoffen in kg CO₂ Äq. / MJ Kraftstoff

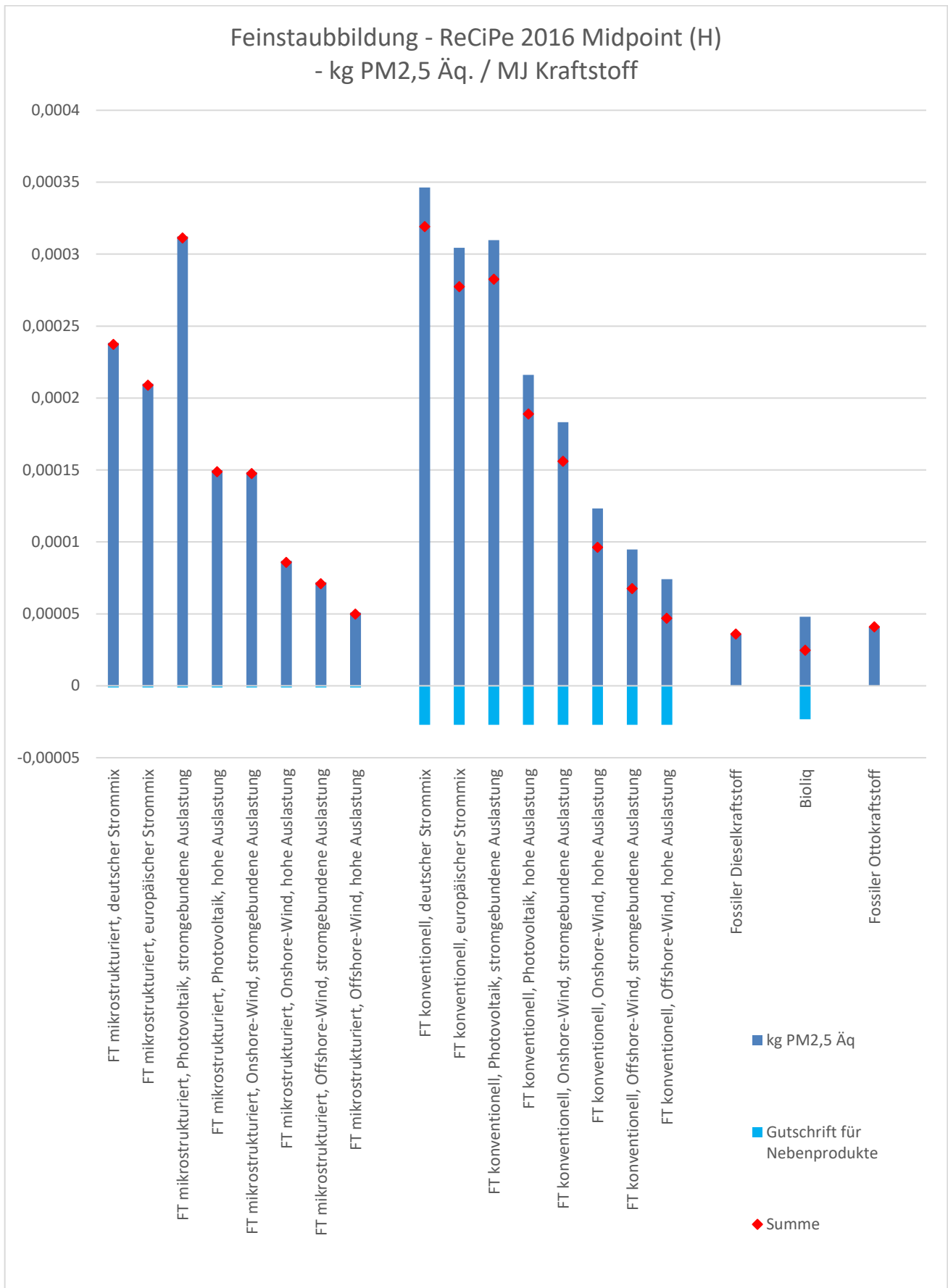


Abbildung 8: Feinstaubbildung von reFuels und fossilen Kraftstoffen in kg PM2,5 Äq. / MJ Kraftstoff

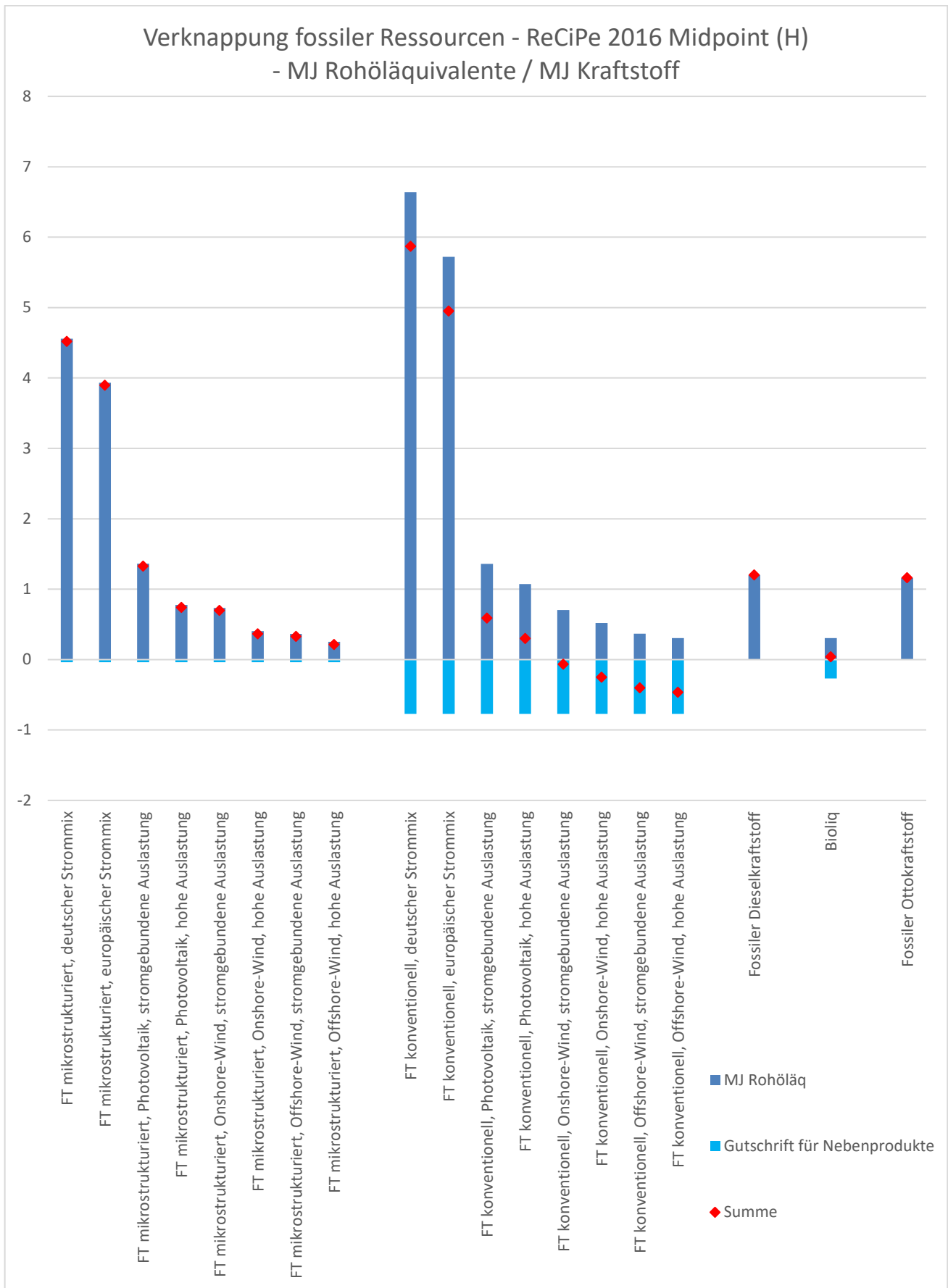


Abbildung 9: Verknappung fos. Ressourcen von reFuels und fossilen Kraftstoffen in MJ Rohöl-Äq. / MJ Krst.



6 Sensitivitätsanalyse

6.1 Allokation und Heizwert

Statt der in Abschnitt 3.5 erläuterten Systemerweiterung wird hier für die Sensitivitätsanalyse auch eine Allokation nach Heizwert durchgeführt.

Für das FT-Wachs aus der mikrostrukturierten FT-Synthese wird davon ausgegangen, dass es einen 5 % geringeren Heizwert als der Kraftstoff hat. Für das Nebenprodukt Benzin aus der konventionellen FT-Synthese wurde das Verhältnis zwischen fossilem Diesel- und Ottokraftstoff als Grundlage für die Allokation verwendet. Der überschüssige Strom aus dem bioliq-Prozess wurde 1:1 anhand seines Energiegehalts in die Allokation übernommen.

Im Nachfolgenden sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Kraftstoffsyntheserouten entsprechend der genannten Allokation dargestellt für die drei vorgestellten Wirkungskategorien Treibhauseffekt (Abbildung 7), Feinstaubbildung (Abbildung 8) und Verknappung fossiler Ressourcen (Abbildung 9).

Durch die Allokation nach den Heizwerten der verschiedenen Produkte fallen die potenziellen Umweltwirkungen des bioliq-Prozesses in allen Kategorien höher aus, was mit den vergleichsweise hohen potenziellen Umweltwirkungen des Strommix zusammenhängt, welche sonst als Gutschrift verrechnet wurden.

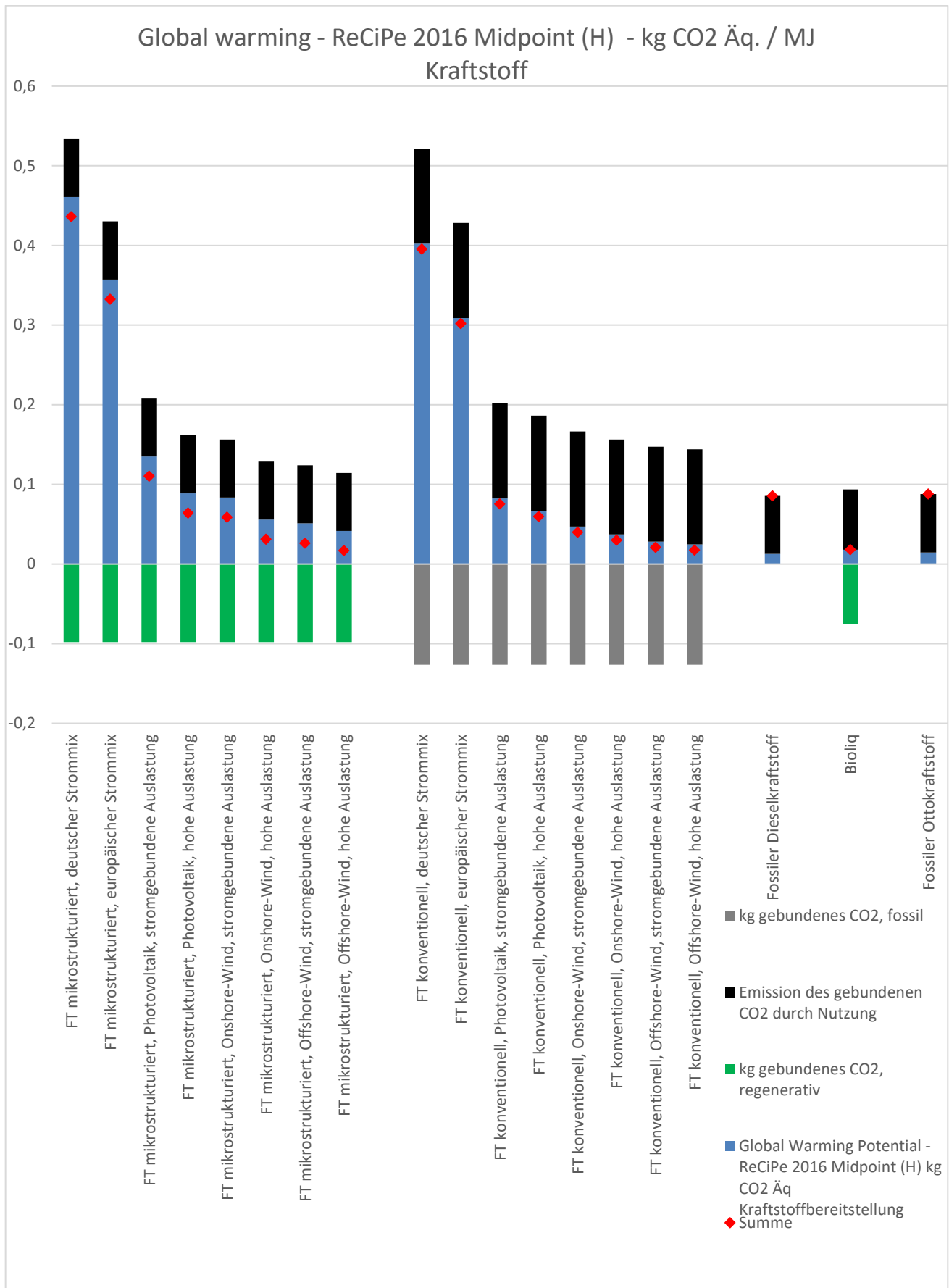


Abbildung 10: Treibhauseffekt bei Allokation nach Heizwert

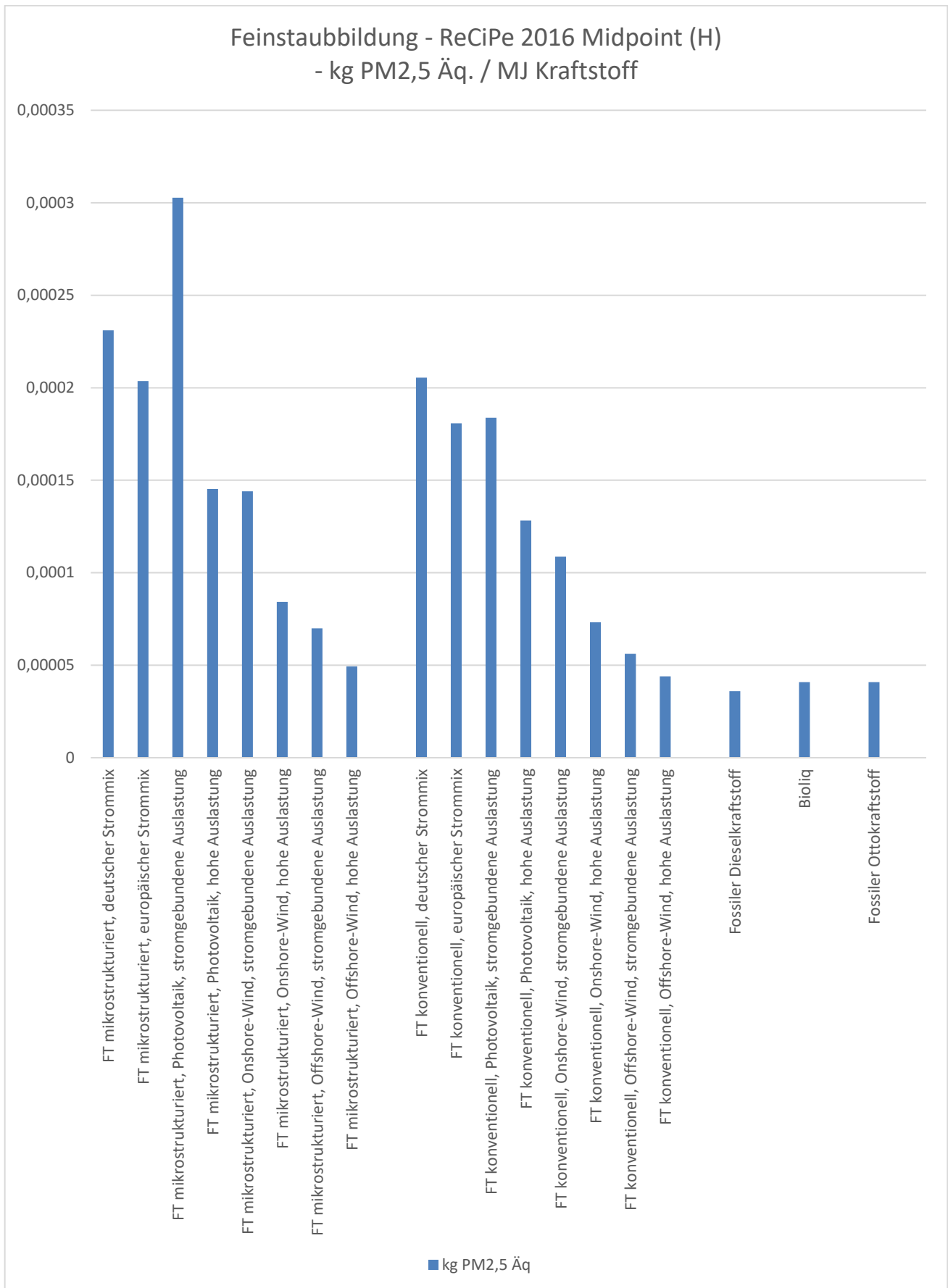


Abbildung 11: Partikelbildung bei Allokation nach Heizwert

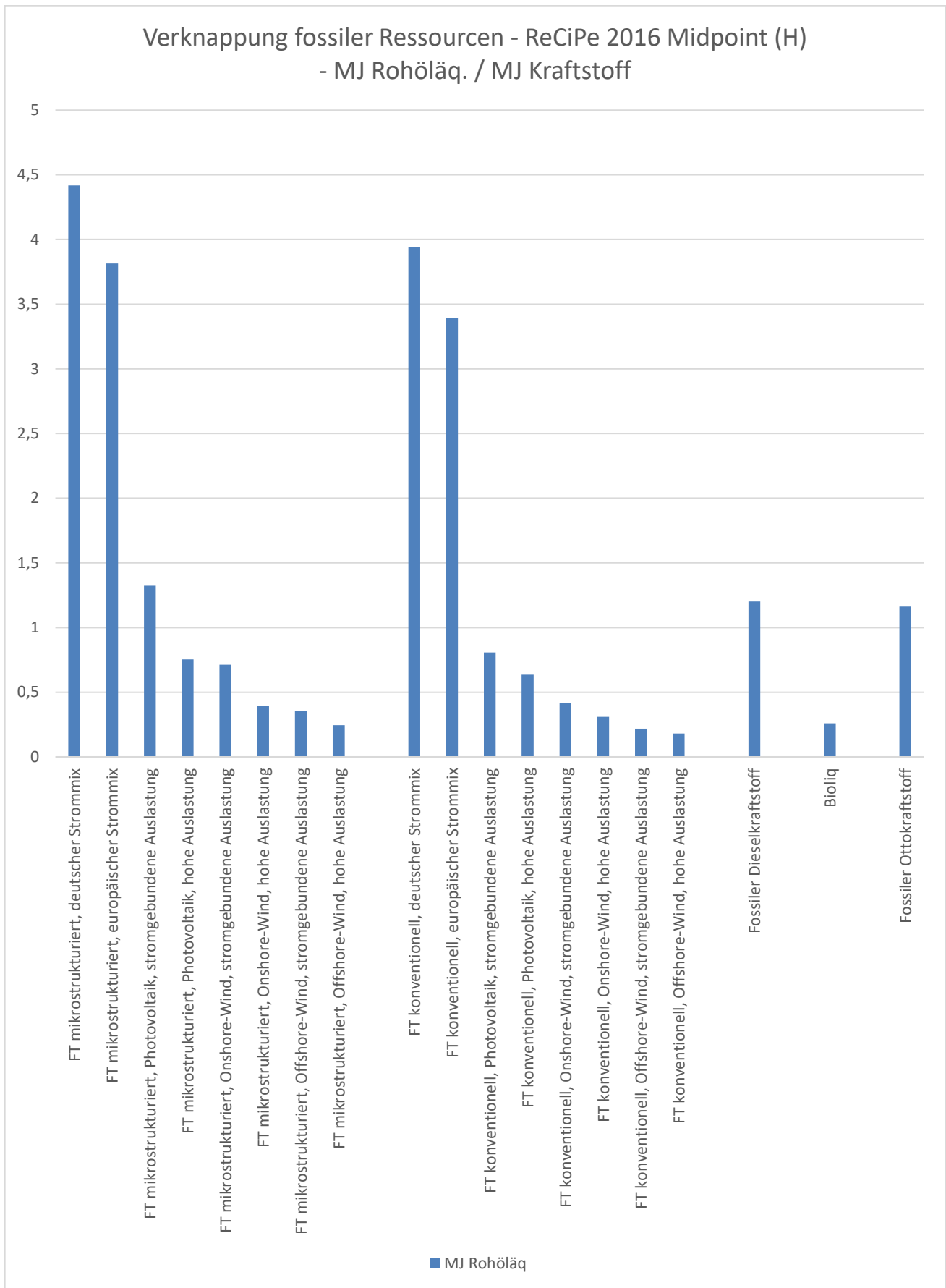


Abbildung 12: Verknappung fossiler Ressourcen bei Allokation nach Heizwert

6.2 bioliq-Modell mit nicht lastenfreier Strohbereitstellung

Die modellierte Strohbereitstellung im ecoinvent-Datensatz beginnt nach der vorangegangenen Ernte und beinhaltet die Aktivitäten Saat, Düngung, Verwendung von Pestiziden, Ernte und Transport. Die Allokation der potenziellen Umweltwirkungen dieser Aktivitäten erfolgt anhand ökonomischer Faktoren, außer für die eingehenden ecoinvent-Datensätze *Transport, tractor and trailer* und *Grain drying* (0 % Allokation auf Stroh) und die Prozesse *Baling* und *Loading bales* (100 % Allokation auf Stroh) [6].

Die Auswirkungen auf den Treibhauseffekt, siehe Abbildung 13, der Kraftstoffproduktion fallen sehr gering aus. Da sich die Ergebnisse in den Wirkungskategorien Feinstaubbildung und Verknappung fossiler Ressourcen in diesem Fall auch kaum unterscheiden, werden diese nicht nochmal abgebildet. Stattdessen wird aufgrund einer hohen Differenz in den Ergebnissen die Wirkungskategorie Landnutzung zusätzlich dargestellt. Als zusätzliche Referenz werden die beiden FT-Prozesse mit PV-Stromerzeugung herangezogen.

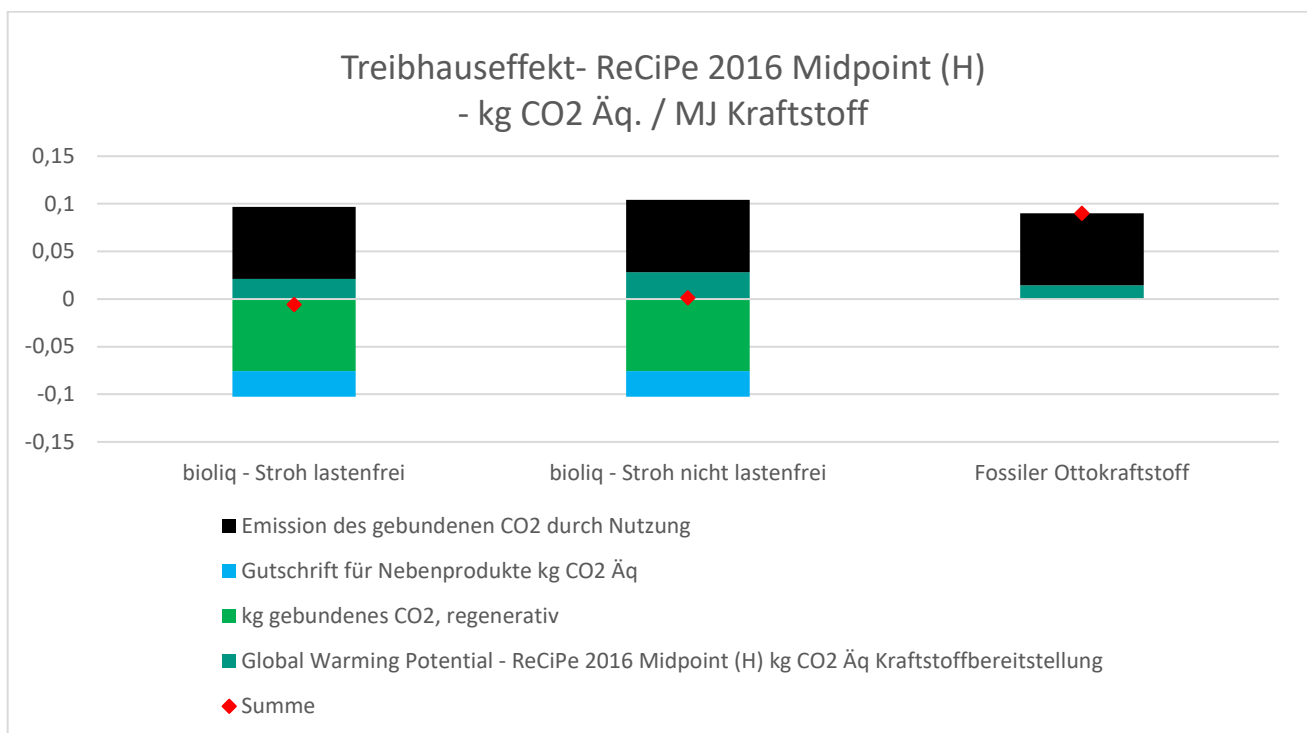


Abbildung 13: Treibhauseffekt von bioliq bei nicht lastenfreier Strohbereitstellung

Während die Lasten der Strohbereitstellung kaum einen Unterschied bei den Treibhausgasemissionen verursachen, wird das Ergebnis in der Wirkungskategorie Landnutzung sehr stark beeinflusst, siehe Abbildung 14. Die Unterscheidung, ob Stroh als Produkt oder als ungenutzter Rest der Landwirtschaft betrachtet wird, ist daher maßgeblich für diese Wirkungskategorie.

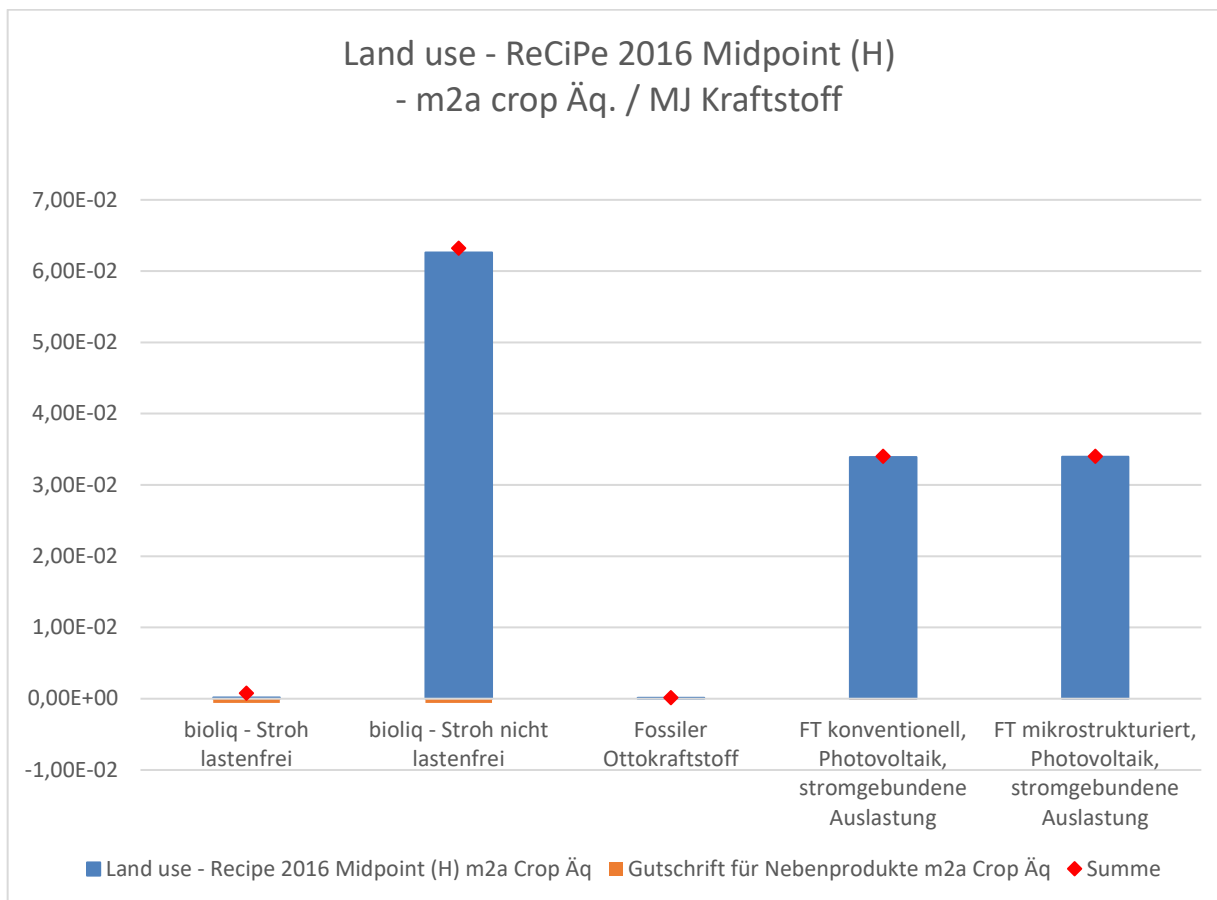


Abbildung 14: Landflächennutzung von bioliq bei nicht lastenfreier Strohbereitstellung

7 Diskussion

Die Modelle des mikrostrukturierten und des konventionellen FT-Prozesses sind aktuell auf theoretisch ausgelegten Prozessen aufgebaut, da sie im betrachteten Maßstab noch nicht großflächig im Einsatz sind. Dadurch sind die Modelle mit hoher Unsicherheit verbunden. Soweit möglich, werden die Prozessdaten im späteren Verlauf des Projekts noch durch Primärdaten ersetzt.

Die Kopplung der Anlagenauslastung an die Volllaststunden der Stromerzeugung für den mikrostrukturierten und den konventionellen FT-Prozess stellt kein optimales Szenario dar. Allerdings wird dadurch deutlich, wie essenziell ein Standort mit hoher Anzahl an Volllaststunden für die Strombereitstellung für den ganzen Prozess ist. Wie in der Sensitivitätsanalyse ersichtlich ist, macht weiterhin die Strombereitstellung selbst trotzdem den größten Anteil der potenziellen Umweltwirkungen aus, auch wenn der Prozess davon unabhängig zu 90 % ausgelastet wäre. Die begrenzte Verfügbarkeit des Stroms aus erneuerbaren Quellen macht darüber hinaus deutlich, dass der synthetische Kraftstoff nicht unbegrenzt verfügbar sein wird und sinnvoll eingesetzt werden sollte. Längerfristig ist der Einsatz vor allem in jenen Bereichen vorgesehen, welche nicht problemlos elektrifiziert werden können, wie zum Beispiel die Luft- und Seeschifffahrt [3].

Ebenso sind Kraftstoffe aus biogenen Quellen nicht unbegrenzt verfügbar. Laut Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2021) werden in Deutschland ca. 15 Mio. t Ottokraftstoff pro Jahr verbraucht [19]. Nach Angaben von Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2015) beläuft sich das ungenutzte technische Strohpotenzial auf ca. 8 Mio. t, das ungenutzte technische Waldrestholzpotenzial auf ca. 12 Mio. t (jeweils Trockensubstanz) [7]. Bei einer überschlägigen Produktion von 0,125 t Kraftstoff je t Biomasse (trocken) ergeben sich ca. 1 Mio. t



bioliq aus Stroh und ca. 1,5 Mio. t bioliq aus Waldrestholz. Das gesamte technische Strohpotenzial und Waldrestholzpotenzial in Deutschland beläuft sich nach Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2015) auf ca. 14 Mio. t und ca. 16 Mio. t. Entsprechend ergeben sich damit ca. 1,8 Mio. t und ca. 2,0 Mio. t bioliq.

8 Literatur

1. Agora Energiewende (2020) Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2020. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/171_A-EW_Jahresauswertung_2019_WEB.pdf. Zugegriffen: 15. April 2020
2. Agora Energiewende; Sandbag (2020) The European Power Sector in 2019. Up-to-date analysis on the electricity transition
3. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020) Die Nationale Wasserstoffstrategie. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile. Zugegriffen: 16. Dezember 2021
4. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020) Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.html>. Zugegriffen: 16. Dezember 2021
5. Deutz, S.; Bardow, A. (2021) Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption. *Nat Energy* 6(2):203–213. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00771-9>
6. ecoinvent (2007) Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. Data v2.0. https://db.ecoinvent.org/reports/15_Agriculture.pdf. Zugegriffen: 16. Dezember 2021
7. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2015) Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen. Status quo in Deutschland. <https://mediathek.fnr.de/band-36-biomassepotenziale-von-rest-und-abfallstoffen.html>. Zugegriffen: 16. Dezember 2021
8. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2021) Kraftstoffverbrauch in Deutschland 2020. <https://mediathek.fnr.de/biokraftstoffe-in-deutschland.html>. Zugegriffen: 16. Dezember 2021
9. Fraunhofer ISE Energy Charts. <https://energy-charts.info>. Zugegriffen: 13. Oktober 2021
10. Haase, M.; Rösch, C. (2018) Life Cycle Assessment of the Thermochemical Conversion of Biomass for the Production of Fuel, Electricity and Heat. *ETA-Florence Renewable Energies*. <https://doi.org/10.5071/26THEUBCE2018-4BV.6.6>
11. Haase, M.; Rösch, C. (2019) Sustainability Assessment of Innovative Energy Technologies - Integrated Biomass-based Production of Fuel, Electricity and Heat. *ETA-Florence Renewable Energies*. <https://doi.org/10.5071/27THEUBCE2019-4AV.1.13>
12. Kirsch, H.; Lochmahr, N.; Staudt, C.; Pfeifer, P.; Dittmeyer, R. (2020) Production of CO₂-neutral liquid fuels by integrating Fischer-Tropsch synthesis and hydrocracking in a single micro-structured reactor: Performance evaluation of different configurations by factorial design experiments. *Chemical Engineering Journal* 393:124553. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124553>
13. Loewert, M.; Hoffmann, J.; Piermartini, P.; Selinsek, M.; Dittmeyer, R.; Pfeifer, P. (2019) Microstructured Fischer-Tropsch Reactor Scale-up and Opportunities for Decentralized Application. *Chem. Eng. Technol.* 42(10):2202–2214. <https://doi.org/10.1002/ceat.201900136>
14. Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (2006) DIN EN ISO 14044. Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006) (14044). Beuth, Berlin
15. Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (2009) DIN EN ISO 14040. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006) (14040). Beuth, Berlin



16. Pastor-Pérez, L.; Shah, M.; Le Saché, E.; Ramirez Reina, T. (2018) Improving Fe/Al₂O₃ Catalysts for the Reverse Water-Gas Shift Reaction: On the Effect of Cs as Activity/Selectivity Promoter. *Catalysts* 8(12):608. <https://doi.org/10.3390/catal8120608>
17. Pfenninger, S.; Staffell, I. (2016) Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. *Energy* 114:1251–1265. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.060>
18. Pudasainee, D.; Paur, H.-R.; Fleck, S.; Seifert, H. (2014) Trace metals emission in syngas from biomass gasification. *Fuel Processing Technology* 120:54–60. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.12.010>
19. Smith, W. A.; Burdyny, T.; Vermaas, D. A.; Geerlings, H. (2019) Pathways to Industrial-Scale Fuel Out of Thin Air from CO₂ Electrolysis. *Joule* 3(8):1822–1834. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.009>
20. Staffell, I.; Pfenninger, S. (2016) Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *Energy* 114:1224–1239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068>
21. Trippe, F. (2013) Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen und Chemikalien. Dissertation. Produktion und Energie, Bd 3. KIT Scientific Publishing, Hannover, Karlsruhe
22. Umweltbundesamt (2006) Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU). Merkblatt über beste verfügbare Techniken für Großfeuerungsanlagen
23. Unruh, D.; Rohde, M.; Schaub, G. (2003) Fischer-Tropsch Synthese von Kohlenwasserstoffen ausgehend von Biomasse – In-situ H₂O-Abscheidung und Verbesserung der Kohlenstoff-Nutzung FVS Fachtagung. Session III: Neue Forschungs- und Entwicklungs-Ansätze für die Kraftstoffherstellung aus erneuerbaren Ressourcen, S 186–199
24. Vázquez, F. V.; Koponen, J.; Ruuskanen, V. et al. (2018) Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: SOLETAIR proof-of-concept and improved process concept. *Journal of CO₂ Utilization* 28:235–246. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.09.026>

9 Anhang

9.1 Annahmen und Sachbilanz zum Modell des bioliq-Prozesses

In den nachfolgenden Tabellen werden die Annahmen und Sachbilanzen der Teilprozesse Pyrolyse (Tabelle 3), Vergasung (Tabelle 4) und Synthese (Tabelle 5) sowie die Gesamtbilanz des elektrischen Stroms (Tabelle 6) des bioliq-Prozesses dargelegt.



Tabelle 3: bioliq-Prozess: Pyrolyse

| Prozessschritt | Pyrolyse | | | |
|------------------------|---|---------------|------------------------|---------------|
| Annahmen | Nutzungsdauer: 20 Jahre Auslastung: 80 % Kapazität: 1.136 MW (gemessen am Energieinput) | | | |
| Masse / Energie | Massenströme in t/h | | Energieströme in MWh/h | |
| Input / Output | Input | Output | Input | Output |
| Stroh (feuchte Masse) | 284 | | | |
| CO ₂ | | | | |
| H ₂ O | 98 | 23 | | |
| Pyrolysegas | | 69 | | |
| Slurry | | 192 | | |
| Schwefeldioxid | | 0,007 | | |
| Elektrischer Strom | | | 12 | |
| Wärme | | | 121 | 155 |

Tabelle 4: bioliq-Prozess: Vergasung (inkl. Gasbehandlung)

| Prozessschritt | Vergasung (inkl. Gasbehandlung) | | | |
|------------------------|---|---------------|------------------------|---------------|
| Annahmen | Nutzungsdauer: 20 Jahre Auslastung: 80 % Kapazität: 1.000 MW (gemessen am Energieinput) | | | |
| Masse / Energie | Massenströme in t/h | | Energieströme in MWh/h | |
| Input / Output | Input | Output | Input | Output |
| Slurry | 192 | | | |
| O ₂ | 105 | | | |
| Syngas | | 144 | | |
| CO ₂ | | 92 | | |
| H ₂ O | | 45 | | |
| Schlacke | | 15 | | |
| Filterstaub | | 0,000017 | | |
| Erdgas | | | 0,55 | |
| Elektrischer Strom | | | 6,9 | |

Tabelle 5: bioliq-Prozess: Synthese (inkl. GuD)

| Prozessschritt | Synthese (inkl. GuD) | | | |
|------------------------|---|---------------|------------------------|---------------|
| Annahmen | Nutzungsdauer: 20 Jahre Auslastung: 80 % Kapazität: ca. 30 t Benzin / h | | | |
| Masse / Energie | Massenströme in t/h | | Energieströme in MWh/h | |
| Input / Output | Input | Output | Input | Output |
| Syngas | 144 | | | |
| CO ₂ | | 59 | | |
| H ₂ O | 7 | 25 | | |
| Brenngas | | | | |
| bioliq-Benzin | | 30 | | |
| Elektrischer Strom | | | 5,6 | 131,5 |
| Wärme | | | | |

Tabelle 6: bioliq-Prozess: Gesamtbilanz des elektrischen Stroms

| Gesamtbilanz bioliq | Elektrischer Strom über alle Prozessschritte |
|---|---|
| Erzeugung (brutto) MW _{el} | 131,5 |
| Bedarf MW _{el} | 71,7 |
| Erzeugung (netto) MW _{el} | 59,81 (Überschuss entspricht 1,99 kWh / kg produziertes Benzin) |

9.2 Annahmen und Sachbilanz zum Modell der mikrostrukturierten FT-Synthese

In den nachfolgenden Tabellen werden die Annahmen und Sachbilanzen der Teilprozesse DAC (Tabelle 7), PEM-Elektrolyse (Tabelle 8) und Zwei-Schritt-Synthese mit CPO und Produktaufbereitung (Tabelle 9Tabelle 5) des mikrostrukturierten FT-Synthese-Prozesses dargelegt.



Tabelle 7: Mikrostrukturierte FT-Synthese: DAC

| Prozessschritt | DAC | | | |
|---------------------------|--|---------------|------------------------|---------------|
| Annahmen | Nutzungsdauer: 20 Jahre Auslastung: abhängig von der Stromquelle / 90 % Kapazität: 1.500 t/a CO ₂ | | | |
| Masse / Energie | Massenströme in kg/h | | Energieströme in kWh/h | |
| Input / Output | Input | Output | Input | Output |
| Luft | ca. 200.000 (0,608 g CO ₂ / kg Luft [19]) | 199.628 | | |
| CO₂ | | 136 | | |
| H₂O | | 236 | | |
| Elektrischer Strom | | | 51,1 | |
| Wärme | | | 238,2 | |

Tabelle 8: Mikrostrukturierte FT-Synthese: PEM-Elektrolyse

| Prozessschritt | PEM-Elektrolyse | | | |
|---------------------------|--|---------------|------------------------|---------------|
| Annahmen | Nutzungsdauer: 30 Jahre mit Wartung und Stack-Austausch Auslastung: abhängig von der Stromquelle / 90 % Kapazität: 1,01 MW | | | |
| Masse / Energie | Massenströme in kg/h | | Energieströme in kWh/h | |
| Input / Output | Input | Output | Input | Output |
| Luft | | | | |
| CO₂ | | | | |
| H₂O | 831,92 | | | |
| O₂ | | 165,41 | | |
| H₂ | | 20,6 | | |
| Elektrischer Strom | | | 1091,83 | |
| Wärme | | | | 195,45 |



Tabelle 9: Mikrostrukturierte FT-Synthese: Zwei-Schritt-Synthese mit CPO und Produktaufbereitung

| Prozessschritt | Zwei-Schritt-Synthese mit CPO und Produktaufbereitung | | | |
|------------------------|--|---------------|------------------------|---------------|
| Annahmen | Nutzungsdauer: 20 Jahre Auslastung: abhängig von der Stromquelle / 90 % Kapazität: 1,01 MW Elektrolyseleistung | | | |
| Masse / Energie | Massenströme in kg/h | | Energieströme in kWh/h | |
| Input / Output | Input | Output | Input | Output |
| CO ₂ | 136 | | | |
| H ₂ O | | 120 | | |
| O ₂ | 11,9 | | | |
| H ₂ | 20,6 | | | |
| FT-Gas | | 15,2 | | |
| FT-Kraftstoff | | 31,6 | | |
| FT-Wachs | | 1,04 | | |
| Elektrischer Strom | | | 12,6 | |
| Wärme | | | | 197,6 |

9.3 Annahmen und Sachbilanz zum Modell der konventionellen FT-Synthese

In den nachfolgenden Tabellen werden die Annahmen und Sachbilanzen der Teilprozesse PEM-Elektrolyse (Tabelle 10), Reverse Wasser-Gas-Shift (Tabelle 11) und FT-Synthese mit Produktaufbereitung (Tabelle 12/Tabelle 9/Tabelle 5) des konventionellen FT-Synthese-Prozesses dargelegt.

Tabelle 10: Konventionelle FT-Synthese: PEM-Elektrolyse

| Prozessschritt | PEM-Elektrolyse | | | |
|------------------------|---|---------------|------------------------|---------------|
| Annahmen | Nutzungsdauer: 30 Jahre mit Wartung und Stack-Austausch Auslastung: abhängig von der Stromquelle / 90 % Kapazität: 525 MW | | | |
| Masse / Energie | Massenströme in t/h | | Energieströme in MWh/h | |
| Input / Output | Input | Output | Input | Output |
| H ₂ O | ≈ 90 | | | |
| O ₂ | | ≈ 80 | | |
| H ₂ | | ≈ 10 | | |
| Elektrischer Strom | | | ≈ 525 | |
| Wärme | | | | ≈ 190 |



Tabelle 11: Konventionelle FT-Synthese: Reverse Wasser-Gas-Shift

| Prozessschritt | Reverse Wasser-Gas-Shift | | | |
|-------------------------------|---|--------|------------------------|--------|
| Annahmen | Nutzungsdauer: 30 Jahre mit Wartung und Stack-Austausch Auslastung: abhängig von der Stromquelle / 90 % Kapazität: ca. 75 t C _x H _y / h | | | |
| Masse / Energie | Massenströme in t/h | | Energieströme in MWh/h | |
| Input / Output | Input | Output | Input | Output |
| CO | ≈ 10 | | | |
| CO ₂ | ≈ 90 | ≈ 25 | | |
| H ₂ O | ≈ 2 | ≈ 27 | | |
| H ₂ | ≈ 10 | | | |
| C _x H _y | ≈ 15 | ≈ 75 | | |
| Elektrischer Strom | | | 7,22 | |
| Wärme | | | ² | |

Tabelle 12: Konventionelle FT-Synthese: FT-Synthese mit Produktaufbereitung

| Prozessschritt | FT-Synthese mit Produktaufbereitung | | | |
|-------------------------------|--|--------|------------------------|--------|
| Annahmen | Nutzungsdauer: 20 Jahre Auslastung: abhängig von der Stromquelle / 90 % Kapazität: ca. 10 t Diesel / h | | | |
| Masse / Energie | Massenströme in t/h | | Energieströme in MWh/h | |
| Input / Output | Input | Output | Input | Output |
| CO | ≈ 83 | ≈ 40 | | |
| CO ₂ | ≈ 87 | ≈ 87 | | |
| H ₂ O | ≈ 27 | ≈ 57 | | |
| H ₂ | ≈ 12 | ≈ 6 | | |
| C _x H _y | ≈ 57 | ≈ 60 | | |
| FT-Diesel | | ≈ 10 | | |
| FT-Benzin | | ≈ 7 | | |
| FT-Gas | | ≈ 2 | | |
| Elektrischer Strom | | | 0,074 | |
| Wärme | | | | |

² Annahme: Der Wärmebedarf kann komplett durch Abwärme aus dem Gesamtprozess gedeckt werden.



Dezember 2021

**Modell- und Datendokumentation zur
Ökobilanz von PKWs mit
verbrennungsmotorischen Antriebssystemen
im Rahmen des Projektes reFuels**

Verfasst durch Olaf Toedter und Philipp Weber

Institut für Kolbenmaschinen (IFKM)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kontakt

Dr.-Ing. Olaf Toedter

Email: olaf.toedter@kit.edu

Tel.: 0721-608 43639

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

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft



Inhalt

| | |
|--|-----------|
| Inhalt | 2 |
| Abbildungsverzeichnis | 3 |
| Tabellenverzeichnis | 3 |
| Abkürzungsverzeichnis | 3 |
| 1 Motivation | 4 |
| 2 Methodik | 4 |
| 3 Ziel und Untersuchungsrahmen | 5 |
| 3.1 Übersicht | 5 |
| 3.2 Funktion und funktionelle Einheit | 6 |
| 3.3 Systemgrenzen | 6 |
| 3.4 Bezugsraum und -zeit | 7 |
| 3.5 Allokation | 7 |
| 3.6 Wirkungsabschätzung | 8 |
| 3.7 Umgang mit den Sachbilanzdaten | 8 |
| 3.7.1 Datenerhebung und -aufbereitung | 8 |
| 3.7.2 Datenqualität, Annahmen und Einschränkungen | 10 |
| 3.8 Kritische Prüfung | 11 |
| 4 Prozessketten | 11 |
| 4.1 Stromsektor | 11 |
| 4.2 Kraftstoffquellen | 12 |
| 4.3 Fahrzeugmodellierung | 13 |
| 5 Ergebnisse und Diskussion | 14 |
| 6 Literatur | 19 |
| 7 Anhang | 21 |



Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Systemgrenzen der modellierten Fahrzeuge | 7 |
| Abbildung 2: Skizzierung der Bestimmung des Heizwert- und Dichte-korrigierten Literverbrauchs..... | 13 |
| Abbildung 3: Bottom-Up-Modellierung des Fahrzeugs (links), Benennungslogik in openLCA (rechts) | 14 |
| Abbildung 4: Ergebnisse für beide Fahrzeuge, aufgeteilt in Herstellung und Nutzung (grob, links) sowie eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Antriebskomponenten (rechts) bei 150.000 km und Referenzkraftstoffen | 15 |
| Abbildung 5: Ergebnisse von ICEV-d und ICEV-g über die zurückgelegte Strecke mit Referenzkraftstoffen.... | 16 |
| Abbildung 6: Ergebnisse des ICEV-d für reFuels-FT-Diesel aus versch. Energiequellen und DAC-CO ₂ | 16 |
| Abbildung 7: Ergebnisse des ICEV-d für reFuels-FT-Diesel aus versch. Energiequellen und Zementwerk-CO ₂ | 17 |
| Abbildung 8: Ergebnisse des ICEV-d für R33 bzw. 100 % des THG-besten reFuels-FT-Diesels | 17 |
| Abbildung 9: Ergebnisse des ICEV-g für Referenzkraftstoff, G40 (10 % Ethanol, 30 % bioliq®)..... | 18 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Ziel dieser Ökobilanz-Studie | 5 |
| Tabelle 2: Untersuchungsrahmen dieser Ökobilanz-Studie | 6 |
| Tabelle 3: Datenquellen der Fahrzeug-Ökobilanz | 8 |
| Tabelle 4: Visualisierung des Detaillierungsgrads / der Qualität der Daten | 10 |
| Tabelle 5: Verwendete Kraftstoffdaten des Mineralölwirtschaftsverbandes (MWW) bzw. Kraftstoffanalysen von reFuels | 12 |
| Tabelle 6: Auszug der KBA-Daten der betrachteten Fahrzeuge | 13 |
| Tabelle 7: Energetische Anteile der Kraftwerkstypen am deutschen Strommix, Prognose 2020 und 2030 [2] | 21 |
| Tabelle 8: Modellierungsannahmen der beiden Fahrzeuge..... | 21 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------------|---|
| B7 | Dieselmotor mit 7 Vol.-% Biodiesel |
| FT | Fischer-Tropsch |
| ICEV-d | Fahrzeug mit Dieselmotor |
| ICEV-g | Fahrzeug mit Ottomotor |
| IFKM | Institut für Kolbenmaschinen |
| IKFT | Institut für Katalysatorforschung und -technologie |
| ITAS | Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse |
| KBA | Kraftfahrtbundesamt |
| KIT | Karlsruher Institut für Technologie |
| LCA | Life Cycle Assessment |
| LCI | Life Cycle Inventory |
| LCIA | Life Cycle Impact Assessment |
| MtG | Methanol-to-Gasoline |
| PKW | Personenkraftwagen |
| PSI | Paul-Scherrer-Institut |
| R33® | Dieselmotor mit 33 Vol.-% erneuerbarem Anteil |
| RME | Rapsmethylester |
| THG | Treibhausgas |



1 Motivation

Im Forschungsprojekt **reFuels – Kraftstoffe neu denken** werden am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gemeinsam mit dem Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, drei weiteren Ministerien und Partnern aus der Automobil-, Automobilzuliefer- und Mineralölindustrie die Herstellung und Nutzung von regenerativen Kraftstoffen, sogenannten reFuels, erforscht. Im Rahmen des Projekts werden die Herstellung und der Einsatz in der bestehenden Fahrzeugflotte, sowie die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit als auch gesellschaftliche Akzeptanz für diese Kraftstoffe analysiert und erprobt. Das Projekt umfasst die gesamte Wertschöpfungskette, vom Energieversorger, der Kraftstoffsynthese, über Lieferanten, Systementwickler bis hin zu Motoren- und Fahrzeugherstellern.

Der Einsatz regenerativ synthetisierter Kraftstoffe wird hinsichtlich seiner ökologischen Wirkung von den Emissionen und weiteren Wirkungen seiner Herstellung und Nutzung bestimmt.

Eine Vorgehensweise, ein möglichst ganzheitliches Bild einer Situation zu erlangen, ist die Methode der Umweltbilanzierung. Sie erfordert eine Betrachtung eines Produktes inklusive seiner Produktion, seiner Nutzung und seines Recyclings. Im Falle der Nutzung regenerativer Kraftstoffe wird hier ein verbrennungsmotorisches Fahrzeug mit seinem Antriebsstrang hinsichtlich Herstellung, Instandhaltung und Nutzung abgebildet. Bei der Nutzung der regenerativen Kraftstoffe werden deren verbrennungsrelevante Eigenschaften wie z. B. Dichte und Heizwert berücksichtigt.

2 Methodik

Ökobilanzen sind Zusammenstellungen und Interpretationen

- der In- und Outputflüsse zwischen Technosphäre und Umwelt sowie
- der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktes oder Produktsystems

entlang seines gesamten Lebensweges.

Damit liefern Ökobilanzen nicht nur über einzelne Produktionsstufen oder Umweltprobleme, sondern über eine Vielzahl an Umwelteffekten von Produkten und Dienstleistungen "von der Wiege bis zur Bahre" umfassende Informationen. Ökobilanzen bilden somit die Basis zur umweltgerechten Produktgestaltung wie für Grundsatzentscheidungen in Energie-, Umwelt- und Technologie-politik und zur Unternehmensstrategie.

Der methodische Ansatz der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/44 umfasst die ganzheitliche Betrachtung von Umweltauswirkungen der gesamten Prozesskette von Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes [24, 25].

Danach besteht eine Ökobilanz aus vier Phasen:

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
2. Sachbilanz (anschaulich: Stoffstrommodell; Energie-, Ressourcen- und Emissionsbilanz)
3. Wirkungsabschätzung (anschaulich: "Zuordnung von Emissionen zu Umweltwirkungen")
4. Auswertung (Ergebnisqualität, Interpretation, Empfehlungen)

Dabei werden zunächst Ziel sowie Untersuchungsrahmen definiert (1). Danach werden in der Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) Input- und Output Flüsse nach Massen- und Energieerhaltungsgesetz für das betrachtete System erhoben (2).



Auf Basis der Sachbilanz findet die Abschätzung der potentiellen Wirkungen auf die Umwelt statt (3). Die abschließende Auswertung reflektiert die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) in Bezug auf das definierte Ziel auf die methodische Konsistenz hin. Diese mündet in Schlussfolgerungen zu relevanten Parametern und Empfehlungen.

Neben der Prüfung auf Vollständigkeit und diverser Sensitivitätsanalysen beinhaltet die LCA-Methodik daher auch eine möglichst transparente Auflistung der Annahmen und Randbedingungen.

Das Ergebnis einer LCA-Studie kann zum Vergleich unterschiedlicher Produkte für eine vergleichbare Aufgabe, aber auch zur ökologischen Verbesserung von Produkten, also als Entwicklungswerkzeug dienen.

3 Ziel und Untersuchungsrahmen

In diesem Kapitel werden Ziel und Untersuchungsrahmen der vorliegenden Studie dokumentiert, beginnend mit einer Übersicht in Abschnitt 3.1. Detailliertere Informationen sind in den folgenden Abschnitten zu finden.

3.1 Übersicht

In Anlehnung an DIN EN ISO 14040/44 wurden für diese Ökobilanz das Ziel und der Untersuchungsrahmen definiert, welche sich entsprechend der beiden nachfolgenden Tabellen aufgliedern lassen. Nach Tabelle 1 besteht das Ziel dieser LCA darin, Personenkraftwagen (PKW) mit konventionellen Antrieben im Hinblick auf ihre Umweltauswirkungen zu untersuchen. Dabei werden sowohl Diesel- als auch Ottomotoren¹ unter Verwendung verschiedener Kraftstoffe inkl. reFuels betrachtet.

Tabelle 1: Ziel dieser Ökobilanz-Studie

| | |
|--|---|
| Anwendung | Umweltechnischer Vergleich von PKW mit diesel- und ottomotorischem Antrieb beim Einsatz unterschiedlicher Kraftstoffe |
| Grund für die Durchführung der Studie | Transparente Studie von unabhängiger Seite, Potentialvergleich verschiedener Antriebssysteme, Sensitivitätsanalysen |
| Zielgruppe | Strategiedialog Automobilwirtschaft, Politik, interessierte Bürger |
| Zur Veröffentlichung bestimmt | Abschlussbericht des Projektes reFuels, Tagungen, Journals |

Neben der Aktualität des Themas ist die Durchführung vor allem darin begründet, dass sich das Projekt mit der detaillierten Abbildung der Prozesse und Effizienzen verschiedener Kraftstoffsynthesemethoden und deren Einsatz auseinandersetzt. Die detaillierte Beschreibung des Antriebsstranges der abgebildeten Fahrzeuge basiert auf einer Vorarbeit in Zusammenarbeit mit dem VDI-Fachbeirat Antrieb und Energiemanagement, der sich aus Vertretern aller relevanten Technologien zusammensetzt, sowohl aus Forschung als auch Industrie, womit der Zugang zu aktuellen Daten, sowie eine Ausgewogenheit und Transparenz ermöglicht wurde. Die dabei zusätzlich betrachteten Batterie- und Brennstoffzellen-elektrischen Antriebe werden im Zuge dieses Berichts nicht behandelt.

In Tabelle 2 sind die einzelnen Elemente des Untersuchungsrahmens aufgelistet.

Als übergeordnetes Produktsystem wurde die Kompaktklasse ausgewählt, da dieses Segment in großen Stückzahlen bedient wird. In diese Kategorie fallen unter anderem VW Golf, 1er BMW sowie das modellierte Referenzfahrzeug, Ford Focus. Aufgrund der von Mitgliedern des VDI-Fachbeirat bereitgestellten Daten wurden im ersten Schritt ein Dieselfahrzeug (ICEV-d) und ein Ottofahrzeug (ICEV-g) betrachtet.

¹ Hierbei werden lediglich flüssige Kraftstoffe betrachtet, also bspw. kein Erdgas.



Die Systemgrenze umfasst aktuell Herstellung und Nutzung des Fahrzeugs inkl. Bereitstellung und Transport der Antriebsenergie. Informationen zu Instandhaltung und Entsorgung liegen nur bedingt vor, was die Implementierung damit auf die etablierten Anwendungsfälle einschränkt (Fahrzeugrecycling und bekannte Wechselintervalle von Produkten). Allokation (Zuordnung von beispielsweise Abfallprodukten und -prozessen) und Abschneidekriterien (Grenzen der Stoffpfade und Zuordnung der Wirkungen zu Produktion, Instandhaltung und Recycling) werden entsprechend der ecoinvent-Datenbank angewendet. Entsprechend der in ecoinvent verwendeten Methodik werden dem Recycling die THG-Emissionen der dazu notwendigen Energie zugeordnet, die bei den Prozessen gewonnenen Rohstoffe aber innerhalb der Produktionsprozesse abgezogen. Die durch Recycling gewonnenen Materialien verursachen damit eine geringere Wirkung in der Produktion, aber eine höhere Wirkung im Recycling. Bei Metallen sind dies etablierte Prozesse mit positiver Gesamtbilanz.

Tabelle 2: Untersuchungsrahmen dieser Ökobilanz-Studie

| | |
|---|--|
| Untersuchte Produktsysteme | Mittelklasse-Pkws der Kompaktklasse mit unterschiedlichen Antriebssträngen. Rein diesel- und ottomotorische Antriebe – hybridisierte Antriebe sind in dieser Studie noch nicht abgebildet. |
| Funktionelle Einheit | Fahrzeugkilometer |
| Systemgrenze | Herstellung und Nutzung des Fahrzeugs inkl. Bereitstellung und Transport der Antriebsenergie |
| Allokation und Abschneidekriterien | Nach ecoinvent v3.5 Cutoff |
| Wirkungskategorien | Treibhauseffekt, eingeschränkt: Feinstaubbildung, Verknappung fossiler Ressourcen |
| Wirkungsabschätzungsmethode | ReCiPe 2016 Midpoint (H) |
| Anforderung an die Daten | Möglichst aktuelle Fahrzeugdaten inkl. Normverbräuchen |
| Annahmen | Instandhaltung und Entsorgung in erstem Schritt vernachlässigbar |
| Einschränkungen | Materialmix des Fahrzeug-Gliders ist gemäß ecoinvent-Datenbank bezogen auf Fahrzeuge aus den Jahren 2000-2010. Aktuellere Daten lagen bei der Erstellung der Studie nicht vor. |
| Anfängliche Anforderungen an die Datenqualität | Aktuelle Hintergrunddatenbank, massenbasierte Erfassung der Antriebskomponenten |
| Art der Prüfung | KIT-intern, Review durch das PSI |

3.2 Funktion und funktionelle Einheit

Die Funktion des untersuchten Systems besteht in der Transportleistung und wird in Fahrzeugkilometer zurückgelegter Strecke erfasst. Da die Aufwendungen in der Produktion und dem Recycling initial anfallen, werden sie km 0 zugeordnet. In der Auswertung werden Fahrleistungen von bis zu 300.000 km betrachtet. Um Vergleiche zu anderen Studien zu ermöglichen, werden die absoluten Ergebnisse zudem pro Fahrzeugkilometer dargestellt.

3.3 Systemgrenzen

Das System des Fahrzeuges umfasst die Phasen der Herstellung, der Nutzung und des Lebensendes. Bei der Herstellung werden die Materialien und Fertigungsverfahren gemäß den Werten der Datenbank ecoinvent v3.5 hinterlegt inkl. deren Systemgrenzen.

Bei der Nutzung werden die Systemgrenzen durch die Systemgrenzen der verwendeten Kraftstoffe und durch die Emissionen bei der Nutzung definiert.

Bei der Lebensende-Phase des Fahrzeugs wird je nach Material zwischen Entsorgung und Recycling unterschieden. In beiden Fällen werden die in ecoinvent v3.5 hinterlegten Prozesse genutzt inkl. der dort hinterlegten Cutoff-Bedingungen.

In Abbildung 1 ist dargestellt, wie das Fahrzeug modelliert wurde und ob die dafür verwendeten Daten der ecoinvent-Datenbank (rot) entnommen oder selbst modelliert (grün) wurden. Für die Biokraftstoffe wurden Daten aus dem BioEnergieDat-Projekt (grau) sowie Ergebnisse aus der Kraftstoff-LCA des reFuels-Projekt verwendet, das Recycling (schraffiert) konnte nur teilweise abgebildet werden.

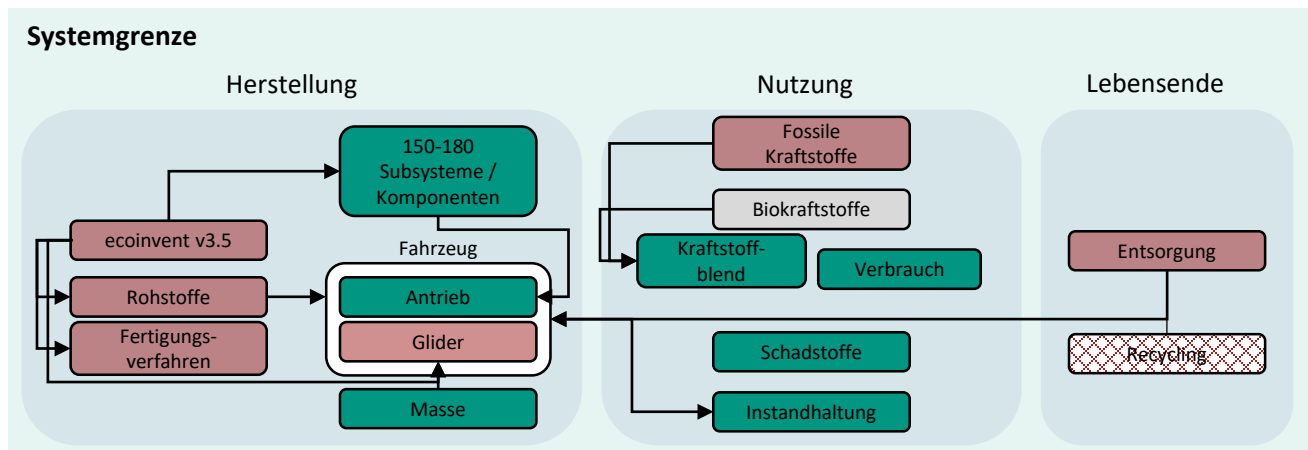


Abbildung 1: Systemgrenzen der modellierten Fahrzeuge

3.4 Bezugsraum und -zeit

Für die Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge wurden in den meisten Fällen keine Länder-spezifischen, sondern sogenannte globale Marktprozesse verwendet. In der ecoinvent-Datenbank werden diese üblicherweise mit dem Zusatz „GLO“ gekennzeichnet. Dementsprechend wurde im ersten Schritt eine globale Fertigung der Fahrzeuge angenommen. Je nach (Teil-)Prozess und ecoinvent-Version werden dazu unterschiedlich aktuelle Veröffentlichungen und Expertenmeinungen herangezogen. Für die Abbildung eines konkreten Fahrzeugs müsste diese Vorgehensweise durch detaillierte Standort-abhängige Informationen (Energienmix, Effizienz) ergänzt werden.

Für die Nutzungsphase wurden anfänglich die unveränderten Prozesse zur Bereitstellung fossiler Kraftstoffe verwendet. Die für Raffinerie und Tankstelle benötigten Elektrizitäts-Prozesse werden dabei durch aktuellere Daten des deutschen Strommixes aktualisiert. Derzeit wird bei einer Fahrzeug-Lebensdauer von 12 Jahren angenommen, dass sich der Strommix in den Jahren 2018 bis 2030 entsprechend des deutschen Ausbaus erneuerbarer Energien verbessert. Im ersten Schritt wurde hierbei ein linearer Zusammenhang bezogen auf den Zielwert 2030 [2] implementiert.

In Bezug auf Masse und Kraftstoffverbrauch werden typische, im Jahr 2021 erhältliche Fahrzeuge abgebildet. Dies schließt Emissionswerte entsprechend dem Standard Euro 6d-TEMP ein.

3.5 Allokation

Allokationen in Datensätzen erfolgen entsprechend der verwendeten ecoinvent-Datensätze. Für die selbst modellierten Prozesse wurden keine Allokationen durchgeführt.



3.6 Wirkungsabschätzung

Die Auswahl der Wirkungskategorien und Durchführung der Wirkungsabschätzung orientieren sich an aktuellen und umfassenden Ökobilanzen zu alternativen Kraftstoffen. Berücksichtigt werden damit sowohl die Relevanz von Umweltproblemen als auch Limitierungen der Datenverfügbarkeit und die methodischen Möglichkeiten einer belastbaren Bewertung von Sachbilanzdaten. Erfasst werden die Wirkungskategorien

- Treibhauseffekt, betrachtet über 100 Jahre (GWP100)
- (Feinstaubbildung)
- (Verknappung fossiler Ressourcen)

Die Wirkungsabschätzung in den genannten Kategorien erfolgt gemäß *ReCiPe 2016 Midpoint (H)*. Es ist anzumerken, dass diese Wirkungsabschätzungsmethoden händisch erweitert wurden, um zuvor nicht enthaltene Flüsse zu berücksichtigen. Das schließt unter anderem die Aufnahme von Luft-CO₂ durch die Pflanze sowie den Ausstoß von CO₂ biogenen Ursprungs ein. Neben biogenen CO₂-Quellen umfasst dies CO₂, welches durch Verbrennung biogener Kraftstoffe ausgestoßen wird. Es konnte noch nicht geklärt werden, weshalb diese zuvor nicht enthalten waren. Die angepasste Version wurde deshalb im Namen um ein „(IFKM)“ ergänzt.

Bei den Kategorien Feinstaubbildung (*fine particulate formation*) und Verknappung fossiler Ressourcen (*fossil resource scarcity*) konnten noch nicht alle notwendigen Flüsse angepasst werden, sodass diese Ergebnisse nur eingeschränkt gültig sind. Aus diesem Grund werden sie in diesem Bericht nicht besprochen, sondern sind lediglich in dem angehängten Excel-Sheet zu finden.

Es handelt sich bei dem Bericht um einen Zwischenstand. Sowohl Fahrzeug- als auch Kraftstoffsynthese-LCA werden weiter fortgeführt. Bei beiden Systemen ist ein Update auf die Hintergrunddaten ecoinvent v3.7.1 und die dort implementierten Wirkungsabschätzungsmethoden geplant. Eine Normierung der Ergebnisse findet nicht statt. Die Indikatorwerte werden mit denen fossiler Kraftstoffe verglichen.

3.7 Umgang mit den Sachbilanzdaten

3.7.1 Datenerhebung und -aufbereitung

In Tabelle 3 ist ein Überblick der verschiedenen Datenquellen für die Fahrzeugmodellierung gegeben. Hierbei wurde eine möglichst detaillierte Beschreibung der Antriebe angestrebt.

Tabelle 3: Datenquellen der Fahrzeug-Ökobilanz

| | Hersteller (direkt) | Hersteller (Broschüre) | Datenbank | Eigene Annahme / Recherche |
|--|--|------------------------------|---|---|
| Fahrzeug | - | Gesamtmasse, Verbrauch, etc. | - | - |
| Glider | - | - | ecoinvent v3.5 | - |
| Verbrennungsmotorischer Antrieb | Daten von Ford (Auszug aus Fahrzeugstückliste; Motor, Kupplung, Kabelbaum) | - | Ersatzteildatenbank von Ford ² , KBA | Zuordnung von Materialien zu Komponenten, IFKM-eigene Recherchen; IFKM-Bachelorarbeit zu SCR-Systemen |
| Energiedaten | - | - | Struktur aus ecoinvent v3.5, BioEnergieDat | Strommix 2018, 2020, 2030 (DE, EU, CN) ³ |
| Elementarflüsse | - | - | ecoinvent v3.5 | Zuordnung von Materialien |

² www.7zap.com

³ Nur teilweise für die in diesem Bericht behandelten Antriebe relevant



Die Ausgangsbasis bilden die über den VDI-Fachbeirat bereitgestellten Stücklisten zu je einem Diesel- und Ottomotor der Marke Ford (**vertraulich**). In Excel-Listen sind die Massen der Subsysteme und Komponenten des jeweiligen Motors aufgeführt. Informationen über die verwendeten Materialien sowie Fertigungsverfahren sind nicht gegeben. Die Aufbereitung der Daten umfasst u. a. folgende Aufgaben:

- Zuordnung der Hersteller-spezifischen Abkürzungen zu konkreten Bauteilen, bspw. mittels eines „Lexikons“ [9] sowie Internetrecherche (bspw. Ersatzteildatenbanken²)
- Einordnung in Untergruppen, bspw. Ansaugtrakt oder Abgassystem
- Überprüfung auf Vollständigkeit
- Ergänzung fehlender Komponenten, wie bspw. Getriebe
- Vergabe von Namen nach der in Abbildung 3 dargestellten Logik (s. Abschnitt 4.3a)
- Recherche und Zuordnung möglicher Materialien und Fertigungsverfahren

Neben den direkt vom Hersteller bereitgestellten Daten wurden weitere Quellen bemüht. Diese umfassen öffentlich verfügbare Hersteller-Broschüren [10, 11] zu passenden Mittelklasse-Fahrzeugen sowie Daten aus dem Online-Konfigurator [12–14]. Daraus lassen sich Informationen zu Motorisierung, Getriebe, Kraftstoffverbrauch, Tankinhalt sowie Leergewicht beziehen. Detailliertere Informationen zu den verbauten Technologiebausteinen konnten Tagungsveröffentlichungen entnommen werden [31]. Daten zu weiteren Teilsystemen wurden aus Abschlussarbeiten entnommen, wie bspw. bei Abgasnachbehandlungskomponenten [6, 27].

Die Auswahl von Werkstoffen und Materialien erfolgte anhand verschiedener Fachartikel, bspw. zu den Themen Gleitlager [1], Zylinderköpfe [16], Pleuelstangen [18] und Kolben [19]. Weitere Informationen hierzu konnten Fach- und Lehrbüchern entnommen werden [17, 20–22, 30]. Darüber hinaus wurde eine Veröffentlichung des Umweltbundesamts zur Rückgewinnung kritischer Metalle verwendet, bspw. für die Materialzusammensetzung des Anlassers und der Lichtmaschine [29]. Über Veröffentlichungen des Kraftfahrtbundesamts (KBA)⁴ wurden Informationen zu den Schadstoff-Typprüfwerten gewonnen.

Durch die Fokussierung auf die Antriebsmodellierung konnte bisher noch keine detaillierte Betrachtung des Gliders vorgenommen werden. Daher wurde zunächst der in ecoinvent v3.5 vorhandene globale PKW-Glider-Prozess (*market for glider, passenger car | glider, passenger car | Cutoff, U*) herangezogen. Die Masse wurde über das Leergewicht des Fahrzeugs und die Masse des Antriebs abgeschätzt.

Ab einem gewissen Detaillierungsgrad führen alle modellierten Prozesse auf ecoinvent-Datensätze, wie bspw. auch die fossilen Kraftstoffe. Darüber hinaus vor Fertigstellung der reFuels-Kraftstoffmodelle bereits erneuerbare Kraftstoffe aus dem BioEnergieDat-Projekt entnommen [26]. Darüber hinaus wurde eine Aktualisierung der Stromdaten vorgenommen, da die in ecoinvent v3.5 implementierten Daten zum Teil bis zum Jahr 2012 zurückgehen und einen noch zu geringen Anteil erneuerbarer Energien (EE) enthalten. Für die Länder/Regionen Deutschland (DE), Europa (EU) und China (CN) wurden daher aktuellere Daten recherchiert. Diese umfassen bereits vergangene Jahre [4] sowie Szenarien [3, 5, 8, 15]. In einem ersten Modellierungsschritt wurden deutsche Strommixdaten von 2018 auf das deutsche 65%-EE-Stromsektor-Ziel für 2030 linear interpoliert. In der Herstellung der fossilen Kraftstoffe ist dies bereits berücksichtigt, führt aber nur zu einer kleinen Verbesserung der THG-Emissionen. Besonders relevant werden diese Daten vor allem bei den alternativen Antriebsarten, die hier, wie bereits beschrieben, nicht betrachtet werden sollen.

⁴ Siehe https://www.kba.de/DE/Typgenehmigung/Fahrzeugtypdaten_amlDaten_TGV/Auskuenfte_Informationen/Veroeffentlichungen/SV2.html

3.7.2 Datenqualität, Annahmen und Einschränkungen

Der vorige Abschnitt verdeutlicht die Komplexität und Vielzahl der Eingangsgrößen einer Fahrzeug-LCA. Durch die stellenweise schwierige Datenlage bei hoher gewünschter Detaillierung müssen zwangsweise verschiedene Quellen herangezogen werden.

Dadurch werden gewisse Vereinfachungen getroffen und die Konsistenz der Daten teilweise eingeschränkt. Dieses Vorgehen stellt allerdings weder den ganzheitlichen Anspruch in Frage noch schränkt es die Aussagefähigkeit der Ergebnisse ein, wenn die Modelle entsprechend dokumentiert, begründet und hinsichtlich ihrer Effekte auf die Ergebnisse bewertet wird sowie in Übereinstimmung mit dem Erkenntnisinteresse der jeweiligen Studie erfolgt. Dabei soll auch insbesondere der iterative Charakter einer LCA hervorgehoben werden.

Es ist zu berücksichtigen, dass die ecoinvent-Datenbank v3.5 strukturell nicht die aktuellsten Material-Mixe enthalten kann. Der angesprochene Glider-Datensatz kann dadurch Weiterentwicklungen, wie verbesserte Fertigungstechniken, aber auch energie-intensivere Leichtbaumaterialien oder die zunehmende Anzahl von elektronischen Steuergeräten nur bedingt wiedergeben.

In Ergänzung zur vorigen Übersicht der Datenquellen zeigt Tabelle 4 auf, dass in einigen Kategorien nur bedingt (Energienmix, Materialmix und Verbrauch) bzw. gar keine Daten (Entsorgung, Instandhaltung) vorliegen. Mit Blick auf die Gesamtmenge der CO₂-Äquivalente spielen diese Elemente eine untergeordnete Rolle, wenn ein Schaden und Austausch der höher belasteten Komponenten (Motorblock, Batterie, etc.) ausgeschlossen wird.

Tabelle 4: Visualisierung des Detaillierungsgrads / der Qualität der Daten

| Lebenswegphase | Energienmix | Masse | Kraftstoffverbrauch | Material / Fertigung |
|----------------|---|--|----------------------|--------------------------------------|
| Herstellung | Zeitliche und räumliche Mittelung versch. Länder (DE, EU, CN) | Masse Glider + Antriebskomponenten | | Teilweise aktualisierter Materialmix |
| Nutzung | s. o., basierend auf ecoinvent v3.5 | s. o. | Normverbrauch (WLTC) | |
| Entsorgung | Keine Daten | Metalle in ecoinvent enthalten ⁵ | | Metalle in ecoinvent enthalten |
| Instandhaltung | Keine Daten | Nur bei bekannten Verschleißkomponenten ⁶ | | Keine Daten |

Der aktuelle Use-Case basiert auf dem Betrieb im WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure), welcher den Prüfzyklus WLTC (Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle) enthält. Dadurch soll ein mittlerer Verbrauch inkl. der zugehörigen CO₂-Äquivalente abgebildet werden. Die Betrachtung realistischer Einzel-Use-Cases wird in diesem Bericht nicht besprochen.

Systemzusammenhänge und -Abhängigkeiten (z. B. bei der Masse) sind in der aktuellen Version der verwendeten LCA-Software (openLCA 1.10.2) nicht automatisiert abgebildet. So werden dichtebedingte Effekte unterschiedlicher Kraftstoffe auf das Fahrzeuggewicht und damit auf den Verbrauch wegen zu geringer Effekte nicht berücksichtigt, wohl aber die Dichte in Kombination mit dem Heizwert in der Berechnung des volumetrischen Kraftstoff-Verbrauchs und der damit verbundenen CO₂- und Schadstoffemissionen.

Alle betrachteten Kraftstoff-Blends liegen in bestehenden Kraftstoffnormen (EN 228, EN 590, EN 15940).

⁵ Hierbei wird lediglich der Entsorgungs- bzw. Recycling-Anteil der verwendeten Materialien berücksichtigt, allerdings nicht die Recycling-Prozesse kompletter Bauteile.

⁶ Dies umfasst bspw. den Austausch von Reifen oder Bremsen.



Neben den o. g. Einschränkungen werden weitere Themenfelder nicht berücksichtigt, da keine konkreten Informationen vorlagen, oder der Aufwand für das präsentierte Arbeitspapier noch nicht umsetzbar war:

- **Infrastrukturaufwendungen:** Eine zusätzliche Infrastruktur zur regenerativen Synthese von Kraftstoffen (die nach RED II zusätzliche Energiequellen erfordern), inkl. des dafür benötigten Wasserstoffs sowie erneuerbaren Stroms wurde nicht betrachtet. Ein oft nicht beschriebener Aspekt ist hier der Umgang der einzelnen Techniken mit der Fluktuation des regenerativ gewonnenen Stromes. Je nach Technologie müssen lokale oder zentrale Speicher installiert werden, deren Produktion sich bei der Anwendung der Technologien bemerkbar macht.
- **Abweichungen des Realverbrauchs vom WLTC-Verbrauch:** Die größten Einflussfaktoren sind der Fahrer sowie die Umstände, unter denen das Fahrzeug betrieben wird, beispielsweise beim Betrieb in kalten Umgebungsbedingungen, die immer zu einem Mehrverbrauch führen. Bei der Verwendung von Zyklen werden Use-Case-spezifische Auswirkungen auf die Effizienzkennfelder der Antriebsstrangkonzeppte überdeckt, wodurch die Realitätsnähe eingeschränkt wird. Dieser Aspekt ist Teil der gegenwärtigen Forschung [28].

Es ist anzumerken, dass die Studie nicht nur auf die Umweltwirkungskategorie Klimawandel und damit auf die Bilanzierung von Treibhausgasen beschränkt ist. Für eine vollumfängliche Ökobilanzierung sind auch Rohstoffbedarf, Wasserverbrauch, Versauerung, Humantoxizität und Sommersmog von relevanter Bedeutung.

Da die Gewichtung dieser Wirkungskategorien zueinander nicht festgelegt werden kann, werden die unterschiedlichen Bilanzen in Form von normierten Netzdiagrammen verglichen.

Nicht Bestandteil der Betrachtungen sind hybridisierte Fahrzeugantriebe. Damit sind weder sogenannte Vollhybride noch Plug-In-Hybride in dieser Studie abgebildet. Derartige Fahrzeugkonzepte sollen Inhalt der zukünftigen Weiterführung dieser Betrachtungen sein.

3.8 Kritische Prüfung

Der Bericht wird durch das Paul-Scherrer-Institut (PSI) einer kritischen Prüfung in Anlehnung an die DIN/EN/ISO-Normen 14040/44 unterzogen. Das Gutachten bestätigt die Norm-Konformität, fachliche Güte und Ergebnisplausibilität der Studie.

4 Prozessketten

4.1 Stromsektor

Einen wesentlichen Anteil an den emittierten CO₂-Äquivalenten hat die jeweilige Energieversorgung der Fahrzeuge in der Produktion als auch im Betrieb.

Zur Abbildung der lokal und pro Bezugsjahr unterschiedlichen Effekte des Stromnetzes müssen eine Vielzahl von Effekten und der jeweilig lokale Netto-Strommix, aber die Brutto-Umwandlungsverluste berücksichtigt werden.

Derartige Zusammenhänge sind für den deutschsprachigen Raum in der ecoinvent-Datenbank hinterlegt, basieren aber auf Stromdaten frühestens aus dem Jahr 2018, für einige Regionen sogar 2010. Für Deutschland hat Agora Energiewende in einer Studie [2] einen Strommix 2030 definiert, siehe auch *Tabelle 7* im Anhang. Der Zielwert von 65% Erneuerbaren Energien im Stromsektor 2030 entspricht der Vorgabe der aktuellen Vorgabe der Bundesregierung und wurde in dieser Studie verwendet. Für den schrittweisen jahresaufgelösten Umbau des Energieversorgungssystems wurde die Abschaltung der Kernkraftwerke innerhalb der Stützstellen von Agora Energiewende berücksichtigt.



4.2 Kraftstoffquellen

Die in der Studie verwendeten Kraftstoffe werden mit Bezug auf die in ecoinvent v3.5 hinterlegten fossilen Kraftstoffe und deren Vorketten betrachtet. Als ottomotorischer Kraftstoff wird zudem der Ethanol-Prozess aus ecoinvent herangezogen, der bspw. bei E10 (Kraftstoff mit 10 Vol.-% Ethanol) Einsatz findet.

Darüber hinaus sind in der mitgelieferten openLCA-Datenbank ein Rapsmethylester(RME)-Diesel und ein FT-Diesel enthalten, die im BioEnergieDat-Projekt entstanden sind [26]. Der RME-Diesel wird für Blends mit FAME (Fettsäuremethylester, engl. fatty acid methyl ester)-Biodiesel-Anteil verwendet, also bspw. B7 (Kraftstoff mit 7 Vol.-% Biodiesel).

Die reFuels-Kraftstoffe wurden vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) modelliert. Da hierbei ecoinvent v3.6 als Hintergrunddatenbank verwendet wurde, konnte die Kraftstoffe noch nicht in die IFKM-Datenbank integriert werden. Zur Berücksichtigung der ITAS-reFuels wurden daher Berechnungen in einem Excel-Sheet vorgenommen.

Der Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeuges wird durch viele Parameter bedingt. Die wesentlichsten Einflüsse sind Veränderungen des Verbrauchs durch das Fahrverhalten, die Belastungssituationen des Fahrzeuges und die Umgebungsbedingungen. Um eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Fahrzeuge und gleichzeitig ein Maß für den Flottenverbrauch zu erhalten, werden wie bereits angesprochen die WLTP-Werte verwendet.

Die Zyklenverbräuche beziehen sich auf die Referenzkraftstoffe der EU, d. h. bei EURO 6 und Ottomotoren auf einem E10-Kraftstoff und bei Dieselmotoren auf einen B7-Kraftstoff.

In Tabelle 5 sind die in dieser Arbeit verwendeten Kraftstoffdaten aufgeführt.

Tabelle 5: Verwendete Kraftstoffdaten des Mineralölwirtschaftsverbandes (MWW) bzw. Kraftstoffanalysen von reFuels

| | Dichte _{15°C} in kg/m ³ | Heizwert in MJ/kg | Volum. Heiz- wert in MJ/l | Massenan- teil C | CO ₂ -Emission in kg CO ₂ /l |
|-------------------------------------|--|----------------------|------------------------------|---------------------|---|
| Fossiler Diesel (B0) [7] | 833,1 | 42,9 | 35,82 | 0,864 | 2,64 |
| B7⁷ | 831 | 43 | 35,73 | 0,8577 | 2,61 |
| FAME⁸ (FT-Diesel) | 880,6 | 37 | 32,58 | 0,77 | 2,48 |
| Fossiles Benzin (E0) | 756,9 | 42,76 | 32,37 | 0,868 | 2,4085 |
| Ethanol⁹ (E100) | 789 | 27,7 | 21,86 | 0,5215 | 1,509 |
| bioliq^{10,11} | 829 | 42,76 | 35,45 | – ¹² | 2,686 ¹² |

Dabei sind Unterschiede in Dichte und Heizwert zu erkennen. Diese wirken sich auf den Kraftstoffverbrauch aus, meist angegeben in l / 100 km. Beispielsweise hat ein mit Ethanol (E100) betriebenes Fahrzeug einen höheren Literverbrauch als wenn rein fossiles Benzin verwendet würde. Dieser Umstand wird sowohl in der openLCA-Datenbank als auch in der beigelegten Excel-Datei berücksichtigt.

⁷ IFKM-Kraftstoffanalyse vom 31.05.2019; FAME=6,9% --> EU6, Basisdaten Bioenergie Deutschland (August 2013)

⁸ Daten bereit gestellt von der Mineralölraffinerie Oberrhein

⁹ Mineralölwirtschaftsverband; Merker, Teichmann: Grundlagen Verbrennungsmotoren 2018

¹⁰ Dichte aus Sicherheitsdatenblatt des IKFT vom 28.09.2020

¹¹ Annahme des gleichen Heizwertes auf Basis der Aussagen in [23], sowie gleicher C-Anteil wie bei E0

¹² Da der C-Anteil des bioliq[®]-Kraftstoffs noch nicht vorlag, wird stattdessen der ITAS-Wert des gebundenen CO₂ mit den Verbrennungs-CO₂-Emissionen gleichgesetzt und daraus die CO₂-Emissionen pro Liter Kraftstoff ermittelt.

Das prinzipielle Vorgehen zur Ermittlung des korrigierten Literverbrauchs ist in Abbildung 2 veranschaulicht.

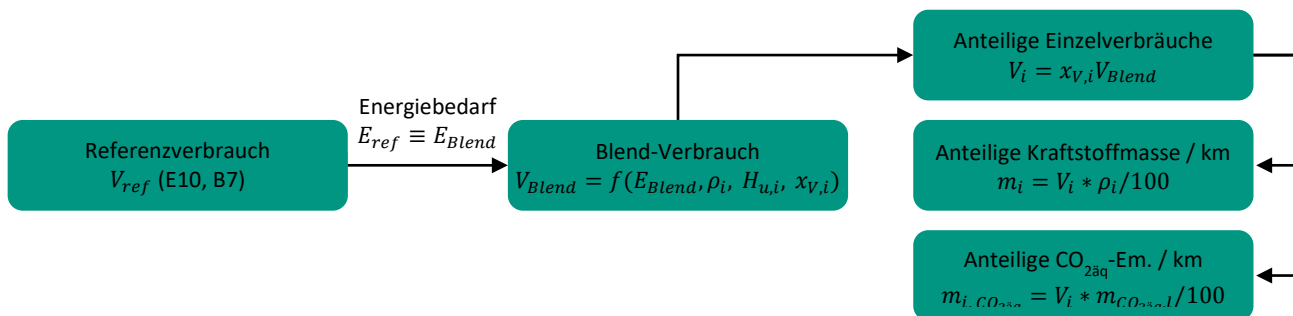


Abbildung 2: Skizzierung der Bestimmung des Heizwert- und Dichte-korrigierten Literverbrauchs

Hier wird die Annahme getroffen, dass sich die Zusammensetzung des Kraftstoffblends nicht auf den Wirkungsgrad auswirkt, also der Energiebedarf konstant bleibt. Daraus werden je nach volumetrischen Anteilen ($x_{v,i}$) der Komponente i in Abhängigkeit von Dichte und Heizwert ($\rho_i, H_{u,i}$) anteilige Einzelverbräuche ermittelt. Hieraus werden die anteilig benötigte Kraftstoffmasse und die daraus resultierenden $CO_{2äq}$ -Emissionen pro Kilometer bestimmt. Durch Multiplikation mit der zurückgelegten Distanz ergeben sich dann die jeweiligen Gesamtmassen.

Neben dem Kraftstoffverbrauch werden auch die Schadgasemissionen (z. B. Partikelemission oder Stickoxidemission) berücksichtigt. Für die modellierten Fahrzeuge (Ford Focus) wurden Schadstoff-Typprüfwerte des KBA herangezogen. Diese sind in Tabelle 6 aufgelistet. Die Messungen mit reFuels an Bestandsfahrzeugen haben gezeigt, dass die Emissionswerte auch mit dem Einsatz der reFuels-Blends mindestens eingehalten werden, stellenweise sogar unterschreiten [32].

Tabelle 6: Auszug der KBA-Daten der betrachteten Fahrzeuge

| Fahrzeug | TSN | Leistung in kW | Emissionscode | CO in mg/km | NOx in mg/km | PM in mg/km | THC in mg/km | NMHC in mg/km |
|----------|-----|----------------|--------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| ICEV-g | BPO | 92 | 36DG ¹³ | 263,8 | 14,9 | 1,43 | 26,0 | 22,8 |
| ICEV-d | BQP | 110 | 36DG ¹³ | 79,7 | 41,2 | 0,51 | 13,2 | - |

Alle vorigen Nutzungswerte sind pro Kilometer hinterlegt. Die Gesamtemissionen eines Fahrzeuglebens ergeben sich durch Multiplikation mit der zurückgelegten Distanz.

4.3 Fahrzeugmodellierung

Die in dieser Studie betrachteten Fahrzeuge wurden gemäß einer Vorgehensweise modelliert, die auf den in Abschnitt 3.7 aufgeführten Daten aufbaut und gemäß dem folgenden Abschnitt in openLCA implementiert wurde. Eine Übersicht über die wichtigsten Fahrzeugkennwerte inkl. Fahrzeugmasse, Kraftstoffverbrauch, etc. ist in Tabelle 8 im Anhang zu finden.

Das Hauptaugenmerk dieses Teils der Arbeit liegt auf der Modellierung der Antriebsstränge, die nach dem Bottom-Up-Prinzip erfolgt., was beispielhaft auf der linken Seite in Abbildung 3 dargestellt ist.

¹³ Entspricht Messung nach EURO 6d-TEMP-EVAP-ISC nach WLTP (siehe Verzeichnis des KBA, Schadstoff-Typprüfwerte - KlasseM1 - SV2.2.1, Stand:15. Dezember 2020)

Nachdem das Fahrzeug zuvor bei der Datenaufbereitung systematisch unterteilt wurde, werden in openLCA massenbasiert Bauteile erstellt. Diese werden wiederum zu Subsystemen, Systemen bis hin zum Gesamtfahrzeug integriert. Diese Vorgehensweise ist dabei möglichst technisch orientiert. Die Massen werden als Parameter vorgegeben. Dementsprechend ergeben sich die Massen höherer Integrationsebenen (z. B. Verbrennungsmotor) durch die Massen der unteren Ebene (z. B. Ansaugtrakt, Abgasstrang,...). Neben den Massen werden den Bauteilen Materialien inkl. Fertigungsprozessen zugewiesen.

Die Bestimmung der Masse des Gliders (in der LCA übliche Bezeichnung für das Restfahrzeug ohne Antriebsstrang, Tankinhalt und Fahrer) erfolgt indirekt. Das Leergewicht gemäß 92/21/EWG des Fahrzeugs wird Herstellerangaben entnommen. Davon wird die Masse des detailliert hinterlegten Antriebsstrangs, des Fahrers (68 kg + 7 kg Gepäck) und des Tankinhalts (90 % Füllung) abgezogen.

$$m_{\text{Glider}} = m_{\text{Fahrzeug}} - m_{\text{Antriebsstrang}} - m_{\text{Fahrer}} - m_{\text{Tankinhalt}}$$

Damit wird bis jetzt die Glider-Masse für alle Betrachtungen gleichgesetzt.

Die genannte Parametrierung kann jederzeit auf andere Motoren angepasst werden. Darüber hinaus werden für die Nutzung relevante Parameter wie die Fahrleistung oder der Strommix definiert.

Wichtiger Hinweis: Die beiden Fahrzeugmodelle sind nacheinander entstanden und wurden von unterschiedlichen Bearbeitern erstellt. Daher folgen die beiden Modelle (noch nicht) der exakt gleichen Struktur. Die Vereinheitlichung der Modelle steht daher noch aus, ist aber in den kommenden Arbeitsschritten des Projektes geplant.

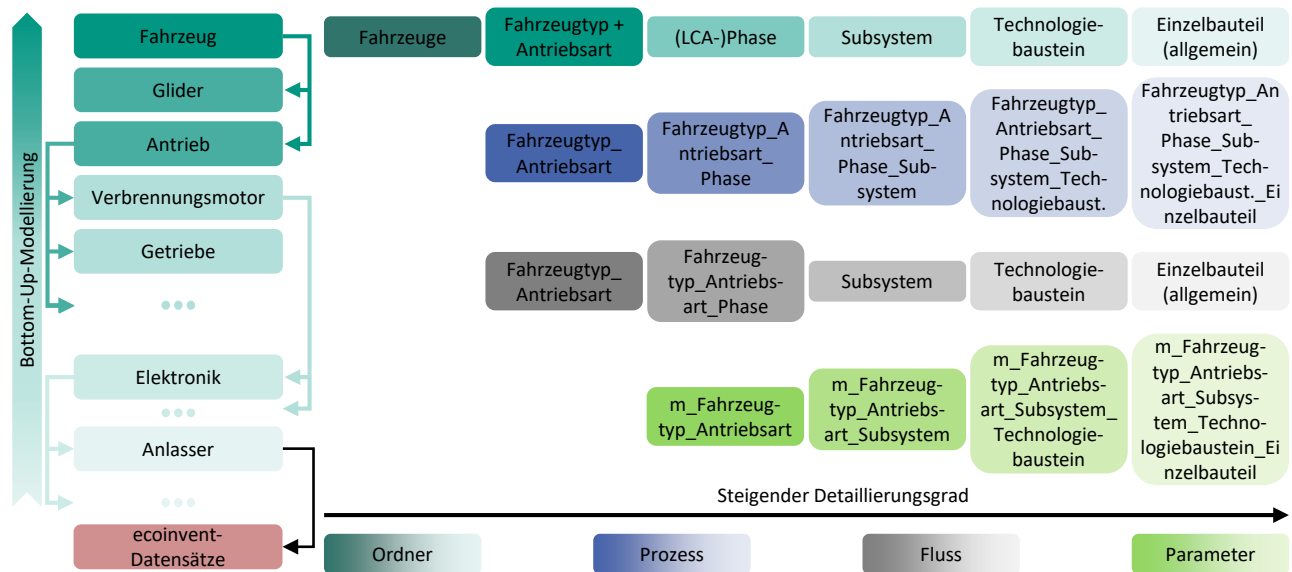


Abbildung 3: Bottom-Up-Modellierung des Fahrzeugs (links), Benennungslogik in openLCA (rechts)

5 Ergebnisse und Diskussion

In den nachfolgenden Ergebnissen wird die Wirkung der CO₂-Äquivalente betrachtet, da diese Größe in allen ReCiPe 2016 Wirkungsabschätzungsmethoden am vollständigsten¹⁴ abgebildet ist und zudem im Zentrum des Projektes reFuels stehen. Die Betrachtung der Kraftstoffe und ihrer Synthese wurde mit ecoinvent 3.6 als Hintergrunddatenbank durchgeführt, bei der nicht alle Strukturen der Wirkungen identisch abgebildet sind wie

¹⁴ Diese Aussage bezieht sich auf die in Kapitel 3.6 angesprochenen CO₂-Elementarflüsse.

in ecoinvent v3.5, welches der Betrachtung des Fahrzeuges und seiner Nutzung zugrunde liegt. In naher Zukunft werden beide Teilprojekte auf die aktuelle Version ecoinvent v3.7.1 gebracht, was die Zusammenführung der weiteren Wirkungen, wie Feinstaubbildung oder Verknappung fossiler Ressourcen ermöglicht.

Die Ergebnisse der Sachbilanzen der modellierten Fahrzeuge sind in Abbildung 4 dargestellt.

Der linke Teil der Grafik zeigt das Verhältnis des Treibhausgaspotenzials bei der Nutzung mit Standard-Kraftstoffen (E10 und B7) sowie die Wirkungen der Produktion der Fahrzeuge. Die der Produktion zugeordneten CO₂-Äquivalente werden hierbei gesplittet in den Glider und den Antriebsstrang. Letzterer wird im rechten Teil der Grafik detaillierter aufgezeigt, gegliedert nach seinen funktionalen Systemblöcken. In beiden Antriebssträngen werden diese Ergebnisse von den Aufwendungen des Motorblocks und des Getriebes dominiert, wobei beim Diesel-Antriebsstrang auch die Abgasnachbehandlung zu über 25% der Produktions-CO_{2äq} bei-trägt.

Während die Produktions-bezogenen Treibhausgase bei der Fertigung und damit bei Kilometer 0 emittiert werden, verteilen sich die Nutzungs-bezogenen Emissionen auf die gesamte Nutzungsdauer inklusive der vorgelagerten Kraftstoffproduktion. Der jeweilige THG-Ausstoß ist im linken Teil der Grafik gesondert aufgeführt unter den Abkürzungen „WtT“ (Well-to-Tank) – also Kraftstoffproduktion – und „TtW“ – dem Ausstoß im Betrieb.

Um Vergleiche mit anderen Studien sowie den CO₂-Vorschriften des Gesetzgebers herstellen zu können, wurden die Emissionen auf die funktionelle Einheit bezogen, also in g CO_{2äq}/km dargestellt, siehe rechte Ordinate des linken Teils von Abbildung 4.

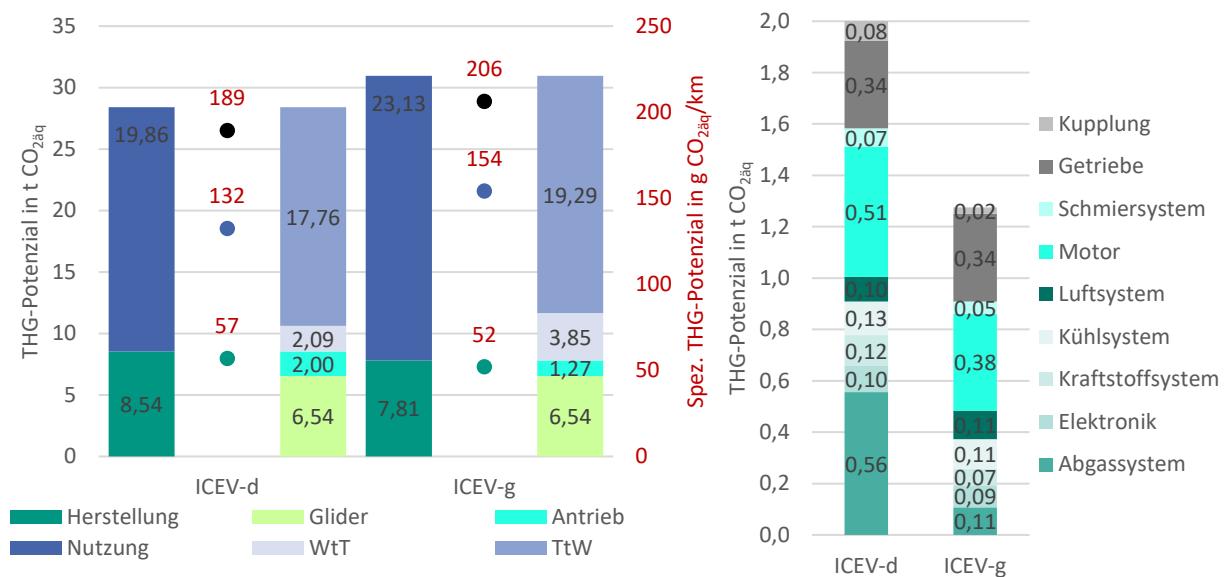


Abbildung 4: Ergebnisse für beide Fahrzeuge, aufgeteilt in Herstellung und Nutzung (grob, links) sowie eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Antriebskomponenten (rechts) bei 150.000 km und Referenzkraftstoffen

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist eine Fahrzeugnutzung mit den Referenz-Kraftstoffen E10 als Otto-Kraftstoff und B7 als Dieseldkraftstoff. Die entsprechenden Anteile an biogenen Kraftstoffen erste Generation werden dabei wie in Abbildung 2 dargestellt berücksichtigt.

Abbildung 5 zeigt, dass ca. 20 % der Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen durch die Produktion des Fahrzeuges bedingt sind und der Rest durch die Nutzung fossiler Kraftstoffe.

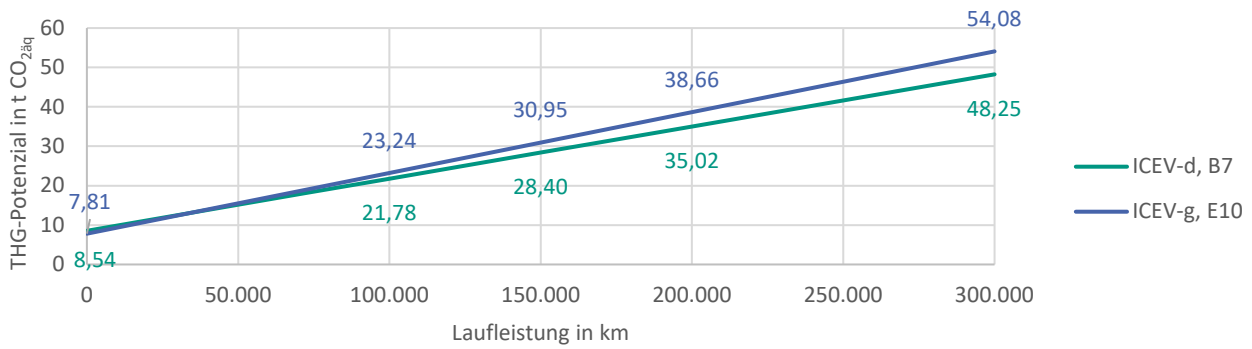


Abbildung 5: Ergebnisse von ICEV-d und ICEV-g über die zurückgelegte Strecke mit Referenzkraftstoffen

Das Diesel-motorisch angetriebene Fahrzeug kann mit dem geringeren Kraftstoffverbrauch die höheren Produktions-bedingten CO_{2äq}-Emissionen und auch das CO₂-intensivere Kohlenstoffverhältnis des Kraftstoffes überkompensieren und nach 300.000 km Nutzung einen Vorteil von fast 6 t CO_{2äq} aufweisen.

Werden in diese Betrachtung jetzt die Kraftstoffe aus Andresh et.al.¹⁵ eingesetzt, wird deren Vorkette multipliziert mit dem Kraftstoff-spezifischen Verbrauch und der Kilometerleistung.

In Abbildung 6 werden die Einsätze der über die Mikroreaktor-Fischer-Tropsch (FT)-Route hergestellten Diesel-Kraftstoffe mit Blick auf ihre Energiequellen verglichen. Allen regenerativen Kraftstoffen in dieser Betrachtung liegt über Direct Air Capture (DAC) gewonnenen CO₂ als C-Quelle zugrunde. Bei Einsatz von in Deutschland stationierter Photovoltaik ist das Verhalten vergleichbar dem fossilen Diesel, die Verwendung von Windenergie führt aber zu einer deutlichen Reduktion der nutzungsbedingten Treibhausgasemissionen um bis zu 80 %.

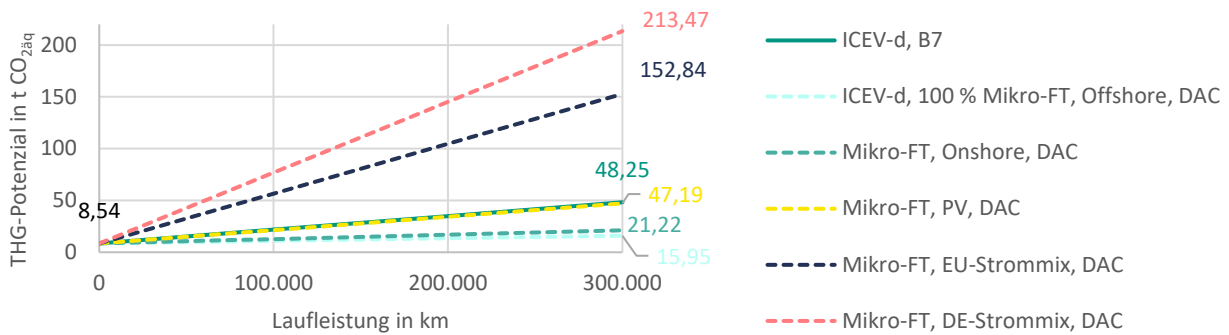


Abbildung 6: Ergebnisse des ICEV-d für reFuels-FT-Diesel aus versch. Energiequellen und DAC-CO₂

In Abbildung 7 nutzt die Mikroreaktor-FT-Synthese das bei der Kalzinierung des Zements inkl. der Auswasch-Prozesse freiwerdende CO₂. Der Vorteil von 32,3 t CO_{2äq} geringeren Emissionen mit DAC bei 300.000 km Nutzung gegenüber fossilem Dieseldieselkraftstoff kann sich bei der Nutzung von CO₂ aus Zementwerken auf 28,5 t CO_{2äq} reduzieren. Dabei muss die Voraussetzung gelten, dass das vom Zementwerk emittierte und dann gewaschene CO₂ nach der Kraftstoffsynthese und Nutzung im Fahrzeug wieder dem Zementwerk zugerechnet wird. Diese Zuordnung entspräche der Nutzung des am Zementwerk emittierten und in der Luft befindlichen CO₂ mit einer effizienteren Technik als dem aktuellen DAC. Hier ist auch eine sektorübergreifende Allokation denkbar.

¹⁵ Bericht über die Kraftstoffsynthese-LCA im reFuels-Projekt

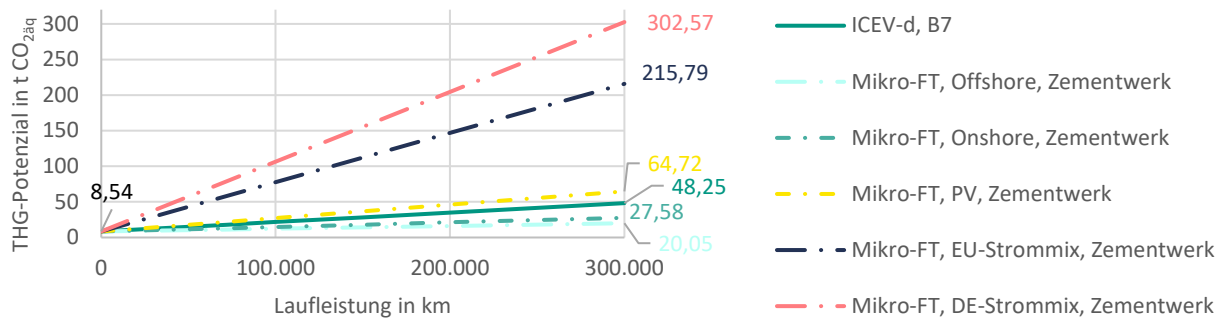


Abbildung 7: Ergebnisse des ICEV-d für reFuels-FT-Diesel aus versch. Energiequellen und Zementwerk-CO₂

Die paraffinischen Dieselkraftstoffe (FT-Diesel) liegen ob ihrer geringeren Dichte außerhalb der EN 590 Norm für Dieselkraftstoffe. Da die Bestandsfahrzeuge formal nur für diese Kraftstoffnorm freigegeben worden sind, wurde neben der Nutzung von 100% paraffinischem Diesel auch die Nutzung eines Kraftstoffblends mit maximalem Anteil paraffinischen Diesels untersucht. Dieser sogenannte R33®-Blend wird aus 26 Vol.-% paraffinischem Diesel, 7 Vol.-% FAME und 67 Vol.-% fossilem Diesel gemischt. Die Ergebnisse der Nutzung werden in Abbildung 8 dargestellt. Der gegenüber B7 zusätzliche Anteil von 26 Vol.-% erneuerbarem Dieselkraftstoff ermöglicht in Bestandsfahrzeugen (wie dem hier abgebildeten Fahrzeug des C-Segmentes) eine Reduktion von 8,86 t CO_{2äq}, also einer Reduktion um ca. 22 %.

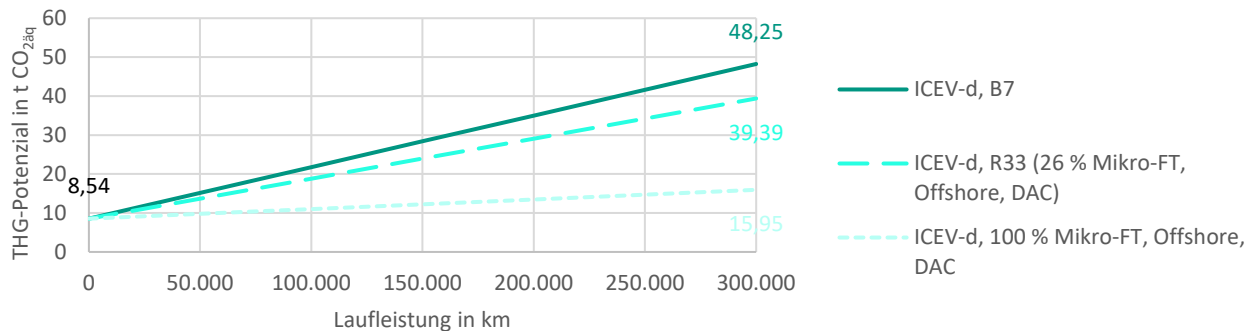


Abbildung 8: Ergebnisse des ICEV-d für R33 bzw. 100 % des THG-besten reFuels-FT-Diesels

Neben den Synthesemethoden, die den Fischer-Tropsch-Prozess umsetzen, wurden auch Kraftstoffsynthesen auf Methanol-to-Gasoline (MtG)-Basis betrachtet. Die Besonderheit bei dem hier abgebildeten Prozess ist die Nutzung biogener Reststoffe. Das in den Pflanzen gebundene CO₂ deckt sich hierbei mit dem CO₂, das bei der Verbrennung emittiert wird. Dass der Kraftstoffsyntheseprozess auch energetisch aus der Biomasse versorgt wird, wirkt sich zwar positiv auf die Treibhausgasemissionen aus, aber negativ auf die C-Bilanz, die hier nicht betrachtet wird.¹⁶ In Abbildung 9 zeigt sich, dass die Beimischung von 30 Vol.-% bioliq®-Benzin zu einer 34-%igen Reduktion der durch die Nutzung emittierten CO_{2äq} führt.

¹⁶ Die Nutzung RED II-tauglicher Biomasse sowohl als energetischer als auch als stofflicher Ausgangsstoff bedingt eine geringere Kohlenstoffeffizienz, bietet aber in Kombination mit Nutzung der Exothermie der Kraftstoff-Synthese-Prozesse die Möglichkeit einer maximalen CO₂-Reduktion.

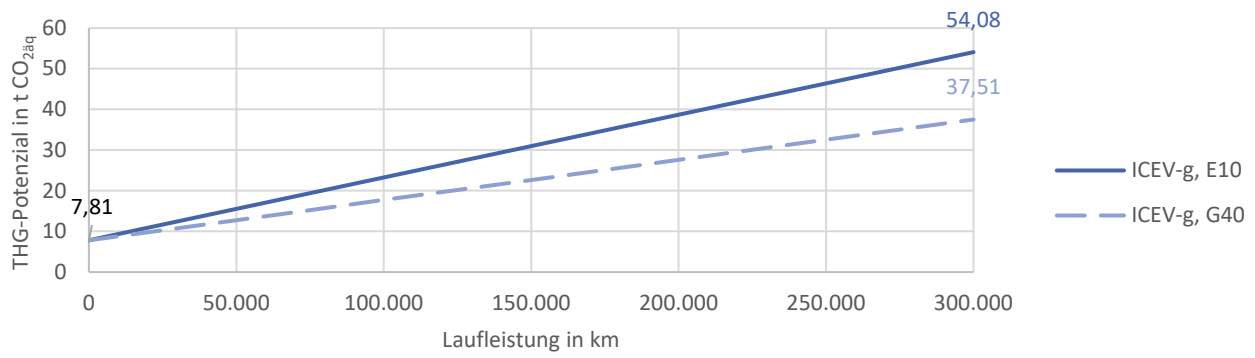


Abbildung 9: Ergebnisse des ICEV-g für Referenzkraftstoff, G40 (10 % Ethanol, 30 % bioliq®)



6 Literatur

1. Adam, A.; Häring, J.; Rittmann, S.; Wilhelm, M. (2020) Polymergleitlager mit umfassendem Anwendungsspektrum in Verbrennungsmotoren. *MTZ Motortech Z* 81(5):78–83. <https://doi.org/10.1007/s35146-020-0214-z>
2. Agora Energiewende (2017) Energiewende 2030: the big picture. Megatrends, Ziele, Strategien und eine 10-Punkte-Agenda für die zweite Phase der Energiewende. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Big_Picture/Agora_Big-Picture_WEB.pdf. Zugegriffen: 17. Dezember 2021
3. Agora Energiewende (2019) European Energy Transition 2030: The Big Picture. Ten Priorities for the next European Commission to meet the EU's 2030 targets and accelerate towards 2050. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/EU_Big_Picture/153_EU-Big-Pic_WEB.pdf. Zugegriffen: 17. März 2020
4. Agora Energiewende (2020) Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2020. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/171_A-EW_Jahresauswertung_2019_WEB.pdf. Zugegriffen: 15. April 2020
5. Agora Energiewende; Aurora Energy Research Limited (2018) Stromsektor 2030 - Energiewirtschaftliche Auswirkungen von 65% Erneuerbare Energien und einer Reduktion der Kohleverstromung im Einklang mit den Sektorzielen des Klimaschutzplans. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/65_EE_und_Kohleausstieg/Foliensatz_Kohleausstieg_2030_65_Aurora_Energy_Research.pdf. Zugegriffen: 15. Dezember 2019
6. Belcastro, E. L. (2012) Life cycle analysis of a ceramic three-way catalytic converter. Masterarbeit, Virginia Tech. http://seeds4green.org/sites/default/files/Belcastro_EL_T_2012.pdf. Zugegriffen: 17. Dezember 2021
7. Bloch, P. (2012) Untersuchungen zur optimalen Zusammensetzung synthetischer Dieseldieselkraftstoffe für konventionelle Brennverfahren. Dissertation. <http://dx.doi.org/10.18419/opus-4531>. Zugegriffen: 17. Dezember 2021
8. Energy Research Institute of Academy of Macroeconomic Research (2020) China Renewable Energy Outlook 2019. <https://www.thinkchina.ku.dk/documents/CREO-2019-EN-Final-0316.pdf>. Zugegriffen: 17. Dezember 2021
9. Ford Motor Company (2000) Ford Speak: Acronyms, Definitions and Terms
10. Ford Motor Company (2018) Der neue Ford Focus. Lieferprogramm, Ausstattung, Technische Daten. Ford Focus IV, 01. Aufl
11. Ford Motor Company (2019) Ford Focus Broschüre, 2019. Aufl
12. Ford Motor Company (2019) Ford Focus Cool & Connect Konfigurator. 5-Türer, 2,0 | EcoBlue, 6-Gang-Schaltgetriebe, 21. Aufl
13. Ford Motor Company (2020) Ford Focus Cool & Connect Konfigurator. 1,0 | EcoBoost (92 kW)
14. Ford Motor Company (2020) Ford Focus Trend Konfigurator. 1,0 | EcoBoost (92 kW)
15. Fridley, D.; Zheng, N.; Zhou, N.; Ke, J.; Hasanbeigi, A.; Morrow, B.; Price, L. (2011) China Energy and Emissions Paths to 2030. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1050675>. Zugegriffen: 17. Dezember 2021
16. Gutierrez, F.; Stauder, B.; Dietz, S.; Bente, W. (2020) Hochleistungslegierung für Zylinderköpfe. *MTZ Motortech Z* 81(4):30–37. <https://doi.org/10.1007/s35146-020-0215-y>
17. Köhler, E.; Flierl, R. (2019) Verbrennungsmotoren. Motormechnik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24541-2>
18. Kremer, C.; Müller-Babic, K. (2020) Pleuelstangen aus mikrolegiertem Schmiedestahl. *MTZ Motortech Z* 81(4):56–59. <https://doi.org/10.1007/s35146-020-0210-3>
19. Lormes, K.; Schumacher, J.; Werninghaus, E.; Müller, J. (2020) Das LiteKS-5-Kolbenkonzept - Ein Beitrag zur CO₂-Reduzierung. *MTZ Motortech Z* 81(4):18–25. <https://doi.org/10.1007/s35146-020-0208-x>



20. Ludwig, A. (2014) Sensorwerkstoffe. In: Tränkler, H.-R. (Hrsg.) Sensortechnik. Handbuch für Praxis und Wissenschaft, 2. Aufl. Springer Vieweg, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29942-1_4, S 105–142
21. MAHLE GmbH (2015) Kolben und motorische Erprobung, 2. Aufl. ATZ / MTZ-Fachbuch, Bd 2. Springer Vieweg, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-09558-1>
22. MAHLE GmbH (2015) Zylinderkomponenten. Eigenschaften, Anwendungen, Werkstoffe, 2., überarbeitete Auflage. Springer Science and Business Media; Springer Fachmedien Wiesbaden, [Place of publication not identified]. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-09546-8>
23. Michler, T.; Wippermann, N.; Toedter, O.; Niethammer, B.; Otto, T.; Arnold, U.; Pitter, S.; Koch, T.; Sauer, J. (2020) Gasoline from the bioliq® process: Production, characterization and performance. Fuel Processing Technology 206:106476. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106476>
24. Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (2006) DIN EN ISO 14044. Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006) (14044). Beuth, Berlin
25. Normenausschuss Grundlagen des Umweltschutzes (2009) DIN EN ISO 14040. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006) (14040). Beuth, Berlin
26. Schebek, L.; Cikovani, Y.; Biemann, K. et al. (2013) Schlussbericht Vorhaben BioEnergieDat. Bereitstellung einer aktuellen und harmonisierten Datenbasis als Beitrag zur Weiterentwicklung einer nachhaltigen Bioenergiestrategie. ITAS, KIT, DLR, Greendelta, HSZG, RU Bochum, Universität Stuttgart, Wuppertal Institut. <https://www.bioenergiesat.de/documents/10156/24936/Schlussbericht%20Vorhaben%20Bio-EnergieDat%20129a0d.pdf?version=1.0>. Zugegriffen: 22. April 2020
27. Simon, K. (2018) Lebenszyklusanalyse von Personenkraftwagen hinsichtlich des Abgasreinigungssystems. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie
28. Toedter, O.; Weber, P.; Heinz, L.; Koch, T.; Buchgeister, J. (2020) Life Cycle Analysis - Base for Decision or Object for Discussion? SIA POWERTRAIN & ENERGY 2020, Rouen
29. Umweltbundesamt (2017) Optimierung der Separation von Bauteilen und Materialien aus Altfahrzeugen zur Rückgewinnung kritischer Metalle (ORKAM). Endbericht. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11_texte_02-2017_orkam_endbericht.pdf. Zugegriffen: 17. Dezember 2021
30. van Basshuysen, R.; Schäfer, F. (2017) Handbuch Verbrennungsmotor. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-10902-8>
31. Weber, C.; Wirth, M.; Friedfeldt, R.; Ruhland, H.; Mehring, J.; Linsel, J.; Stump, L.; Le Bihan, J.-M. (2017) 1.0l EcoBoost 2nd Generation: A Success Story Continues. In: Eckstein, L.; Pischinger, S. (Hrsg.) 26. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 1. Aufl. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR; Urlichs & Pape, Aachen, [Aachen]
32. Weyhing, T.; Zabihigivi, M.; Moradi, M.; Michler, T.; Ziegler, J.; Wagner, U.; Toedter, O.; Koch, T. (2021) reFuels - rethinking fuels: Performance of regenerative fuels. In: Liebl, J.; Beidl, C.; Maus, W. (Hrsg.) Internationaler Motorenkongress 2021



7 Anhang

In Tabelle 7 sind die energetischen Anteile verschiedener Kraftwerkstypen für den deutschen Strommix dargestellt, prognostiziert im Jahr 2017 für die Jahre 2020 und 2030. Es ist zu beachten, dass die angezogene Quelle nicht zwischen Lauf- und Pumpspeicherkraftwerken unterscheidet, siehe *.

Tabelle 7: Energetische Anteile der Kraftwerkstypen am deutschen Strommix, Prognose 2020 und 2030 [2]

| | 2020 | 2030 |
|---------------------------------|--------|--------|
| Biomasse | 0,0694 | 0,0614 |
| Braunkohle | 0,1980 | 0,063 |
| Erdgas | 0,1766 | 0,2160 |
| Geothermie | 0,0003 | 0,0005 |
| Hausmüll | 0,0099 | 0,0097 |
| Kernenergie | 0,0924 | 0*** |
| Mineralöl | 0,0069 | 0,0016 |
| Photovoltaik | 0,0826 | 0,1405 |
| Steinkohle | 0,1191 | 0,0695 |
| Wasserkraft Laufwasser | 0,0332 | 0,0339 |
| Wasserkraft Pumpspeicher | _* | _* |
| Windkraft offshore | 0,0479 | 0,1373 |
| Windkraft onshore | 0,1636 | 0,2666 |

Tabelle 8: Modellierungsannahmen der beiden Fahrzeuge

| Antriebstyp | ICEV-d | ICEV-g |
|----------------------------|--|----------------|
| Fahrzeugklasse | Kompaktklasse (Ford Focus) | |
| Antriebsleistung | 110 kW | 92 kW |
| Kraftstofftank | 47 l | 52 l |
| AdBlue-Tank | 10,5 l | - |
| Verbrauch nach WLTC | 4,5 l / 100 km | 5,5 l / 100 km |
| EG-Leergewicht | 1.493 kg | 1.343 kg* |
| Glider | Gleichgezogen auf ICEV-d-Masse von 1.040 kg → *Anpassung des ICEV-g-LG | |
| Fahrzeugmasse | $m_{\text{Leer}} - m_{\text{Fahrer}} - m_{\text{Tankinhalt}}$ | |
| Lebensdauer | Mind. 300.000 km inkl. entsprechender Instandhaltung | |