

P2X: Erforschung, Validierung und Implementierung von „Power-to-X“ Konzepten.

Ökobilanz der Herstellung und Nutzung von Oxymethylenether (OME)

Darmstadt,
September 2019

Autorinnen und Autoren

Jürgen Sutter
Cornelia Merz

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
Zusammenfassung	11
1. Einleitung	13
2. Ziele und Anwendungen der Studie	15
3. Festlegung des Untersuchungsrahmens	15
3.1. Funktion und funktionelle Einheit	15
3.2. Festlegung der Systemgrenzen	15
3.3. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität	16
3.3.1. Technologische Repräsentativität	16
3.3.2. Geographische Repräsentativität	16
3.3.3. Zeitrepräsentativität	17
3.4. Allokation	17
3.4.1. CO ₂ -Allokation bei Nutzung von CO ₂ aus industriellen Punktquellen	17
3.4.2. Allokation bei Literaturdaten	19
3.5. Wirkungskategorien	19
3.6. Methoden der Auswertung	22
3.7. Einschränkungen und Verwendung	22
3.8. Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts	22
3.9. Konformität und kritische Prüfung	23
4. Prozess	23
4.1. Stromvorkette	23
4.2. H ₂ -Elektrolyse	28
4.3. CO ₂ -Vorkette	30
4.4. OME-Synthese	31
5. Datengrundlage	33
6. Einschätzung der Datenqualität	36
7. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	36
7.1. Strommix 2018	37
7.1.1. Treibhauspotenzial (GWP)	37

7.1.2.	Surplus Ore Potential (SOP)	38
7.1.3.	Feinstaub (PM10)	38
7.1.4.	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (NMVOC)	39
7.1.5.	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	39
7.1.6.	Versauerungspotenzial (AP)	40
7.1.7.	Eutrophierungspotenzial (EP)	41
7.2.	Strommix 2030	41
7.2.1.	Treibhauspotenzial (GWP)	42
7.2.2.	Surplus Ore Potential (SOP)	43
7.2.3.	Versauerungspotenzial (AP)	44
7.2.4.	Eutrophierungspotenzial (EP)	45
7.2.5.	Feinstaub (PM10)	46
7.2.6.	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP, NMVOC)	47
7.2.7.	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	48
7.3.	Strommix 2050	48
7.3.1.	Treibhauspotenzial (GWP)	49
7.3.2.	Surplus Ore Potential (SOP)	50
7.3.3.	Versauerungspotenzial (AP)	51
7.3.4.	Eutrophierungspotenzial (EP)	52
7.3.5.	Feinstaub (PM10)	53
7.3.6.	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP, NMVOC)	54
7.3.7.	Kumulierter Energieaufwand (KEA)	55
8.	Auswertung der Ökobilanz	55
8.1.	Identifizierung der signifikanten Parameter	55
8.2.	Beurteilung	57
8.2.1.	Vollständigkeitsprüfung	57
8.2.2.	Sensitivitätsprüfung	57
8.2.2.1.	Dieserverbrauch	57
8.2.2.2.	Carbon capture and usage (CCU)	59
8.2.2.3.	Batterieelektrisches Fahrzeug	61
8.2.3.	Konsistenzprüfung	65
9.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	65
	Literaturverzeichnis	67
	Annex I: Parameterliste	72
	Annex II: Ergebnisse der LCA	79
	Annex III: Externes kritisches Gutachten	92

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Produktionsrouten Ruß-NO _x -Schere von OME ₁ , konventionellem Diesel und verschiedenen Blending-Raten	14
Abbildung 3-1:	Systemgrenzen der untersuchten OME _x -Produktionsrouten	16
Abbildung 4-1:	Übersicht untersuchter und weiterer OME _x -Produktionsrouten	31
Abbildung 7-1:	GWP der OME-Routen mit Strombezug 2018	37
Abbildung 7-2:	SOP der OME-Routen mit Strombezug 2018	38
Abbildung 7-3:	PM10 der OME-Routen mit Strombezug 2018	38
Abbildung 7-4:	POCP der OME-Routen mit Strombezug 2018	39
Abbildung 7-5:	KEA der OME-Routen mit Strombezug 2018	39
Abbildung 7-6:	AP der OME-Routen mit Strombezug 2018 (ohne Fahrzeugbau)	40
Abbildung 7-7:	EP der OME-Routen mit Strombezug 2018 (ohne Fahrzeugbau)	41
Abbildung 7-9:	GWP der OME-Routen mit Strombezug 2030	42
Abbildung 7-10:	SOP der OME-Routen mit Strombezug 2030	43
Abbildung 7-11:	AP der OME-Routen mit Strombezug 2030 (ohne Fahrzeugbau)	44
Abbildung 7-12:	EP der OME-Routen mit Strombezug 2030 (ohne Fahrzeugbau)	45
Abbildung 7-13:	PM10 der OME-Routen mit Strombezug 2030	46
Abbildung 7-14:	POCP der OME-Routen mit Strombezug 2030	47
Abbildung 7-15:	KEA der OME-Routen mit Strombezug 2030	48
Abbildung 7-17:	GWP der OME-Routen mit Strombezug 2050	49
Abbildung 7-18:	SOP der OME-Routen mit Strombezug 2050	50
Abbildung 7-19:	AP der OME-Routen mit Strombezug 2050 (ohne Fahrzeugbau)	51
Abbildung 7-20:	EP der OME-Routen mit Strombezug 2050 (ohne Fahrzeugbau)	52
Abbildung 7-21:	PM10 der OME-Routen mit Strombezug 2050	53
Abbildung 7-22:	POCP der OME-Routen mit Strombezug 2050	54
Abbildung 7-23:	KEA der OME-Routen mit Strombezug 2050	55
Abbildung 8-1:	Energiebedarf der OME _x -Produktionsrouten nach Anteilen in %	56
Abbildung 8-2:	GWP der OME-Routen mit Diesel-Realverbrauch (Bezugsjahr 2018)	57
Abbildung 8-3:	SOP der OME-Routen mit Diesel-Realverbrauch (Bezugsjahr 2018)	58
Abbildung 8-4:	PM10 der OME-Routen mit Diesel-Realverbrauch (Bezugsjahr 2018)	58
Abbildung 8-5:	POCP der OME-Routen mit Diesel-Realverbrauch (Bezugsjahr 2018)	59
Abbildung 8-6:	GWP der OME-Routen mit Strombezug 2050 (100:0)	60
Abbildung 8-7:	GWP der OME-Routen mit Strombezug 2050 (50:50)	60
Abbildung 8-8:	Vergleich BEV mit OME ₁ reductive und Diesel (2018)	62
Abbildung 8-9:	Vergleich BEV mit OME ₁ reductive und Diesel (2030)	63
Abbildung 8-10:	Vergleich BEV mit OME ₁ reductive und Diesel (2050)	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Beschreibung der betrachteten PtX-Einsatzfälle und der relevanten Eingangsgrößen für die Modellierung	24
Tabelle 4-2:	Zentrale Modellierungsergebnisse für die unterschiedlichen Einsatzfälle	26
Tabelle 4-3:	Anlagenpark der Stromerzeugung 2018, 2030 und 2050	27
Tabelle 4-4:	Verwendete ecoinvent-Datensätze nach Energieträger	28
Tabelle 4-5:	Parameter der Entwicklungsstände der PEM-Elektrolyse für die LCA	29
Tabelle 4-6:	Energie- und Wasserbedarf für die PEM-Elektrolyse	29
Tabelle 4-7:	Energiebedarf verschiedener Technologien zur Abscheidung von CO ₂ aus Luft	30
Tabelle 5-1:	Energiebedarf der OME-Routen bei vollständiger Wärmeintegration	34
Tabelle 5-2:	Kenngößen der Fahrzeuge	35
Tabelle 5-3:	Umweltwirkung der Fahrzeugherstellung	36
Tabelle 8-1:	Stromverbrauch BEV	61

Abkürzungsverzeichnis

AP	Versauerungspotenzial (Acidification Potential)
BEV	batterieelektrisches Fahrzeug (Battery Electric Vehicle)
CCU	Carbon Capture and Usage
CO ₂	Kohlendioxid
COP	Heizzahl (Coefficient of Performance)
DAC	Direct Air Capture
DME	Dimethylether
EE	Erneuerbare Energien
EP	Eutrophierungspotenzial (Eutrophication Potential)
GWP	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)
H ₂	Wasserstoff
ISO	Internationale Organisation für Normung
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KSZ	Klimaschutzszenario
LCA	Ökobilanz (Life Cycle Assessment)
LHV	Unterer Heizwert (Lower Heating Value)
NM VOC	Non-methane Volatile Organic Compounds
OME	Oxymethylenether
PEM	Protonen-Austausch-Membran (Proton Exchange Membrane)
PM ₁₀	Feinstaubemission bei einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm
POCP	Photochemisches Oxidationbildungspotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential)
POM	Polyoxymethylen
PtX	Power-to-X
SOP	Verbrauch mineralischer Ressourcen (Surplus Ore Potential)
TRL	Technology Readiness Level
WLTC	Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle

Zusammenfassung

Hintergrund der Studie

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung Kopernikusprojekt „P2X: Erforschung, Validierung und Implementierung von „Power-to-X“ Konzepten“ wurde zwischen September 2016 und August 2019 unter Koordination der RWTH Aachen, des Forschungszentrums Jülich und der DECHEMA durchgeführt.

Die Eigendarstellung von „P2X“ findet sich unter:

<https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/power-to-x>

Aufgrund des politischen Ziels, Deutschland bis 2050 aus erneuerbaren Energien zu versorgen, müssen effiziente Speichertechnologien für diese fluktuierenden Energieressourcen entwickelt werden. Gleichzeitig ist der Transportsektor aber auch die chemische Industrie mit schwindenden fossilen Energieressourcen und der politischen Vorgabe, anthropogene CO₂-Emissionen nachhaltig zu senken, konfrontiert. Im Verbundprojekt „P2X“ wurden verschiedene Power-to-X-Anwendungen erforscht und ihr möglicher Beitrag zur Senkung der CO₂-Emissionen bewertet

Die vorliegende Ökobilanz untersucht die Produktion von Oxymethylenether (OME) und dessen Nutzung als Dieselsubstitut im PKW-Verkehr. Die Prozesskette zur Herstellung von Oxymethylenether umfasst zunächst die Bereitstellung von Wasserstoff über Elektrolyse. Als zweiter Rohstoff ist reines CO₂ erforderlich. Darauf folgend wird H₂ mit CO₂ zu Oxymethylenether (OME) umgesetzt. Bilanziert wurde der Stand von Forschung und Entwicklung von Anfang 2019. Für die Bereitstellung von elektrischer Energie wurden neben dem aktuellen Stand (Bezugsjahr 2018) auch zukünftige Szenarien bilanziert (2030 und 2050).

Zielgruppe für die Ökobilanzstudie sind die Verbundpartner im Kopernikus-P2X-Projekt selbst, die sowohl Industrieunternehmen als auch wissenschaftliche Institute umfassen. Weitere Zielgruppen für die Ergebnisse stellen das fördernde Bundesministerium für Bildung und Forschung selbst und die interessierte Fachöffentlichkeit dar.

OME-Produktionsrouten und funktionelle Einheiten

Die Systemgrenzen für die Bilanzierung der OME-Nutzung umfassen die folgenden Module:

- Bereitstellung von elektrischer Energie
- Wasserstoffherstellung mittels PEM-Elektrolyse
- CO₂-Bereitstellung
- Synthese von OME₁ (drei Routen: etabliert, oxidativ und reduktiv) bzw. OME₃₋₅ (etablierte Route)
- Nutzung von OME als Dieselsubstitut im PKW

Die funktionelle Einheit für die Ökobilanz ist 1 Fahrzeugkilometer (vehicle kilometer, vkm).

Ergebnisse

Die Auswertung der Ökobilanzergebnisse für die Verwendung von OME als Dieselsubstitut in einem PKW ergibt für alle untersuchten Wirkungskategorien, d. h. Treibhauspotenzial (GWP), Verbrauch mineralischer Ressourcen (SOP), Eutrophierungspotenzial (EP), Versauerungspotenzial (AP) und Photochemisches Oxidationsbildungspotenzial (POCP), Partikelemission (PM10) sowie Kumulierter

Energieaufwand (KEA), für das Jahr 2018 und 2030 deutlich höhere ökologische Lasten als die vergleichend betrachtete Nutzung von fossilem Diesel (Benchmark). Erst mit dem Stromszenario für das Jahr 2050 führt die Bewertung mit dem flexmix-Strom¹ zumindest beim GWP zu geringeren Werten als die Nutzung von Diesel, während bei den anderen untersuchten Wirkungskategorien auch 2050 die Lasten höher liegen als beim Benchmark. Während das SOP sehr von der Fahrzeugherstellung geprägt wird, werden alle anderen untersuchten Wirkungskategorien in allen drei Stromszenarien von der Stromvorkette dominiert.

Einschränkungen

In den Systemgrenzen der vorliegenden Ökobilanz für den Zeitraum bis 2050 wird ausschließlich die Zusammensetzung des Stromerzeugungsmixes (sowie einige technische Parameter der Vordergrundprozesse) variiert. Eine Veränderung der Vorketten, z. B. durch technische Weiterentwicklung oder Verfahrensumstellung ist nicht berücksichtigt. So könnten effizientere Produktionsweisen oder die Nutzung von erneuerbaren Energien insbesondere bei der Produktion von Fahrzeugen, Metallen oder Anlagen zur Gewinnung erneuerbarer Energien zu einer Verbesserung der Umweltperformance beitragen. Weiterhin müssen die Ökobilanzergebnisse unter dem Vorbehalt bewertet werden, dass die Sachbilanzdaten teilweise auf Einzel- und Laborversuchen beruhen.

Fazit und Empfehlungen

Die Ergebnisse der Ökobilanzstudie zeigen, dass die Verwendung von PtX-Kraftstoffen im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen erst dann zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen führt, wenn der Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix sehr hoch ist. Solange noch fossile Energieträger, insbesondere Kohle, verwendet wird, können strombasierte Kraftstoffe nicht zu einer Reduktion der Emission von klimarelevanten Gasen beitragen. In Anbetracht der Tatsache, dass EE-Strom in Deutschland und weltweit mittel- und langfristig ein knappes Gut sein wird, und der EE- und PtX-Anlagenbau u.a. den Einsatz von Spezialmetallen erfordert, sollte berücksichtigt werden, dass diese nur dort zum Einsatz kommen, wo keine unter Lebenszyklusperspektive effizienteren klimaschonenden Alternativen zur Verfügung stehen.

Eine Realisierung des Gesamtprozesses im Rahmen einer Pilotanlage oder gar auf großtechnischer Ebene steht noch aus. Erneute LCA-Studien zur Validierung der Ergebnisse dieser Studie in einigen Jahren werden empfohlen, wenn die Verfahrensentwicklung weiter fortgeschritten ist.

¹ Siehe Kapitel 4.1 (Stromvorkette)

1. Einleitung

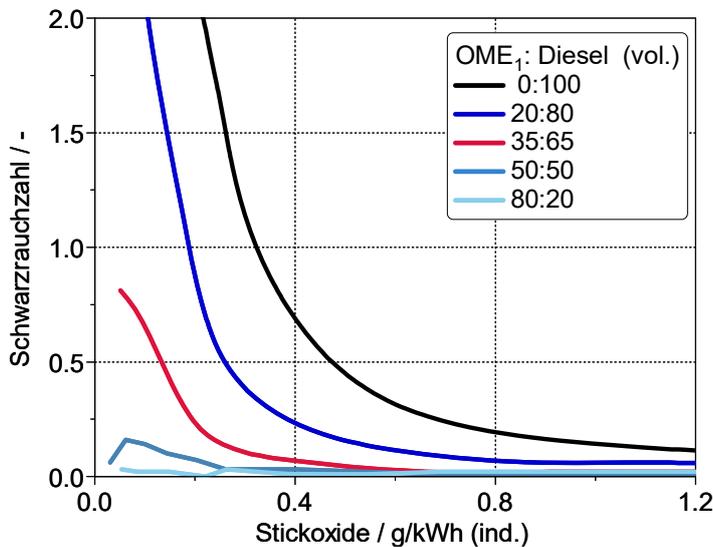
Als flüssige Kraftstoffe im straßengebundenen Verkehr kommen gegenwärtig praktisch ausschließlich fossiler Diesel und Ottokraftstoff zum Einsatz. Ziel der Forschungsarbeiten im Kopernikus-P2X-Projekt zu den flüssigen synthetischen Kraftstoffen war es, erneuerbare elektrische Energie für unterschiedliche Bereiche des Verkehrssektors zu erschließen. Für den straßengebundenen Verkehr wurden dabei neben den in dieser Ökobilanz bewerteten oligomeren Oxymethylenethern (OME_x) auch synthetischer Diesel und synthetischer Ottokraftstoff, sowie für den Einsatz im Flugverkehr synthetisches Kerosin untersucht.

Die PtX-Prozesskette zur Herstellung von oligomeren Oxymethylenethern, welche im Blend mit oder als Ersatz für fossile Dieselkraftstoffe eingesetzt werden können, umfasst zunächst die Bereitstellung von Wasserstoff über Elektrolyse (siehe Kapitel 4.2). Als zweiter Rohstoff ist reines CO_2 erforderlich. Darauf folgend wird H_2 mit CO_2 zu oligomeren Oxymethylenethern (OME_x) umgesetzt, wobei x die Kettenlänge definiert.

OME_x mit längeren Ketten ($20 < x < 100$ sowie $x > 1500$) eignen sich für die Herstellung von Polymeren. Diese Polyoxymethylenkunststoffe (POM) haben sich bereits seit langem etabliert und zeichnen sich durch eine hohe Steifigkeit, Festigkeit sowie Dimensionsstabilität aus [Luftl et al. 2014; Brostow 2007]. Erste Versuche in der Synthesekette aus CO_2 und Wasserstoff liefen bereits im Forschungscluster B3 des Kopernikus-P2X-Projektes, sie war aber in der ersten Phase noch nicht Gegenstand der ökobilanziellen Bewertung.

OME_x mit kurzen Kettenlängen ($x < 8$) stellen wie in der Roadmap zum Kopernikus-P2X-Projekt [Roadmap 1.0, Roadmap 2.0] beschrieben aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften ein vielversprechendes Substitut bzw. Teilsstitut (Blend) für konventionellen Diesel dar. Es konnte gezeigt werden, dass bereits geringe Zusätze an OME_x in Diesel eine signifikante Minderung der Rußemission bewirken [Omari et al. 2017]. Dies ermöglicht eine innermotorische Reduktion der Stickoxide (NO_x), da die von konventionellem Diesel bekannte Ruß- NO_x -Schere signifikant reduziert wird. Abbildung 1-1 zeigt die Schwarzauchzahl (Indikator für Ruß-Emissionen) über die NO_x -Emissionen beispielhaft für verschiedene OME_1 -Diesel-Blends und konventionellen Diesel. Bereits bei einem Blend von 35 Vol- % OME_1 in Diesel können die Ruß-Emissionen um ca. 90 % reduziert werden. Damit können durch den Einsatz von OME_x die lokalen Ruß- und NO_x -Emissionen deutlich reduziert werden. Durch den Einsatz von CO_2 als regenerativer C1-Baustein (CO_2 -Emissionen aus biogenen industriellen Punktquellen oder Abtrennung aus der Luft) könnte zudem der Verbrauch an fossilen Rohstoffen reduziert werden.

Abbildung 1-1: Produktionsrouten Ruß-NO_x-Schere von OME₁, konventionellem Diesel und verschiedenen Blending-Raten



Quelle: Omari et al. 2017

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden verschiedene Prozessrouten für die Herstellung von OME_x ausgehend von H₂ und CO₂ untersucht. Sie sind in der Roadmap 1.0 bzw. 2.0 [Roadmap 1.0, Roadmap 2.0] beschrieben und werden im Folgenden wiedergegeben. Als technologischer bzw. chemischer Benchmark dient hierbei die etablierte Route über Methanol und Formaldehyd zu OME₁ und anschließend von OME₁ und Trioxan zu OME₃₋₅ [Burger et al. 2013]. Über diese etablierte Route wird OME₃₋₅ bereits im industriellen Maßstab für die chemische Industrie gewonnen. Die OME_x Produktion über Kombination konventioneller Einzeltechnologien auf Basis von Synthesegas ist in China bereits erfolgt, sodass der technologische Reifegrad dieser Technologie grundsätzlich mit 7-8 eingestuft werden kann. Diese Herstellungsrouten sind im Sinne eines Gesamtprozesses jedoch nicht energetisch optimiert, sodass hier noch großes Verbesserungspotential ausgeschöpft werden kann. Im P2X-Projekt werden an der RWTH Aachen zudem neue Syntheserouten beispielsweise mittels Direktoxidation von Methanol oder unter Anwendung neuartiger Katalysatoren entwickelt. Die angestrebte neuartige Prozesskette über CO₂ und Elektrolyse-Wasserstoff befand sich bei Projektbeginn noch auf einem TRL von 1, wobei sich die TRLs der einzelnen Prozessschritte im Gesamtsystem sehr unterschiedlich darstellen. So weisen die Prozessschritte zur Methanolbereitstellung aus CO₂ (heterogen-katalysiert) und Formaldehydbereitstellung aus Methanol bereits einen TRL von 8-9 auf. Neue Prozesseinheiten wie die Formaldehydherstellung aus CO₂, die Formaldehydbereitstellung über das Niedertemperaturverfahren und DME-Herstellung aus CO₂ (homogen-katalysiert) weisen dagegen einen sehr niedrigen Reifegrad auf.

Zur motorischen Anwendung und späteren Nutzung im Fahrzeug wurden an der RWTH Aachen experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um das gesamte Potential von Emissions- und Verbrauchsreduktionen zu charakterisieren. Hierzu werden Tests am Einzylindermotor durchgeführt und reale Fahrzyklen simuliert, um das gesamte Spektrum der fahrzeugseitigen Emissionen zu identifizieren. Parallel werden die Verbrennungskinetik untersucht und Reaktionsmodelle entwickelt, um Zündverzugszeiten und lokale Mischungsverhältnisse vorherzusagen. Auf Grundlage dessen kann die Motorsteuerung und die Einspritzung für OME_x-Kraftstoffe angepasst und optimiert werden.

2. Ziele und Anwendungen der Studie

Die Ökobilanz dient zur Unterstützung der Bewertung der sich in Entwicklung befindlichen OME-Synthese im Rahmen des P2X-Projekts. Den beteiligten Verbundpartnern sollen damit detaillierte Informationen bzgl. der ökologischen Vorteile und Schwachstellen zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin dienen die Arbeiten zur Ökobilanz dazu, Herausforderungen und Potenziale zur Verbesserung der Umweltwirkungen der strombasierten OME-Herstellung aufzuzeigen, beispielsweise durch den Vergleich unterschiedlicher Syntheserouten. Zudem wurde die direkte Verwendung von Strom zum Betrieb eines batterieelektrischen Fahrzeugs der Nutzung von OME in einem konventionellen Diesel-Pkw gegenübergestellt.

Eine wichtige Zielgruppe für die Ökobilanzstudie sind die Verbundpartner im Kopernikus-P2X-Projekt selbst, die sowohl Industrieunternehmen als auch wissenschaftliche Institute umfassen. Weitere Zielgruppen für die Ergebnisse stellen das fördernde Bundesministerium für Bildung und Forschung selbst und die interessierte Fachöffentlichkeit dar.

3. Festlegung des Untersuchungsrahmens

3.1. Funktion und funktionelle Einheit

Die Funktion des untersuchten P2X-Prozesses ist die Nutzung von Oxymethylether (OME) als Dieselsubstitut in einem PKW, wobei die Betrachtung verschiedener Syntheserouten für OME ausgehend von Wasserstoff und CO₂ im Vordergrund steht. Aufgrund des hohen Beitrags zu den untersuchten Umweltwirkungskategorien werden außerdem die Stromerzeugung, die Wasserstoffproduktion mittels Wasserelektrolyse und die CO₂-Bereitstellung im Detail betrachtet und bilanziert.

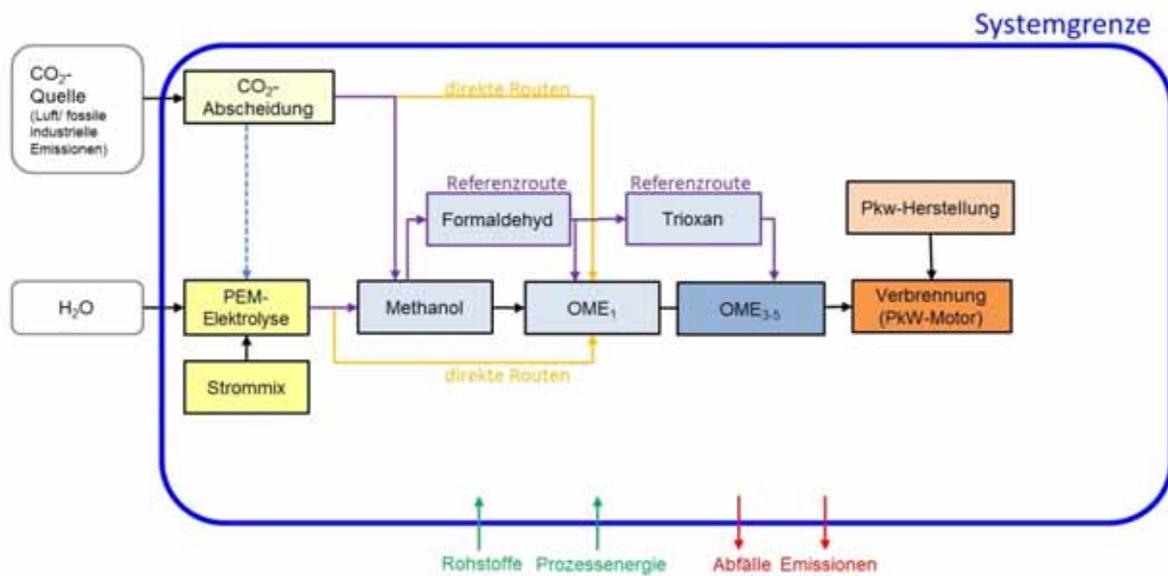
Die funktionelle Einheit ist auf die Nutzung eines PKW über einen Fahrzeugkilometer (vehicle kilometer, vkm) festgelegt.

3.2. Festlegung der Systemgrenzen

Die Systemgrenzen der untersuchten Routen (siehe Abbildung 3-1) umfassen insbesondere die Bereitstellung von elektrischer Energie, Wasserstoff und CO₂, die Synthese von OME₁ bzw. OME₃₋₅ sowie die Nutzung von OME als Dieselsubstitut im PKW. Weiterhin sind die Vorketten der notwendigen Material- und Energieströme sowie die Fahrzeugherstellung eingeschlossen.

Als Referenzprozess gilt die Nutzung fossil bereitgestellten Diesels in einem Diesel-PKW (durchschnittlicher Mittelklassewagen, Golf 7). In einer Sensitivitätsanalyse wird auch der Vergleich mit einem batterieelektrischen PKW (BEV) betrachtet (siehe Kapitel 8.2.2.3).

Abbildung 3-1: Systemgrenzen der untersuchten OME_x-Produktionsrouten



Quelle: Eigene Darstellung

3.3. Datenerhebung, Anforderung an die Daten und die Datenqualität

Die Datenerhebung für die Sachbilanzen wurde in Zusammenarbeit mit den P2X-Partnern durchgeführt. Die Sachbilanzdaten der Vordergrundprozesse zur OME-Synthese beruhen im Wesentlichen auf Modellierungen (Simulationen in Aspen Plus), denen Labor- und Literaturwerte sowie verfahrenstechnische Abschätzungsmethoden (z. B. Minimum energy demand calculations) zugrunde liegen. Wasserstoff- und CO₂-Bereitstellung basieren auf Literaturdaten, während der Fahrzeugherstellung und -nutzung Angaben von Audi zugrunde liegen. Die Sachbilanzdaten für die Hintergrundprozesse werden aus der ecoinvent-Datenbank [ecoinvent v3.5] entnommen.

3.3.1. Technologische Repräsentativität

Die wesentlichen Prozessdaten zur OME-Synthese basieren auf Primärdaten der RWTH Aachen [RWTH.AVT.SVT 2019]. Die Daten zur OME-Synthese repräsentieren Simulationsergebnisse basierend auf Ergebnissen aus dem Pilot-/ Labormaßstab und Literaturwerten. Ein großtechnischer Betrieb ist zum Zeitpunkt der Erstellung der Ökobilanz insbesondere für die oxidative und reduktiven Routen noch nicht realisiert.

3.3.2. Geographische Repräsentativität

Die Ökobilanz der OME-Produktion hat den geographischen Bezug Deutschland. Die Zusammensetzung des Strommixes wird daher für die Situation in Deutschland angesetzt (s. Kapitel 4.1). Zudem werden Datensätze für deutsche Stromerzeugungsanlagen verwendet. Für die Bilanzierung global gehandelter Güter (z. B. Metalle) werden im Allgemeinen gemeinen die globalen MarktmiXe herangezogen, teilweise mit spezifischem Bezug auf die Situation in Europa. .

3.3.3. Zeitrepräsentativität

Die im Rahmen dieser Studie ökobilanziell bewerteten Routen beziehen sich auf das Jahr 2018 sowie anhand der Untersuchung von möglichen Entwicklungen im Stromsektor im Ausblick auf die Jahre 2030 bzw. 2050. Diese LCA hat einen prospektiven Charakter, da sie zukünftige Prozesse abzubilden versucht, die so zurzeit nicht existieren. Hierbei werden keine Veränderungen über die gesamte Lebensdauer von Anlagen, Fahrzeugen usw. berücksichtigt, sondern jeweils eine punktuelle Betrachtung für das Bezugsjahr.

Die primären Daten für die OME-Synthese, die CO₂-Abscheidung und die PEM-Elektrolyse stammen aus Pilot- und Laborversuchen und Modellierungen der involvierten Projektpartner aus den Jahren 2016 bis 2019. Datensätze aus ecoinvent v3.5 stammen aus den letzten 10 Jahren.

Die Unsicherheit der Daten bewegt sich im üblichen Rahmen und unterscheidet sich je nach Elementarfluss.

3.4. Allokation

Unter **Allokation** werden bei der Durchführung von Ökobilanzen Zuordnungsverfahren verstanden, die dann erforderlich sind, wenn bei Prozessen mehrere verwertbare Produkte erzeugt werden, aber nur ein Teil der Produkte in dem betrachteten ökobilanziellen System genutzt wird. Sie wird immer dann durchgeführt, wenn eine Systemerweiterung aus praktischen Gründen nicht möglich ist. Klassische Beispiele für Allokationen sind der Chloralkaliprozess oder die Erdölraffination. So werden in der Erdölraffination aus dem Hauptinput Erdöl viele Raffinerieprodukte wie Benzin und Diesel, aber auch Naphtha, schweres Heizöl und andere erzeugt. Bei der Raffinerie werden aufgrund der Komplexität die gesamten ökologischen Aufwendungen anteilig auf die Gesamtprodukte anhand eines Kriteriums umgelegt, z. B. über den Heizwert. Dieses Verfahren ist allgemein akzeptiert und entspricht der ISO-Norm, indem einer Allokation nach physikalischen Größen der Vorzug gegeben wird [ISO 2006, ISO 2018].

In der vorliegenden Ökobilanz wird bei den Vordergrundprozessen im Basisfall, wo eine CO₂-Bereitstellung durch Abscheidung aus der Luft angenommen wird, keine Allokation nötig. Gegenüber der CO₂-Abscheidung aus der Luft ist die Verwendung von CO₂ aus industriellen Punktquellen aus energetischer Sicht attraktiv aufgrund der höheren Konzentration von CO₂ in den Abgasen (s. Sensitivitätsanalyse in Kapitel 8.2.2.2). In diesem Fall wird jedoch zur Bestimmung der Umweltwirkungen des als Rohstoff verwendeten CO₂ eine Allokationsentscheidung nötig. Diese Entscheidung kann einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis haben und muss daher transparent dargestellt werden. Daher wird im folgenden Abschnitt gesondert darauf eingegangen. Die Allokationsentscheidungen, die den Hintergrunddaten zugrunde liegen, sind der Dokumentation von ecoinvent zu entnehmen [ecoinvent 3.5].

3.4.1. CO₂-Allokation bei Nutzung von CO₂ aus industriellen Punktquellen

Eine Diskussion möglicher Vorgehensweisen bei der Bewertung von Umweltauswirkungen für den Fall, dass in einem PtX-Prozess CO₂ genutzt wird, das aus einem vorgelagerten Prozess emittiert und abgeschieden wurde (Carbon Capture and Usage, CCU), findet sich auch in der [Roadmap 2.0] und wird im Folgenden mit Hinblick auf die Frage der Allokation wiedergegeben. Wenn in einem PtX-Prozess CO₂ aus einem biomasse-verwertenden Prozess, z. B. einer Biogas-Anlage, oder aus fossilen/geogenen industriellen Punktquellen verwendet wird, dann sind diese PtX-Produktionsprozesse Teil einer Gesamt-Prozesskette, im Rahmen derer mehrere Produkte hergestellt werden, z. B. Wärme und Strom aus der Biogasanlage + PtX-Produkt oder Zement + PtX-Produkt bei Verwendung von CO₂ aus einem Zementwerk.

Nach ISO 14040/14044 [ISO 2006, ISO 2018] soll eine Allokation der Umweltwirkungen möglichst durch Entkopplung der Prozesse oder Systemraumerweiterung vermieden werden. Bei CCU sind die Prozesse jedoch inhärent gekoppelt und in der vorliegenden Ökobilanz sollen die spezifischen Umweltwirkungen von strombasiertem OME ausgewiesen werden. Eine Systemraumerweiterung kommt daher nicht in Frage, da die funktionelle Einheit dann beispielsweise „Produktion von 1 MJ OME und x kg Zement“ wäre.

Neben der Frage der Aufteilung der Umweltwirkungen aus dem ersten CO₂-erzeugenden Prozess und der CO₂-Abscheidung geht es bei der Allokation insbesondere um die Frage der Anrechnung des abgeschiedenen und somit an der ersten Anlage nicht emittierten CO₂. Biogene CO₂-Punktquellen sollten den gleichen Allokationsregeln wie fossile folgen, jedoch sollte zusätzlich die CO₂-Aufnahme aus der Luft während des Pflanzenwachstums berücksichtigt werden.

Zur Allokation der Umweltwirkungen bei CCU werden im Folgenden drei Optionen vorgestellt, die aus ökobilanzieller Sicht in Frage kommen:

1. CO₂ wird als „Abfall zur Beseitigung“ angesehen, damit wäre die Nettolast beim Industrieprozess: Der Industrieprozess bekommt die volle Emission angerechnet, die der endgültigen Freisetzung am Ende des PtX Prozesses entspricht, der PtX-Prozess bekommt die vermiedene Emission angerechnet (-1 kg CO₂/kg CO₂), am Lebensende wird dieses CO₂ rechnerisch nicht mehr emittiert (**100:0-Allokation**).
2. CO₂ wird als „Abfall zur Verwertung“ angesehen, damit kann in Anlehnung an Bilanzen der Abfallwirtschaft eine **50:50-Allokation** definiert werden.
3. CO₂ wird als „Co-Produkt“ des vorgelagerten Industrieprozesses angesehen, damit würde die Emission des CO₂ vollständig der Nutzung des PtX-Kraftstoffs im Fahrzeug angerechnet, da hier das CO₂ tatsächlich emittiert wird (**0:100-Allokation**). Als Co-produkt nimmt es zudem noch zuallozierte Umweltwirkungen des ersten Prozesses (inkl. der CO₂-Abscheidung und –Aufreinigung) mit. Die direkten Emissionen des Industrieprozesses vermindern sich entsprechend um die abgeschiedene CO₂-Menge.

Ein wichtiger Parameter für die Wahl des Bilanzierungsansatzes ist dabei der Grad der Dekarbonisierung des Produktionssystems, da die emittierte Menge an CO₂ im Vergleich zur Nachfrage nach CO₂ als Rohstoff die Unterscheidung zwischen Abfall zur Beseitigung, Abfall zur Verwertung und Koppelprodukt beeinflusst.

Option 1: Bilanzierungsansatz bei Einstufung von CO₂ als Abfall zur Beseitigung

Wenn CO₂ abgeschieden wird, das einem Industrieprozess entstammt, ist die Verwendung dieses CO₂ in einem PtX-Prozess unter heutigen Bedingungen tendenziell als eine Weiternutzung eines Abfalls einzuordnen. CO₂ (im Abgas) geht somit als Abfall lastenfrem in die Bilanz des PtX-Prozesses ein. Die CO₂-Abscheidung gehört dann im Allgemeinen zum PtX-Prozess (außer in dem Fall, dass die CO₂-Abtrennung bereits nötig ist, um ein vermarktbare Produkt aus dem ersten Prozess zu erhalten, z. B. Ethylenoxidherstellung, Gichtgasrückführung im Hochofen). Dem Produkt aus dem ersten Industrieprozess werden die vollständigen Umweltwirkungen dieses Industrieprozesses zugeordnet (direkte Emissionen aus dem Prozess, Vorketten sowie die Emission des CO₂) zugeordnet.

Option 2: Bilanzierungsansatz bei Einstufung von CO₂ als Abfall zur Verwertung

Bei der Betrachtung von CO₂ als „Abfall zur Verwertung“ handelt es sich um ein open-loop-Recycling, da eine Veränderung der inhärenten Materialeigenschaften auftritt und das CO₂ in einem anderen Produktsystem wiederverwertet wird. Gemeinsam benutzte Prozessmodule müssen alloziert werden. Bei dieser Betrachtung stiftet das rezyklierte Material einen Nutzen in zwei

Produktsystemen und dieser Nutzen kann gleichmäßig zwischen den zwei Teilsystemen aufgeteilt werden: 50-50 Allokation. Dabei wird nicht nur der Prozess betrachtet, der das CO₂ freisetzt, sondern es werden ebenso die Lasten aus gemeinsam genutzten vor- und nachgelagerten Prozessen aufgeteilt. Dadurch wird auch sichergestellt, dass bei biogenen Kohlenstoffquellen die CO₂-Aufnahme während des Pflanzenwachstums anteilig beiden Teilsystemen angerechnet wird, so dass biogene und fossile Ströme nach der gleichen Methodik behandelt werden können.

Zur Allokation muss unterschieden werden zwischen Prozessen, die nur dem ersten System dienen, Prozessen, die nur dem zweiten System dienen und Prozessen, die beiden Systemen gleichermaßen dienen. Nur letztere sind gleichmäßig zwischen beiden Systemen aufzuteilen. Beispielsweise stellt sich die Frage, ob die Lasten aus der CO₂-Abtrennung und Reinigung nur dem PtX-System zuzuordnen sind. Wenn die Aufteilung der direkten CO₂-Emissionen aus dem Industrieprozess als Nutzen für diesen interpretiert wird, kann argumentiert werden, dass von der Weiternutzung des CO₂ beide Teilsysteme profitieren. Vor diesem Hintergrund wurden in der Sensitivitätsanalyse zu CCU in Kapitel 8.2.2.2 auch die Umweltwirkungen der CO₂-Abscheidung und -Aufreinigung in die Allokation miteinbezogen.

Option 3: Bilanzierungsansatz bei Einstufung von CO₂ als Koppelprodukt

Wenn im Laufe der Dekarbonisierung die CO₂-Emissionen insbesondere durch den Verzicht auf die Nutzung fossiler Energie-/Kohlenstoffträger sehr stark zurückgehen, dann wird deutlich weniger CO₂ aus Industrieanlagen zur Verfügung stehen. Falls eine Situation entsteht, in der konzentriertes CO₂ als ein vollwertiges Koppelprodukt angesehen werden kann, werden die CO₂-liefernden Prozesse zu Multi-Output-Prozessen, deren Lasten auf das ursprüngliche Produkt und das vermarktbarere CO₂ aufgeteilt werden müssen. Die Emission des abgeschiedenen CO₂ kann jetzt nicht mehr dem Industrieprozess angelastet werden. Stattdessen wird sie dort angerechnet, wo sie entsteht, das heißt am Fahrzeug. Andererseits muss in diesem Fall der gesamte vorgelagerte Industrieprozess auf die Koppelprodukte alloziert werden, z. B. nach ökonomischem Wert. Damit bekommt das CO₂ eine Teillast aus dem Industrieprozess angerechnet.

Für die beiden ersten Optionen wird der Effekt der Wahl der Allokationsmethodik in der in Kapitel 8.2.2.2 beschriebenen Sensitivitätsanalyse beispielhaft für die Nutzung von CO₂ aus einem Zementwerk aufgezeigt. In allen Fällen muss sichergestellt sein, dass die Summe aller CO₂-Emissionen in der Gesamtbetrachtung voll berücksichtigt bleibt und nicht durch die Anwendung der Allokationsmethodik für die Summe der beiden Teilsysteme rein rechnerisch verschwindet.

3.4.2. Allokation bei Literaturdaten

Die **Literaturdaten** bestehen aus im Wesentlichen aus Datensätzen, die aus der Datenbank ecoinvent v3.5 übernommen wurden, für die in einigen Fällen bereits Allokationen vorgenommen worden sind. Sie können der entsprechenden Dokumentation in ecoinvent v3.5 entnommen werden.

3.5. Wirkungskategorien

Von den einzelnen Schritten der OME-Produktion und –Nutzung können unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt ausgehen. Diese möglichen Auswirkungen sind bei der Schadstoffbewertung in der Wirkungsabschätzung zu berücksichtigen. Die Aufgabe der Wirkungsabschätzung ist es, die in der Sachbilanz erhobenen Daten in Hinblick auf bestimmte Umweltauswirkungen, sogenannte Wirkungskategorien, zu untersuchen und damit zusätzliche Informationen zu liefern, die in die Bewertung einfließen.

Der Guide zum Product Environmental Footprint (PEF) [EC 2013] führt folgende Standardwirkungskategorien auf: Klimaänderung, Abbau der Ozonschicht, Ökotoxizität – Süßwasser, Humantoxizität - kanzerogene Folgen, Humantoxizität - nichtkanzerogene Folgen, Feinstaub/anorganische Emissionen, Ionisierende Strahlung - Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Fotochemische Bildung von Ozon, Versauerung, Eutrophierung – Land, Eutrophierung – Wasser, Ressourcenerschöpfung – Wasser, Ressourcenerschöpfung – mineralisch, fossil, Landnutzungsänderungen

Das International Reference Life Cycle Data-Handbuch [ILCD 2010] empfiehlt nachfolgende Wirkungskategorien: Climate change, (Stratospheric) Ozone depletion, Human toxicity, Respiratory inorganics, ionizing radiation, (Ground-level) Photochemical ozone formation, Acidification (land and water), Eutrophication (land and water), Ecotoxicity, Land use, Resource depletion (minerals, fossil and renewable energy resources, water).

Weitere Wirkungskategorien sind z. B. Geruchsbelästigung, Lärm, Belastung am Arbeitsplatz, Abwärme und Abfallaufkommen, Bedrohung von Naturschönheit und -vielfalt [UBA 1995].

Bezüglich der zu betrachtenden Wirkungskategorien führt die Fachliteratur aus: „Da ISO 14044 keine feste Liste von Wirkungskategorien vorgibt, nicht einmal eine Empfehlungsliste, obliegt die Auswahl der Kategorien den Erstellern der Ökobilanz.“ [Klöpffer 2009]

In Anpassung an die Thematik und die bestehenden Fragestellungen haben sich die Projektpartner für die Bewertungen der Power-to-X-Anwendungen im Rahmen der Roadmap [Roadmap 1.0, Roadmap 2.0] auf [ReCiPe 2016] als Methode zur Wirkungsabschätzung geeinigt. Die Daten für die Fahrzeugherstellung wurden mit Ausnahme des SOP mit [ReCiPe 2008] bewertet. Da die Kategorien POCP und PM10 in den beiden ReCiPe-Versionen unterschiedlich berechnet wurden, wurde in dieser Studie [ReCiPe 2008] für POCP und PM10 verwendet, während die anderen Wirkungskategorien mit [ReCiPe 2008] bewertet wurden.

ReCiPe ermöglicht eine kombinierte Auswertung der Ergebnisse mit der CML-2001 Methode sowie der Eco-Indicator 99 Methode [ReCiPe 2013]. Bei der CML-2001 Methode erfolgt die Wirkungsabschätzung auf midpoint-Ebene, d. h. in der Mitte der Wirkungskette. Die problemorientierten midpoint-Wirkungsindikatorenergebnisse haben den Vorteil einer höheren Datensicherheit und enthalten keine Normierung bzw. Gewichtung. Bei der Eco-indicator 99 Methode [Goedkoop/Spriensma 1999] werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung auf endpoint-Ebene, d.h. am Ende der Wirkungskette betrachtet. Die Ergebnisse der endpoint-Wirkungsindikatoren werden mit schadensbasierter Gewichtung ermittelt und haben eine größere Umweltrelevanz (vgl. [Guinée et al. 2001], S. 142).

In [ReCiPe 2016] werden Ergebnisse für 18 Midpointkategorien und drei Endpointkategorien berechnet. Die drei Endpointkategorien beziehen sich auf die drei Schutzziele an denen Schaden verursacht werden: Menschliche Gesundheit, Ökosystemvielfalt und Ressourcenverfügbarkeit.

Zu den 18 Midpoint-Kategorien zählen:

- Klimaänderung
- Ozonabbau
- Terrestrische Versauerung
- Frischwasser-und Meerwasser Eutrophierung
- Humantoxizität
- Photochemische Ozonbildung
- PM-10 (Feinstaub)

- Terrestrische und Frisch- und Meerwasser-Ökotoxizität
- Ionisierende Strahlung
- Landwirtschaftliche und urbane Landnutzung
- Landtransformation
- Wasserverbrauch
- Verbrauch mineralischer Ressourcen
- Verbrauch fossiler Brennstoffe

Folgende Midpointkategorien wurden für diese Studie ausgewählt: Treibhauspotenzial (GWP), Verbrauch mineralischer Ressourcen (SOP), Eutrophierungspotenzial (EP), Versauerungspotenzial (AP) und Photochemisches Oxidationbildungspotenzial (POCP). Weiterhin wurden Partikelemission mittels des Indikator PM10 bewertet sowie der Kumulierte Energieaufwand (KEA_{renewable} bzw. KEA_{non-renewable}) bewertet.

Die Berechnung des **Treibhauspotenzials** (GWP) in Form von CO₂-Äquivalenten wird allgemein anerkannt. Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für klimawirksame Substanzen errechnet und fortschreibt. Bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten wird die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt; daher stellt sich die Frage, welcher Zeitraum der Klimamodellrechnung für die Zwecke der Ökobilanz verwendet werden soll. ISO TS 14067 [ISO 2013] legt die Modellierung auf der 100-Jahre-Basis fest. Die in den Berechnungen des Treibhauspotenzials berücksichtigten Substanzen werden mit ihren CO₂-Äquivalenzwerten nach [ReCiPe 2016] bewertet.

Für den Verbrauch an **abiotischen Ressourcen mineralischen Typs** steht in [ReCiPe 2016] der Wirkungsparameter Mineral resource scarcity (Surplus Ore Potential, SOP), gemessen in Kupfer-Äquivalenten, zur Verfügung.

Die **Eutrophierung** steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß, sowohl für Gewässer als auch für Böden. Im vorliegenden Projektzusammenhang wird der Nährstoffeintrag über Luft und Wasser (bzw. Boden) betrachtet. Das Eutrophierungspotenzial (EP, hier: fresh water eutrophication) von Nährstoffemissionen wird hierbei durch die Aggregation von Phosphor-Äquivalenten nach [ReCiPe 2016] ermittelt.

Eine **Versauerung** kann ebenfalls sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich sind die Emissionen säurebildender Abgase. Die Berechnung des Versauerungspotenzials (AP) erfolgt in Form von SO₂-Äquivalenten mit den Charakterisierungsfaktoren nach [ReCiPe 2016].

Die Wirkungskategorie **Photooxidantien** (Photochemical Ozone Creation Potential, Photo-chemisches Oxidationbildungspotenzial, POCP) bildet die Entstehung von Sommersmog oder bodennahem Ozon ab. Ozon führt zu Wald- und Vegetationsschäden. In höheren Konzentrationen ist es humantoxisch (Reizung der Atmungsorgane, Asthma, Husten und Augenreizung) [Schmid 2006]. Die Ozonbildung ist ein komplexer Prozess, bei dem den Kohlenwasserstoffen ein Ozonbildungspotenzial zugewiesen werden kann. Genaue Potenziale gelten nur für eine definierte Umgebung mit einer bestimmten Lichtintensität, einer bestimmten NO_x-Konzentration und definierten meteorologischen Bedingungen. In der Ökobilanzierung werden als Mittelwerte die Wirkfaktoren nach [ReCiPe 2008] angesetzt, die auf 1 kg NMVOC-Äquivalent bezogen werden.

Die **Partikelemissionen** wurden mit dem Indikator PM10 nach [ReCiPe 2008] bewertet.

Der **Verbrauch an energetischen Ressourcen** wird über den Kumulierten Energie-Aufwand (KEA, engl. *Cumulative Energy Demand, CED*) abgebildet. KEA ist ein Maß für den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen, die für die Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung benötigt werden. Im KEA enthalten ist auch der Energiegehalt, der im Produkt selbst enthalten ist. Der KEA weist generell alle nicht erneuerbaren und erneuerbaren energetischen Ressourcen als Primärenergiewerte aus. In der vorliegenden Ökobilanz werden mit dem KEA gesamt sowohl die nicht erneuerbaren als auch die erneuerbaren energetischen Ressourcen berücksichtigt. Zur Berechnung wird der untere Heizwert der verschiedenen Energieträger angesetzt.

Verzichtet wurde in dieser Studie auf die Wirkungskategorien Ozonabbau, Terrestrische und Meerwasser-Eutrophierung, Human- und Ökotoxizität und ionisierende Strahlung, da sie sich entweder als für die untersuchten Prozesse wenig relevant erwiesen haben (z. B. Ozonabbau, ionisierende Strahlung) oder da die Datenlage so schlecht ist, dass fundierte Aussagen nur schwer abzuleiten sind (Human- und Ökotoxizität). Eine grobe Abschätzung ergab für Human- und Ökotoxizität eine signifikante Dominanz der PKWs-Produktion, der Schwerpunkt in dieser Studie liegt aber auf den Kraftstoffen. Weiterhin wurde auf die Auswertung von Landnutzung und Wasserverbrauch verzichtet.

Die von der EU-Kommission vorgeschlagenen Indikatoren und Methoden zum Product and Organisation Environmental Footprint [EC 2014] wurde in dieser Studie nicht angewendet, da bei PEF/OEF derzeit noch Widersprüche zur ISO-Norm 14044 bestehen (siehe [Lehmann 2015]).

3.6. Methoden der Auswertung

Die Auswertung wird entsprechend der in ISO 14040/44 [ISO 2006, ISO 2018] geforderten Bestandteilen durchgeführt. Diese umfasst:

- Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzungsphasen der Ökobilanz;
- eine Beurteilung, die die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen berücksichtigt;
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen.

3.7. Einschränkungen und Verwendung

Als wesentliche Einschränkung bzgl. der Ergebnisse der vorliegenden Ökobilanzstudie ist darauf hinzuweisen, dass es sich um Verfahren handelt, die sich noch im Entwicklungsstadium befinden und die Mehrzahl der Sachbilanzdaten aus Modellierungen oder Laborversuchen abgeleitet wurden.

Für das Fahrzeug wurde nur die Nutzung in einem Fahrzeugtyp untersucht

Die generischen Sachbilanzdaten werden aus Konsistenzgründen primär aus der Datenbank ecoinvent v3.5 entnommen.

3.8. Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts

Die Art und der Aufbau des Berichts orientieren sich an den vier Phasen einer Ökobilanz (Zieldefinition, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung, Auswertung).

3.9. Konformität und kritische Prüfung

Die vorliegende Ökobilanz wurde entsprechend den einschlägigen Vorgaben der ISO 14040/14044 [ISO 2006, ISO 2018] sowie ISO TS 14071 [ISO 2013] durchgeführt. Da es sich um eine vergleichende Ökobilanz handelt, die zur Publikation vorgesehen ist, wurde wie in den Normen vorgesehen, eine kritische Prüfung durch ein Panel aus drei unabhängigen Gutachtern durchgeführt. Das Review-Panel bestand aus Fredy Dinkel (Carbotech AG), Prof. Martin Wietschel (Fraunhofer ISI) und Prof. Herbert Vogel (TU Darmstadt), die auf einschlägige und umfassende Kenntnisse und Erfahrungen in den methodischen Anforderungen an Ökobilanzen, in Modellierung von Energiesystemen bzw. in Technischer Chemie verweisen können. Die Prüfung erfolgte gemäß Abschnitt 6.2 der ISO 14044 [ISO 2018] begleitend zur Studie. Das die Prüfaussage enthaltende Gutachten wird in den Anhang des Berichtes aufgenommen.

4. Prozess

4.1. Stromvorkette

Für die Durchführung der Ökobilanzen für die im Projekt analysierten unterschiedlichen PtX Technologien werden Strommixe benötigt. Im Kopernikus-P2X-Projekt wurde jedoch keine detaillierte Modellierung des Stromsystems sowie der weiteren relevanten Sektoren durchgeführt. Aus diesem Grund wurden Strommixe aus den bestehenden öko-instituts-eigenen Modellierungsläufen zum Klimaschutzszenario KSZ 95 für eine sektorübergreifende Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen um 95 % bis 2050 bezogen auf 1990 (KSZ 95) aus der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [OEKO/ISI 2015] generiert.

Es ist zu berücksichtigen, dass nur eine detaillierte Modellierung des Strommarktes inklusive der angedockten Sektoren und insbesondere inklusive der Abbildung des europäischen Stromaustausches der Bewertung eines relevanten Anstiegs der Stromnachfrage auf Grund von PtX-Anlagen gerecht werden kann. Da eine solche Modellierung in diesem Projekt nicht vorgesehen war, konnten die Strommixe nur unter der Annahme entwickelt werden, dass der modellierte PtX-Einsatz in Deutschland zu keinen Änderungen in den angrenzenden Sektoren und im EU-Ausland führt im Vergleich zu den Original-Modellierungen führt.

Um ein Bild von den Auswirkungen einer zusätzlichen Stromnachfrage durch PtX-Anlagen, insbesondere durch Elektrolyseure, auf den Strommix zu erhalten, wurden unterschiedliche illustrative PtX-Einsatzfälle entwickelt:

- *PtX zu Forschungszwecken*: Die zusätzliche Stromnachfrage durch PtX-Anlagen ist marginal und beeinflusst das Stromsystem nicht wesentlich.
- *Ungeplanter PtX Rollout – flexibel*: Die PtX-Stromnachfrage nimmt beschleunigt zu, der EE-Ausbau folgt diesem zusätzlichen Bedarf nicht. Die Elektrolyseure sind mit einem Speicher ausgerüstet, so dass die Anlagen begrenzt flexibel auf den Strompreis² reagieren können. Dieser Einsatzfall wurde modelltechnisch dadurch erfasst, dass für das Jahr 2030 im KSZ 95 eine PtX-Nachfrage von 120 bis 140 TWh angesetzt wurde, jedoch ohne den EE-Ausbau entsprechend nachzuführen.

² Eine Orientierung des Anlagenbetriebs am Strompreis bedeutet, dass die PtX-Anlagen vorzugsweise dann in Betrieb gehen, wenn der Strompreis niedrig ist. Somit führt diese Betriebsweise insbesondere in Systemen mit hohen EE-Anteilen zu einer vermehrten Integration von Strom aus Erneuerbaren Energien.

- *Erneuerbarer PtX-Rollout – flexibel:* Entsprechend der PtX-Stromnachfrage werden EE-Erzeugungsanlagen zugebaut, so dass der EE-Ausbaukorridor gemäß § 1 EEG nicht unterschritten wird. Die Elektrolyseure sind mit einem Speicher ausgerüstet, so dass die Anlagen begrenzt flexibel auf den Strompreis reagieren können. Dieser Einsatzfall wurde modelltechnisch dadurch erfasst, dass die ohnehin im KSZ95 enthaltene PtX-Nachfrage von ca. 120 bis 140 TWh beibehalten wird. Es wurde allerdings zusätzlich unterstellt, dass aufgrund ökonomischer Überlegungen eine Vollaststundenzahl von ca. 5000 Stunden realisiert wird.
- *Erneuerbarer PtX-Rollout – unflexibel:* Entsprechend der PtX-Stromnachfrage werden EE-Erzeugungsanlagen zugebaut, so dass der EE-Ausbaukorridor nicht unterschritten wird. Die Elektrolyseure orientieren sich nicht an dem Strompreis, d.h. sie laufen im Vollastbetrieb.

Für die Berechnung der Strommixe wurden bestehende Modellierungsläufe des Klimaschutzszenarios (KSZ) 95 genutzt und zum Teil um eine PtX-Stromnachfrage erweitert.

Tabelle 4-1: Beschreibung der betrachteten PtX-Einsatzfälle und der relevanten Eingangsgrößen für die Modellierung

	PtX zu Forschungszwecken	ungeplanter PtX- Rollout - flexibel	erneuerbarer PtX-Rollout - flexibel	erneuerbarer PtX-Rollout - unflexibel
Annahmen zum EE-Ausbau	Nur marginale PtX-Stromnachfrage, welche sich nicht wesentlich auf die Stromerzeugung auswirkt. EE-Anlagen werden nicht zugebaut.	Die PtX-Stromnachfrage nimmt beschleunigt zu, der EE-Ausbau folgt diesem zusätzlichen Bedarf nicht.	Entsprechend der PtX-Stromnachfrage werden EE-Erzeugungsanlagen zugebaut, so dass der EE-Ausbaukorridor nicht unterschritten wird.	Entsprechend der PtX-Stromnachfrage werden EE-Erzeugungsanlagen zugebaut, so dass der EE-Ausbaukorridor nicht unterschritten wird.
Annahmen zur Flexibilität der Elektrolyseure		Durch vorhandene Wasserstoffspeicher können die Elektrolyseure begrenzt flexibel auf den Strompreis reagieren. ³	Durch vorhandene Wasserstoffspeicher können die Elektrolyseure begrenzt flexibel auf den Strompreis reagieren.	Die Elektrolyseure reagieren nicht flexibel auf den Strompreis, sondern laufen im Vollastbetrieb.
Zeithorizont	2030	2030	2050	2050

Quelle: Eigene Darstellung

Die folgende Tabelle erläutert mögliche Methoden zur Ermittlung des der jeweiligen Stromnachfrage zugrundeliegenden Anlagenparks/Technologiemix der Stromerzeugung.

³ Dazu können sie unter Berücksichtigung einer Obergrenze gemäß der installierten Leistung (ca. 30 GW) ihre Momentanleistung stündlich anpassen. Ein ausreichend großer Wasserstoffspeicher (auf Basis des Erdgasnetzes) führt dazu, dass die Flexibilität der Fahrweise der Elektrolyseure nicht durch die Wasserstoffabnahme begrenzt ist.

Durchschnittsbetrachtung Stromerzeugung	Die ermittelten gesamten CO ₂ -Emissionen werden ins Verhältnis zur gesamten Stromerzeugung gesetzt, so dass jede produzierte MWh Strom den identischen Emissionsfaktor zugerechnet bekommt. Diese Methodik führt dazu, dass sich eine mögliche Veränderung der durchschnittlichen Emissionen im Stromsektor, die aufgrund der PtX-Nachfrage eintritt, gleichmäßig auf die Emissionen aller Verbrauchssektoren (z. B. Haushalte und gewerbliche Verbraucher) auswirkt.
Durchschnittsbetrachtung Stromerzeugung (nur in Stunden mit PtX-Betrieb)	Das Verfahren entspricht der Durchschnittsbetrachtung mit der Einschränkung, dass ausschließlich die Stunden in Betracht gezogen werden, in denen Strom für PtX-Anwendungen bezogen wird. Das Verfahren bildet die Effekte der PtX-Anwendung etwas genauer ab, führt aber weiterhin zu einer Beeinflussung der CO ₂ -Bilanz anderer Verbraucher.
Grenzbetrachtung	Diese Betrachtung geht von der Perspektive aus, dass einem Stromsystem die PtX-Nachfrage als zusätzliche Stromnachfrage hinzugefügt wird. Die Veränderung der Stromerzeugung gegenüber einem Referenzfall ohne die zusätzliche Stromnachfrage wird vollständig der PtX-Nachfrage zugeordnet. Die CO ₂ -Bilanz der anderen Verbraucher wird durch die zusätzliche Stromnachfrage nicht verändert.

Werden PtX-Anwendungen nur im kleinen Maßstab eingesetzt (z. B. zu Forschungszwecken), beeinflussen sie die Stromerzeugung nur minimal. In diesem Fall sind eine Durchschnittsbetrachtung bei der Bewertung von PtX-Anwendungen und damit eine Gleichbehandlung von PtX-Anwendungen im Vergleich zu anderen Verbrauchern angemessen. Bei einem breiten PtX-Rollout führt die damit einhergehende starke Erhöhung der Stromnachfrage jedoch zu relevanten Veränderungen in der Stromerzeugung und bei den CO₂-Emissionen. In diesem Fall kann für die stromseitige Bewertung von PtX-Anwendungen auch eine Grenzbetrachtung angewendet werden, um darzustellen, welchen Effekt ein PtX-Rollout auf die Stromerzeugung hat und welche Emissionen sich durch diese neue Technologie im Vergleich zu einem System ohne diese Technologie ergeben.

Folgende Einschränkungen sind bei der Verwendung des Strommixes zu berücksichtigen:

- Die ermittelten Strommixe und die zugehörigen Anteile der Stromerzeugungstechnologien sind szenarioabhängig, d. h. sie gelten nur unter den gesetzten Annahmen. Das Klimaschutzszenario 95 stellt ein sehr ambitioniertes Szenario dar, in dem insbesondere in 2050 hohe EE-Anteile erreicht werden und in denen sich z. B. auch die Industrie ambitioniert in Bezug auf die Erreichung von Klimaschutzziele verhält. In einem weniger ambitionierten Szenario wären die spezifischen direkten CO₂-Emissionsfaktoren deutlich größer.
- Die Anteile der Stromerzeugungstechnologien gelten zudem nur für die in Tabelle 4-2 unterstellte PtX-Stromnachfrage. Eine Verwendung der abgeleiteten Strommixe für andere PtX-Nachfragen ist methodisch unzulässig.
- Bei den Rechnungen wurden die Nettoexporte in das benachbarte Ausland fixiert. Es ist davon auszugehen, dass sich mit einer Variation der PtX-Stromnachfrage auch der Leistungsaustausch mit dem Ausland verändern würde. Hieraus können sich deutlich andere Strommixe ergeben.
- Die Ergebnisse zu den Strommixen gelten ausschließlich für eine PtX-Nachfrage in Deutschland. Für eine ökologische Bewertung von PtX-Anwendungen im Ausland sind entsprechende energie-wirtschaftliche Analysen des jeweiligen regionalen Stromsystems notwendig.

Die folgende Tabelle zeigt zentrale Kenngrößen aus der Modellierung.

Tabelle 4-2: Zentrale Modellierungsergebnisse für die unterschiedlichen Einsatzfälle

	A) PtX zu Forschungszwecken	B) ungeplanter PtX-Rollout - flexibel	C) erneuerbarer PtX-Rollout - flexibel	D) erneuerbarer PtX-Rollout - unflexibel
Zeithorizont	2030	2030	2050	2050
Gesamt-Stromerzeugung inkl. PtX [TWh]	464	585 ⁴	745	752
EE-Anteil an Stromerzeugung [%]	68	57	94	90
Volllaststunden Elektrolyseure	k. A.	5.415	5.403	8.760

Quelle: Eigene Darstellung

Für die vorliegende Ökobilanz wurde jeweils der Fall eines deutlichen Zubaus von PtX-Anlagen sowie ein eingeschränkt flexibler Betrieb der Elektrolyseure (ca. 5000 FLH) angesetzt (Tabelle 4-2 B) und C)). Für den Zeithorizont 2030 bedeutet das eine deutliche Unterschreitung des EE-Ausbaukorridors im Vergleich zu der originalen KSZ 95-Modellierung, da ohne weiteren EE-Zubau ein Roll-out von PtX-Anlagen unterstellt wird (B) „ungeplanter PtX-Rollout – flexibel“). Für den Zeithorizont 2050 ergibt sich eine geringe Veränderung durch Anpassung der unterstellten Volllaststunden (C) „erneuerbarer PtX-Rollout – flexibel). Um die Auswirkungen der Entscheidung aufzuzeigen, ob für den Strommix für die Wasserelektrolyse (1) eine Durchschnittsbetrachtung in den Stunden mit PtX-Betrieb oder (2) der Grenzstrommix (Differenz zwischen Strommodellierung mit und ohne PtX-Erzeugung) angesetzt wird, werden für die Zeithorizonte 2030 und 2050 jeweils beide Stromszenarien (1: *flexmix*, 2: *marginal*) ökobilanziell bewertet und in den Ergebnissen dargestellt. In Tabelle 4-3 sind der heutige Stromerzeugungsmix sowie die Zusammensetzung der Stromerzeugung in den Szenarien für 2030 und 2050 dargestellt. Für die heutige Situation wurde die Stromerzeugung basierend auf den Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen für das Jahr 2018 [AG Energiebilanzen 2019] verwendet. Für die CO₂-Abscheidung und die OME-Synthese wurde jeweils der Durchschnittsmix über das ganze Jahr (*mix*) verwendet.

Die Varianten „PtX zu Forschungszwecken“ und ein unflexibler PtX-Rollout 2050 (unflexibler Betrieb der Elektrolyseure) wurden in der LCA nicht betrachtet.

⁴ Abweichend vom Klimaschutzszenario wurde hier eine zusätzliche Stromnachfrage durch PtX-Anlagen unterstellt. Der EE-Ausbau wurde nicht angepasst.

Tabelle 4-3: Anlagenpark der Stromerzeugung 2018, 2030 und 2050

Energieträger / Szenario	Mix heute	E+K 2030 mix	E+K 2030 flexmix	E+K 2030 marginal	E+K 2050 mix	E+K 2050 flexmix	E+K 2050 marginal
Quelle	AG Energiebilanzen 2019	KSZ 95 zzgl. 120-140 TWh PtX	KSZ 95 zzgl. 120-140 TWh PtX	KSZ 95 zzgl. 120-140 TWh PtX	KSZ 95 EC mit ca. 5000FLH	KSZ 95 EC mit ca. 5000FLH	KSZ 95 EC mit ca. 5000FLH
Zeithorizont	2018	2030	2030	2030	2050	2050	2050
AKW [%]	11,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Braunkohle [%]	22,7	1,2	1,2	2,0	0,0	0,0	0,0
Steinkohle [%]	13,0	8,7	8,5	21,0	0,0	0,0	0,0
Laufwasser [%]	2,6	3,3	3,3	0,0	3,3	2,8	0,0
Erdgas [%]	13,0	41,4	41,1	63,0	6,1	4,4	14,0
Öl [%]	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gichtgas ⁵ [%]	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Müllverbrennung [%]	2,0	1,2	1,1	0,0	0,8	0,4	0,0
Biogas [%]	3,6	2,3	2,3	2,0	0,1	0,1	0,0
Biomasse [%]	3,6	1,5	1,5	1,0	0,1	0,1	0,0
Photovoltaik [%]	7,2	9,4	9,7	0,0	16,6	16,5	0,0
Wind offshore [%]	3,0	8,5	8,6	8,0	20,7	20,7	52,0
Wind onshore [%]	14,4	22,1	22,4	2,0	52,3	55,0	34,0

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 4-4 zeigt die für die Modellierung verwendeten ecoinvent-Datensätze nach Energieträger. Die Gesamt-Netzverluste wurden für alle Jahre mit 4 % angesetzt.

⁵ Vereinfachend abgeschätzt nach den Angaben für „sonstige Gase“ (AG Energiebilanzen 2019)

Tabelle 4-4: Verwendete ecoinvent-Datensätze nach Energieträger

Energieträger	ecoinvent-DS
Atomkraftwerk	electricity production, nuclear, pressure water reactor, [DE]
Braunkohle	electricity production, lignite [DE]
Steinkohle	electricity production, hard coal [DE]
Erdgas	electricity production, natural gas, at conventional power plant [DE]
Siedlungsabfälle	electricity, from municipal waste incineration to generic market for electricity, medium voltage [DE]
feste Biomasse	heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 [DE]
Biogas	heat and power co-generation, biogas, gas engine [DE]
Laufwasser	electricity production, hydro, run-of-river [DE]
PV	electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted [DE]
Wind onshore	electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore [DE]
Wind offshore	electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore [DE]
Gichtgas	treatment of blast furnace gas, in power plant [DE]

Quelle: Eigene Darstellung

4.2. H₂-Elektrolyse

Für die Produktion von Wasserstoff stellt das Dampfreformieren von Erdgas mit rund 70 % Wirkungsgrad und einem globalen Anteil von 48 % den gegenwärtigen Industriestandard dar (Bertuccioli et al. 2014). Die jährliche weltweite Produktion von rund 60 Millionen t Wasserstoff [Weger et al. 2017] entspricht etwa 1 % des heutigen globalen Primärenergieeintrags und rund 330 Millionen t CO₂-Emissionen.

Für die Bereitstellung von Wasserstoff bzw. Synthesegas wurden im P2X-Projekt verschiedene Elektrolyse-Routen untersucht, neben der PEM-Elektrolyse eine Niedertemperatur-Co-Elektrolyse von CO₂ zu CO und H₂ und die Hochtemperatur-Co-Elektrolyse zur Gewinnung von Synthesegas [Roadmap 1.0, Roadmap 2.0].

Für die OME_x-Synthese im Rahmen dieser Studie wurde die Wasserstoff-Produktion mittels Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM) angesetzt, die im Rahmen von Kopernikus P2X im Forschungscluster A-1 erforscht wurde. Der mittlere Systemwirkungsgrad der PEM-Elektrolyse liegt derzeit bei rund 60 % bezogen auf den unteren Heizwert (LHV) [Kopp et al. 2017, Smolinka et al. 2018, Bareiß et al. 2019], langfristig sind rund 70 % (LHV) möglich [Smolinka et al. 2018]. Die PEM-Elektrolyse ist eine bereits erprobte, vor der Kommerzialisierung stehende Technik und findet heute schon Anwendung [Töpler & Lehmann 2014]. Die angestrebten Optimierungen im Prozess betreffen vor allem die Verbesserung der Langzeitstabilität unter transientem (fluktuierendem) Betrieb, die Nutzung von Membranmaterialien mit geringerer Gaspermeation, die Entwicklung von Katalysatoren mit hoher spezifischer Aktivität, eine Verringerung der Ressourcen-limitierten Edelmetallbeladungen der Elektroden, sowie die Erhöhung des Wirkungsgrades [Roadmap 1.0]. Für die Ökobilanz des PEM-Elektrolyseurs wurden die Angaben zur Materialzusammensetzung eines Elektrolyseurs von 1 MW Leistung des Stacks zugrunde gelegt (Bareiß et al. 2019). Diesen liegt eine Container-Ausführung mit 1 MW_{el} Anschlussleistung zugrunde. Neben den Materialien für den Stack werden dabei

der Materialeinsatz für die Nebenaggregate, den Container und das Betonfundament berücksichtigt. Außerdem wird ein Standard-Niederdruckspeicher für den Wasserstoff berücksichtigt [OEKO/ZSW 2016]. Zur Bewertung der PEM-Elektrolyse für heute wird der in [Bareiß et al. 2019] angegebene heutige Materialbedarf zugrunde gelegt, für 2030 und 2050 wird mit der Abschätzung des zukünftigen Materialbedarf („near future“) gearbeitet. Die Lebenszeit der Anlage wird auf 20 Jahre angesetzt. Dabei wird berücksichtigt, dass der Stack nach 7 Jahren (heute) bzw. 10 Jahren (zukünftig) erneuert werden muss.

Für den Transport des H₂ wurde ein LKW-Transport mit einem Druckwasserstofftank über 200 km angesetzt. Der Wasserstoff-Transport wurde nach [OEKO 2012] modelliert. Ob der Wasserstoff tatsächlich zur OME-Anlage transportiert würde, ist aus ökonomischer Sicht eher fraglich, wird aber hier zur Analyse des möglichen Impacts angenommen, da die gesamte elektrische Anschlussleistung für eine nach heutigem Maßstab großtechnische OME-Produktion sehr hoch wäre. So ergibt sich bspw. bei den in der techno-ökonomischen Analyse im Kopernikus-P2X-Projekt unterstellten 200.000 Jahrestonnen OME eine Anschlussleistung von gut 500 MW (bei 5000 FLH der Elektrolyse). Es ist also ebenfalls unsicher, ob eine so hohe Leistung an einem Ort bereitgestellt werden könnte.

Tabelle 4-5 zeigt die abgeschätzte Entwicklung verschiedener Parameter der PEM-Elektrolyse über die nächsten 10 Jahre.

Tabelle 4-5: Parameter der Entwicklungsstände der PEM-Elektrolyse für die LCA

	heute	nahe Zukunft
Systemwirkungsgrad (LHV basiert)	60 %	60 %
Zellspannung	1,79 V	1,79 V
Stromdichte	1 ± 0.5 A/cm ²	3 A/cm ²
Ir Beladung (Anode)	2 mg/cm ² [2]	0,2 mg/cm ²
Platinbeladung (Kathode)	0,3 mg/cm ²	0,05 mg/cm ²
Titan Bipolarplatte	3 mm (Dicke)	0,4 ± 0,1 mm (Dicke)
Nafion (Membran)	200 µm (Dicke)	50 µm (Dicke)

Quelle: Bareiß et al. 2019

Die in dieser Ökobilanz angesetzten Bedarfe an Energie und Wasser sind in Tabelle 4-6 aufgeführt.

Tabelle 4-6: Energie- und Wasserbedarf für die PEM-Elektrolyse

	heute	2030 & 2050
Betriebsstrom (PEM-Elektrolyseur)	56 kWh/kg H ₂	48 kWh/kg H ₂
Prozesswasser	12.5 kg/kg H ₂	

Quelle: Betriebsstrom: Bareiß et al. 2019, Prozesswasser: Mittelwert basierend auf OEKO/ZSW 2016

4.3. CO₂-Vorkette

Für die CO₂-Bereitstellung stehen im Prinzip drei Quellen zur Verfügung:

- Abtrennung aus Abgasströmen biobasierter Prozesse, z. B. Biogasanlagen
- Abtrennung aus Abgasströmen industrieller Prozesse, die auf fossilen oder geogenen Kohlenstoffquellen basieren, z. B. Primärstahlwerk, Zementwerk usw.
- Abtrennung aus der Luft mittels Direct Air Capture (DAC)

Biobasierte Quellen sind mengenmäßig beschränkt und von ihrem Vorkommen her sehr stark verteilt. Um eine großtechnische OME-Anlage zu betreiben, sind kleinräumig anfallende biobasierte CO₂-Quellen kaum geeignet und werden daher in dieser Studie nicht berücksichtigt. Wenn die Vorgaben des Pariser Klimaschutzabkommens eingehalten werden, dürfen langfristig (2050 ff.) in Deutschland keine fossilen und geogenen Kohlenstoffquellen mehr existieren und somit sind auch die industriellen Punktquellen langfristig beschränkt. Aus diesem Grund wird in dieser Studie die CO₂-Bereitstellung aus Direct Air Capture als Standardvariante angesetzt. Die Nutzung von CO₂ aus Carbon Capture & Usage (CCU), d. h. aus geogen- bzw. fossilbasierten Industriequellen wird im Rahmen eine Sensitivitätsbetrachtung untersucht (vgl. Kapitel 8.2.2.2). Da der Energieaufwand und auch die derzeitigen Kosten bei DAC höher sind als die CO₂-Abscheidung aus industriellen Punktquellen kann die DAC hier als Worst-Case-Szenario angesehen werden, sofern bei der Bewertung der Nutzung von CO₂ aus einem Industrieprozess dieser eine Gutschrift für die CO₂-Abscheidung und -nachnutzung zugewiesen bekommt (siehe Kapitel 8.2.2.2).

Für die Abscheidung von CO₂ mittels DAC wird das Verfahren der Firma Climeworks angesetzt, die für das Kopernikus-P2X-Projekt Daten zur Verfügung gestellt hat, siehe Annex I.

Zur CO₂-Abscheidung aus der Luft gibt es zwei gängige Verfahren [Goepfert et al. 2012]:

- Absorption in basischen Medien (KOH, Ca(OH)₂, NaOH): CO₂ reagiert mit wässrigen Lösungen starker Basen zum entsprechenden Carbonat (K₂CO₃, Na₂CO₃, CaCO₃) mit hoher Selektivität und hoher Ausbeute (>99 %).
- Adsorption an geträgerten Organo-Aminen (Polyethylenimin [PEI], Amino-Trimethoxysilane [TRI], verzweigten Aminosilikaten [HAS]): CO₂ wird reversibel an funktionelle Amin-Gruppen (-NH₂) gebunden.

Die zweite Technologie erfordert einen deutlich geringeren Energieaufwand zur Freisetzung des adsorbierten CO₂ und ist die Grundlage für die Anlagen der Firma Climeworks. Tabelle 4-7 stellt die angesetzten Werte für den Energiebedarf der beiden Technologien dar. Sie geben den derzeitigen Stand der Forschung wieder und basieren vor allem auf Laboruntersuchungen und nur zum Teil auf laufenden Demonstrator-Anlagen. Es ist zu erwarten, dass der Energiebedarf im Laufe der Zeit durch technologischen Fortschritt abnimmt [Roadmap 1.0].

Tabelle 4-7: Energiebedarf verschiedener Technologien zur Abscheidung von CO₂ aus Luft

	Absorption (NaOH, KOH)	Adsorption (PEI, TRI)
Thermische Energie [kWh/Nm ³ CO ₂]	1,9 – 6,0 (bei 400-700 °C)	1,8 – 4,0 (bei 100 °C)
Elektrische Energie [kWh/Nm ³ CO ₂]	0,4 – 2,2	0,4 – 3,7

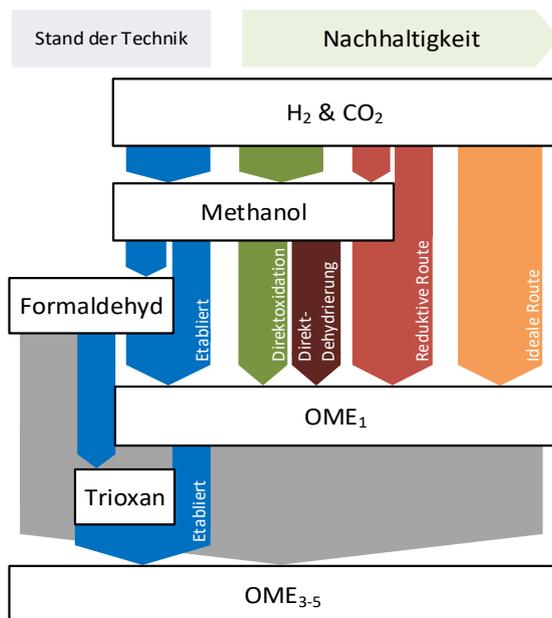
Quelle: Roadmap 1.0

Für den Transport des CO₂ nach der Abtrennung zur OME-Produktionsanlage wurde ein Pipeline-Transport über 200 km angesetzt. Der Pipeline-Transport wurde mit Angaben des Projektpartners FZ Jülich modelliert, siehe Annex I. Ob ein Transport von aus der Luft abgeschiedenem CO₂ tatsächlich nötig würde und auch, inwiefern hierzu eine Pipeline errichtet würde, ist fraglich, wurde hier aber zur Orientierung mit berücksichtigt.

4.4. OME-Synthese

Oxymethylenether lassen sich auf unterschiedlichen Routen herstellen, in der ersten Phase des Kopernikus-P2X-Projektes wurden drei verschiedene Routen für die OME_x-Synthese untersucht, die in Abbildung 4-1 abgebildet sind. Eine Beschreibung findet sich in der Roadmap 1.0 und wird im Folgenden wiedergegeben. Drei Routen wurden untersucht: etablierte Route (blau), Direktoxidation (grün) und reduktive Route (rot). Die sogenannte „ideale Route“ (orange) dient als theoretischer Vergleichsprozess und stellt den am stärksten integrierten Weg dar, in dem alle Zwischenprodukte in-situ umgesetzt werden. Die Route der direkten Dehydrierung [Wu et al. 2018] (dunkelbraun) wurde nicht untersucht.

Abbildung 4-1: Übersicht untersuchter und weiterer OME_x-Produktionsrouten



Quelle: Roadmap 1.0

Für die **etablierte Route zur Herstellung von OME₁** [Van-Dal/Bouallou 2013] wird zunächst Methanol benötigt. Die Bereitstellung von Methanol kann auf konventionellem Weg durch Synthesegas, aber auch aus CO₂ und elektrolytischem H₂ erfolgen [Pontzen et al. 2011]. Das benötigte H₂ kann durch die PEM-Elektrolyse gedeckt werden, wie in Kapitel 4.2 beschrieben. In der etablierten Route wird das als zweites Edukt benötigte Formaldehyd durch eine anteilige Oxidation von Methanol gewonnen und in der Gaswäsche mit Wasser in eine wässrige Lösung (Formalin) überführt [Reuss et al. 2012]. In einem nachgeschalteten Prozessschritt reagiert Formaldehyd mit Methanol in der Flüssigphase zu OME₁ [Weidert et al. 2017]. Als Katalysator dient ein saurer Zeolith oder ein Ionenaustauscherharz. Formalin dient zudem als Ausgangsstoff für Trioxan [Grützner et al. 2007], das für die Herstellung von OME₃₋₅ [Burger et al. 2013] aus OME₁ verwendet wird. Diese Route ist aus energetischer Sicht ungünstig, da durch die Oxidation von Methanol zu Formaldehyd die rein reduktive

Route verlassen wird. Dadurch wird in der Oxidation von Methanol Wasser produziert und somit Wasserstoff verbraucht. Zudem wird bei der Gaswäsche in der Formalin-Herstellung Wasser eingesetzt, das letztendlich wieder aus dem System entfernt werden muss. Der damit verbundene zusätzliche Energieaufwand senkt folglich den Wirkungsgrad der etablierten Route. Eine alternative Route von Methanol zu Formaldehyd existiert in Form einer direkten Dehydrierung, die auch bereits für die OME-Herstellung vorgeschlagen wurde [Ouda et al. 2018], die allerdings noch auf einem niedrigen TRL-Level (3-4) steht.

Für die Route der **Direktoxidation zur Herstellung von OME₁** [Freveld/Hedelund o. J., Fu/Shen 2007] wird Methanol ebenfalls aus CO₂ und H₂ bereitgestellt. Allerdings wird im zweiten Schritt ein Teil des Methanols *in-situ* zu Formaldehyd oxidiert und mit weiterem Methanol zu OME₁ kondensiert. Als Katalysator dient phosphatiertes V₂O₅. Dieser Prozess hat mehrere Vorteile gegenüber der etablierten Route. Zum einen wird kein zusätzliches Wasser wie in der etablierten Formaldehyd-Herstellung in den Prozess geführt, zum anderen läuft die Reaktion in der Gasphase ab. Die Gasphasenreaktion wird bevorzugt, da diese deutlich schneller abläuft als die Flüssigphasenreaktion. Außerdem verspricht die Einsparung des Prozessschritts zur Formalin-Herstellung Vorteile hinsichtlich der Kapitalkosten.

Auch in der **reduktiven Route zur Herstellung von OME₁** werden bei der Methanol-Herstellung CO₂ und H₂ als Ausgangsstoffe verwendet [Thenert et al. 2016, Deutz et al. 2018, Schieweck/Klankermayer 2017]. Allerdings wird bei dieser Route CO₂ nicht nur für die Methanol-Herstellung verwendet, sondern auch als Baustein, um über das Zwischenprodukt Methylformiat *in-situ* OME₁ zu bilden. Dies ist von Vorteil, da nicht das gesamte CO₂ bis zu Methanol reduziert werden muss. Diese Route hat aktuell den geringsten H₂-Bedarf und somit den geringsten Strombedarf für die Elektrolyse. Es entsteht dennoch bei der Reaktion Wasser, das abgetrennt werden muss. Als Katalysator dient ein Ir-Komplex.

Die sogenannte **ideale Route zur Herstellung von OME₁** beschreibt die chemisch am stärksten integrierte Syntheseroute und bezieht sich auf einen Reaktionspfad, bei dem ausgehend von CO₂ und H₂ direkt OME₁ gebildet wird. Da diese Reaktion bisher noch nicht beobachtet wurde, dient diese Route vorerst nur als theoretischer Vergleichsprozess. Ihr Reaktionspfad könnte beispielsweise über Methanol laufen, aus dem anschließend reduktiv *in-situ* Formaldehyd durch Abspaltung von H₂ entsteht. Somit würde deutlich weniger Wasser bei der Reaktion produziert werden, was die Aufreinigung der Produkte vereinfacht.

Die Route der **direkten Dehydrierung zur Herstellung von OME₁** [Wu et al. 2018] wurde im Projekt nicht experimentell untersucht und aus diesem Grund auch nicht in die Bilanzierung aufgenommen. Hierbei wird OME₁ aus einer direkten Dehydrierung von Methanol gewonnen. Da kein Wasser benötigt wird, ist der Trennaufwand deutlich niedriger als in der etablierten Route. Auch weist diese Route weniger Prozessschritte und eine bessere Gesamtstöchiometrie auf. Allerdings befindet sie sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstand.

Die **Kettenverlängerung zu OME₃₋₅** verläuft bisher nach der etablierten Route über Trioxan [Burger et al. 2013]. Da diese Route wasserfrei ist, wird die Aufreinigung der Produkte stark vereinfacht. Die Herstellung von Trioxan ist allerdings aufgrund des hohen Wärmebedarfs sehr energieaufwendig. Aktuelle Bemühungen verfolgen daher einen alternativen Weg zur Kettenverlängerung, bei dem Methanol und Formaldehyd direkt zu OME₃₋₅ umgesetzt werden. Bei dieser Reaktion entsteht jedoch Wasser, welches bei der Produktaufreinigung betrachtet werden muss.

5. Datengrundlage

Die Beschreibung der Datengrundlage wird hier nach dem entsprechenden Kapitel der [Roadmap 2.0] wiedergegeben.

Die Datengrundlage für die drei untersuchten Routen ist abhängig vom jeweiligen Entwicklungsstand und wird bei höher entwickelten Prozessschritten mit dem etablierten Prozesssimulator ASPEN Plus modelliert, bei niedrigeren TRL werden die Daten anhand von Massenbilanzen und Shortcut-Methoden [Bausa et al. 1998] zur Abschätzung des Trennaufwands generiert.

Für die etablierte Route wurde für jeden Teilprozess ein detailliertes Prozessmodell entwickelt, welches die komplexen Oligomer-Reaktionen von Formaldehyd mit Wasser und Methanol abbildet, sobald Formaldehyd im System vorhanden ist. Der Prozess für die Methanol-Herstellung, der auch Bestandteil der Direktoxidation und der reduktiven Route ist, basiert auf der direkten Umsetzung von CO_2 und H_2 zu Methanol [Burre et al. 2018]. Für diesen Prozessschritt wurde eine detaillierte Reaktionskinetik implementiert. Auch für die OME_1 - und OME_{3-5} -Synthese der etablierten Route wurde auf validierte Reaktionskinetiken zurückgegriffen [Drunsel et al. 2012; Burger et al. 2012]. Die Formaldehyd-Synthese aus Methanol verläuft nach dem BASF-Prozess partiell-oxidativ [Reuss et al. 2012] und Trioxan wird durch einen destillationsbasierten Prozess hergestellt [Grützner et al. 2007], um die aufwendige Extraktion des konventionellen Verfahrens zu umgehen.

Da sich die Direktoxidation und die reduktive Route noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, basieren die jeweiligen Modelle auf experimentellen Beobachtungen. Für die Direktoxidation wird ein Betrieb über der oberen Explosionsgrenze angenommen, in dem der zur Verfügung stehende Sauerstoff vollständig verbraucht wird, wobei die Selektivität zu OME_1 aus Laborversuchen übertragen wurde. Als Nebenprodukte können Wasser, Methylformiat, Formaldehyd, Dimethylether (DME) und Kohlenstoffoxide (CO_x) entstehen. Der Trennaufwand des Reaktionsgemisches wurde mit einer Shortcut-Methode [Bausa et al. 1998] abgeschätzt. So konnte der minimale Energiebedarf für die destillative Auftrennung berechnet werden. Da bei der reduktiven Route die Unsicherheiten über die finalen Umsätze und Selektivitäten noch hoch sind, wurde wie bei der Direktoxidation der Trennaufwand über Shortcut-Methoden [Bausa et al. 1998]. Die Kettenverlängerung von OME_1 zu OME_{3-5} mit alternativen Formaldehydquellen zu Trioxan ist Gegenstand weiterführender Arbeiten. Die Katalysatoren für die drei Routen wurden in der LCA vereinfachend weggelassen, da insbesondere für den Iridium- und den Vanadium-Katalysator bisher keine ökonomisch darstellbaren Turn-Over-Numbers realisiert werden konnten.

Der Strombedarf für die OME-Produktion wird mit dem Jahresdurchschnittsmix angesetzt (siehe Kapitel 4.1), da davon auszugehen wird, dass die OME-Synthese nicht flexibel gefahren wird. Für die Wärmebereitstellung wird bei einer vollständigen Wärmeintegration die Nutzung einer Wärmepumpe angenommen (bis 105°C , Realwirkungsgrad 60%, COP ca. 2,5-2,8). Eine solche Wärmepumpe ist heute bereits technisch möglich, aber noch nicht kommerziell verfügbar [RWTH.LTT 2019] und wird daher unter der Prämisse angesetzt, dass bei strombasierten Prozessen der Fokus zunächst auf die Minimierung der Stromnachfrage gelegt werden sollte. Für die OME_{3-5} -Synthese kommt aufgrund des hohen Temperaturniveaus der benötigten Wärme keine Wärmepumpe zum Einsatz. Tabelle 5-1 zeigt die verwendeten Werte für den Strom, Wärme- bzw. Kältebedarf der einzelnen OME-Routen.

Tabelle 5-1: Energiebedarf der OME-Routen bei vollständiger Wärmeintegration

	Einheit	OME1 etab	OME1 red	OME1 ox	OME3-5
Elektrolyse, Strom	MJ/kg OME	45	38	44	43
DAC, Strom	MJ/kg OME	3,5	3,3	3,3	3,3
DAC, Wärme als Strom	MJ/kg OME	3,9	3,8	3,8	3,7
OME, Strom	MJ/kg OME	1,4	<i>(nicht modelliert)</i>	<i>(nicht modelliert)</i>	2,5
OME, Wärme als Strom	MJ/kg OME	0,4	2,5	0	17,9
OME, Kälte als Strom	MJ/kg OME	0	0	0,83	0

Quelle: Eigene Darstellung nach RWTH Aachen SVT.AVT

Der Transport des Endprodukts OME_x zur Tankstelle wird mit einem LKW-Transport über 200 km modelliert.

Der Modellierung liegt ein Maßstab der OME-Produktionsanlage von 200.000 Jahrestonnen zugrunde. Der Anlagenbau wird ökobilanziell mit einem generischen Datensatz für Chemieanlagen bewertet.

Für die Gewinnung des Wasserstoffs wird wie in Kapitel 4.2 beschrieben eine PEM-Elektrolyse angesetzt [Bareiß et al. 2019], für die CO₂-Bereitstellung in der Standardrechnung die Abscheidung aus der Luft mittel DAC nach dem Verfahren der Firma Climeworks (vgl. Kapitel 4.3). Für den Transport des Wasserstoffs wurde ein LKW-Transport nach [OEKO 2012] über 200 km angesetzt.

Für die Elektrolyseure wird angenommen, dass sie eingeschränkt flexibel gefahren werden können. Die Stromnachfrage der Elektrolyseure wird mit jeweils zwei Stromszenarien bewertet: zum einen mit dem Durchschnittsmix in den Betriebsstunden, zum anderen mit dem Marginalstrommix (siehe Kapitel 4.1).

Der Strombedarf für die CO₂-Abscheidung wird mit dem Jahresdurchschnittsmix berechnet. Zur Bereitstellung der Prozesswärme wird wie für die OME-Synthese eine Wärmepumpe angesetzt.

Für die Nutzung im Fahrzeug wurde ein durchschnittlicher Mittelklassewagen (Golf 7 TDI) als Fahrzeug angesetzt (siehe Tabelle 5-2), für den Vergleich mit einem batterieelektrischen Fahrzeug (battery electric vehicle, BEV) in der Sensitivitätsrechnung (siehe Kapitel 8.2.2.3) ein eGolf 7 (siehe Tabelle 5-2). Die Daten für die Herstellung und Nutzung des PKWs wurden vom Projektpartner Audi zur Verfügung gestellt (siehe Tabelle 5-3) und beziehen sich auf die Bilanzierungsarbeiten von Volkswagen [VW 2019]. Werte für das Eutrophierungspotenzial und Versauerungspotenzial wurden vom Projektpartner Audi nicht zur Verfügung gestellt. Für andere Emissionen für die Werte aus dem ecoinvent-Datensatz „transport, passenger car, small size, diesel, EURO 5“ übernommen. Für die OME_x-Kraftstoffe wurden an der RWTH Aachen Einzylindertest und WLTC-Zyklusimulation durchgeführt, um die motorseitigen Emissionen zu charakterisieren. Für die ökobilanzielle Bewertung wurde daraus abgeleitet, dass die NO_x-Emissionen um 50 % gesenkt werden im Vergleich zu Diesel und keine Rußemissionen entstehen (PM 2,5 = 0). Der angesetzte Kraftstoffverbrauch beruht auf Messungen nach dem WLTC-Zyklus [Audi 2019]. Der heutige Kraftstoffverbrauch liegt somit bei 1,3 MJ Diesel/vkm und für den künftigen Verbrauch (für die Szenarien der Jahre 2030 und 2050) bei 1

MJ Diesel/km. Da die Realverbräuche heute insbesondere bei Dieselfahrzeugen deutlich höher liegen (vgl. z. B. [ICCT 2017]), wird in einer Sensitivitätsrechnung auch ein Verbrauchswert von 1,9 MJ Diesel/vkm (nach Daten des „Spritmonitors“ [Spritmonitor 2019]) betrachtet. Für die Bewertung von OME als Kraftstoff werden jeweils dieselben Verbrauchswerte verwendet.

Tabelle 5-2: Kenngrößen der Fahrzeuge

	Dieselmotor (TDI)	BEV (eGolf)
Fahrzeugklasse	Kompaktklasse (Golf)	Kompaktklasse (Golf)
Anzahl Türen [-]	5	5
Anzahl Sitze [-]	5	5
Ausstattung	Basis	Basis
DIN Leergewicht [kg]	1.173	1.537
Kraftstoff / Energie	Benzin	elektr. Energie
Tankvolumen [l]	50	
Batterie [kWh]		31,5 nutzbar
Kraftstoffverbrauch [MJ/vkm]	heute: <ul style="list-style-type: none"> • 1,3 (WLTC) • 1,9 (Realverbrauch) 2030 <ul style="list-style-type: none"> • 1 (WLTC) 	
Stromverbrauch [MJ/vkm]		heute: <ul style="list-style-type: none"> • 0,50 (WLTC) • 0,54 (Realverbrauch) 2030 <ul style="list-style-type: none"> • 0,48 (WLTC)
Getriebe	DSG 7-Gang	1-Gang Getriebe
Verbrennungsmotor	1.0 l TSI 81 kW	
Elektrischer Antrieb		100 kW 290 Nm
Reichweite NEFZ	1.084	292 _{el.}
Reichweite WLTC		253 _{el.}
Batterietyp		NMC 1-1-1 37Ah

Quelle: [Audi 2019]; Realverbräuche nach [Spritmonitor 2019]

Tabelle 5-3: Umweltwirkung der Fahrzeugherstellung

Wirkungskategorie	Einheit	Dieselmotor (TDI)	BEV (eGolf)
ReCiPe (H) Midpoint - Klimawandel	t CO ₂ -eq	5,76	11,36
ReCiPe (H) Midpoint - Photochemische Oxidation (NMVOC)	kg NMVOC-eq	17,82	36,6
ReCiPe (H) Midpoint - Feinstaubbildung	kg PM10-eq	9,88	24,4
ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Metallabbau	kg Cu Äquiv.	966	3.636
Nicht regenerierbare energetische Ressourcen (KEA fossil) - unterer Heizwert	MJ	94.976	15.0735
Regenerierbare energetische Ressourcen (KEA erneuerbar) - unterer Heizwert	MJ	57.746	11.0613

Quelle: [Audi 2019]

6. Einschätzung der Datenqualität

Die Datenqualität kann aufgrund der Datenherkunft näher diskutiert werden. Dazu können die eingesetzten Daten klassifiziert werden:

- Sekundärdaten aus validierten Datenbanken (Strom, Hilfsstoffe, Metalle etc.),
- Primärdaten von Projektteilnehmern auf Basis von etablierten Prozessen,
- Primärdaten von Projektteilnehmern auf Basis von eigenen Untersuchungen anhand von Labordaten.

Die Datenqualität von Sekundärdaten ist im Allgemeinen angemessen. Teilweise sind die Datensätze schon einige Jahre alt.

Primärdaten auf Basis von etablierten Prozessen sind im Allgemeinen ebenfalls als gut zu bezeichnen.

7. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung werden nach den drei Zeithorizonten für den Strommix geordnet: heute, 2030 und 2050. Die berücksichtigten Wirkungskategorien umfassen: GWP, SOP, AP, EP, POCP, PM10, POCP_{NMVOC}, CED_{total}.

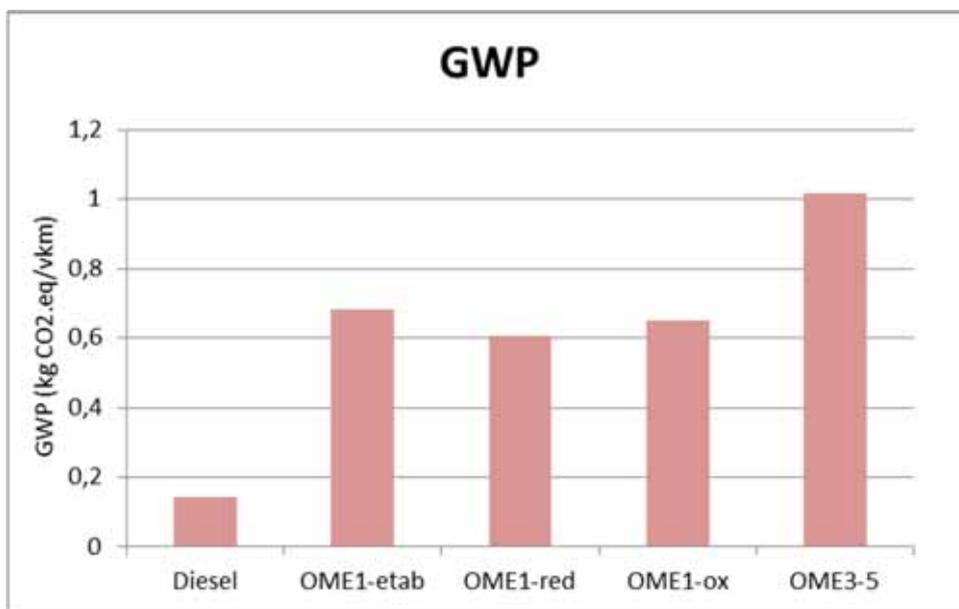
Unter Zugrunde legen des heutigen Strommixes übersteigen die Umweltwirkungen der Nutzung von strombasiertem OME die der Nutzung von fossilem Diesel bei weitem. Daher werden in Kapitel 7.1 die Ergebnisse nur nachrichtlich in aggregierter Form dargestellt. Eine differenzierte Aufteilung der Umweltwirkungen erfolgt für die Zeithorizonte 2030 und 2050 in den Kapiteln 7.2 und 7.3. Für die Diskussion zur Modellierung der Stromherkunft wird auf das Kapitel 4.1 verwiesen.

7.1. Strommix 2018

Abbildung 7-1 bis Abbildung 7-7 zeigen die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für den Strombezug des Jahres 2018 (Durchschnittsmix nach [AG Energiebilanzen 2019]). Die Zahlenwerte sind in Annex II aufgeführt. In allen Umweltwirkungen liegen die Umweltlasten der OME-Routen deutlich höher als die Dieselroute, in den meisten deutlich. Eine Aufgliederung nach Beiträgen wird für das Jahr 2018 nicht gezeigt, für die 2030 und 2050 werden die Ergebnisse detaillierter gezeigt.

7.1.1. Treibhauspotenzial (GWP)

Abbildung 7-1: GWP der OME-Routen mit Strombezug 2018

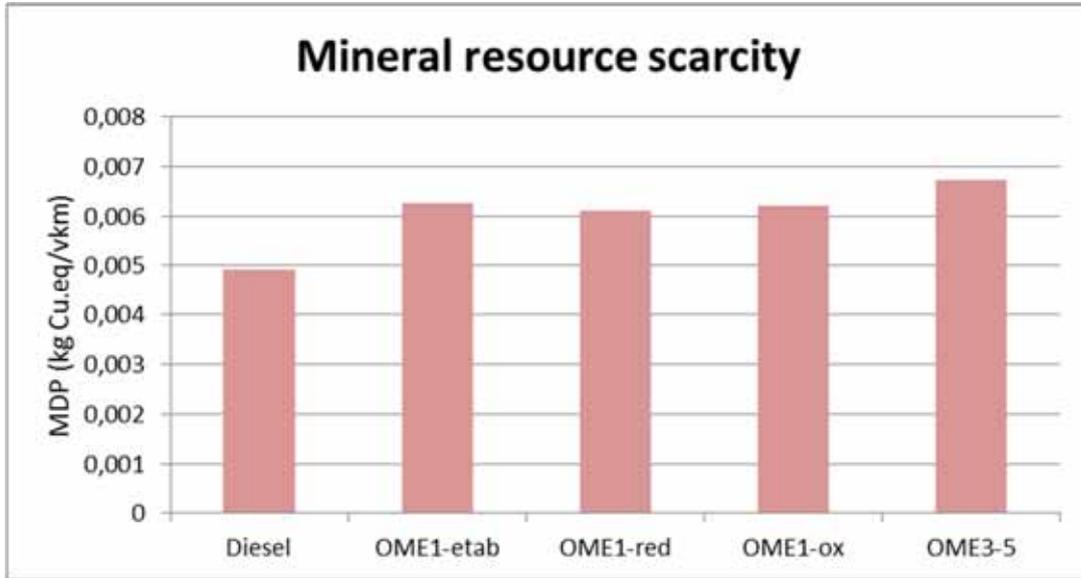


Quelle: Eigene Darstellung

Die Treibhausgasemissionen sind bei allen OME-Routen deutlich höher als höhere Lasten aufweisen als die Dieselroute. Dies liegt insbesondere am hohen Anteil fossiler Energieträger im heutigen Strommix.

7.1.2. Surplus Ore Potential (SOP)

Abbildung 7-2: SOP der OME-Routen mit Strombezug 2018

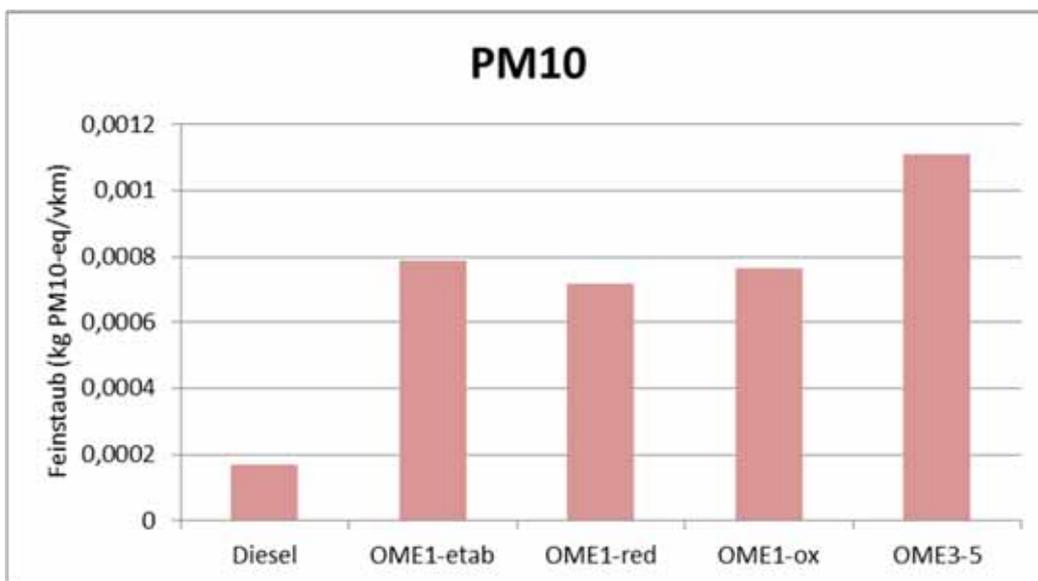


Quelle: Eigene Darstellung

Der Verbrauch mineralischer Ressourcen wird im Wesentlichen dominiert von der Fahrzeugherstellung (vgl. die detaillierte Aufstellung des SOPs für 2030 in Abbildung 7-9 und für 2050 in Abbildung 7-16). Einen geringeren Beitrag liefert die Stromvorkette.

7.1.3. Feinstaub (PM10)

Abbildung 7-3: PM10 der OME-Routen mit Strombezug 2018

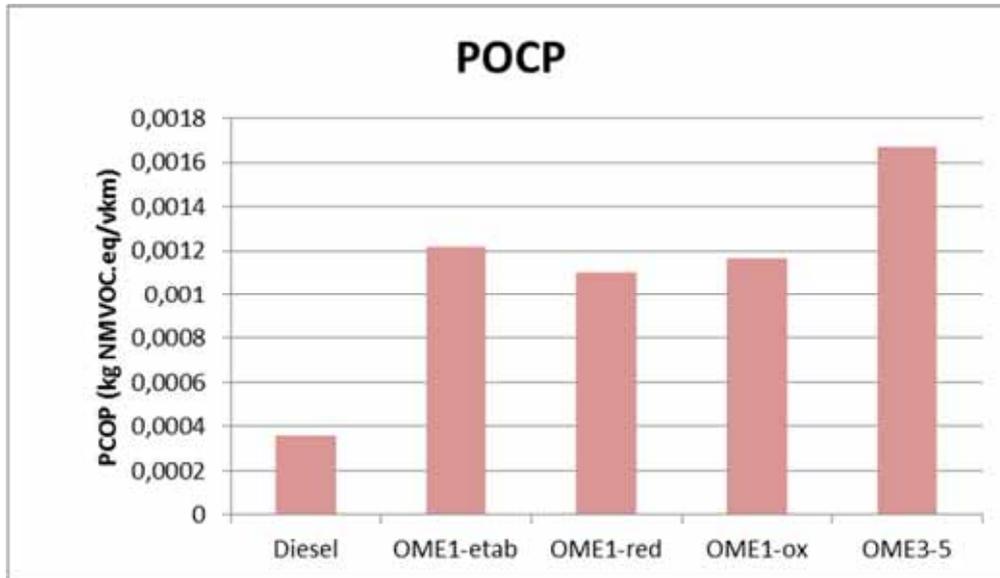


Quelle: Eigene Darstellung

Die Feinstaubemissionen (PM10) sind bei allen OME-Routen deutlich höher als diejenigen der Dieselroute. Auch hier dominiert die Stromvorkette, insbesondere die Kohleverstromung.

7.1.4. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (NMVOC)

Abbildung 7-4: POCP der OME-Routen mit Strombezug 20180

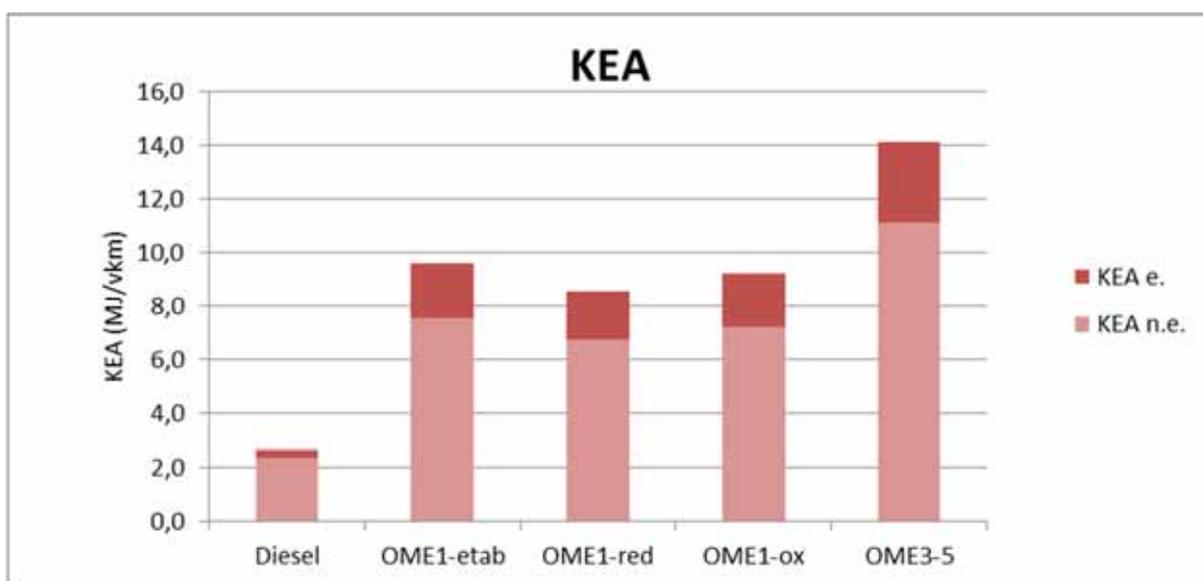


Quelle: Eigene Darstellung

Wie die anderen Umweltwirkungskategorien wird auch das POCP von der Stromvorkette dominiert, so dass die OME-Routen signifikant höhere Lasten ausweisen als die Dieselroute.

7.1.5. Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Abbildung 7-5: KEA der OME-Routen mit Strombezug 2018

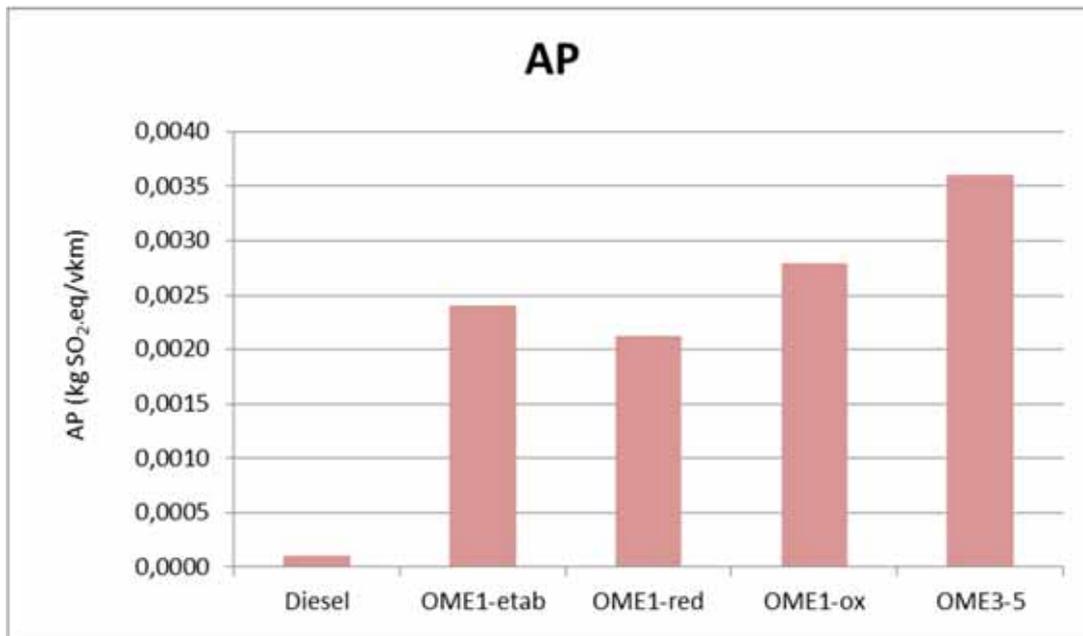


Quelle: Eigene Darstellung

Der Kumulierte Energieaufwand (KEA) wird ebenfalls dominiert von den Lasten aus der Stromvorkette. Zusätzlich zum signifikant höheren Beitrag beim nicht-erneuerbare Kumulierten Energieaufwand kommt hier noch ein deutlich höherer erneuerbarer KEA hinzu.

7.1.6. Versauerungspotenzial (AP)

Abbildung 7-6: AP der OME-Routen mit Strombezug 2018 (ohne Fahrzeugbau)

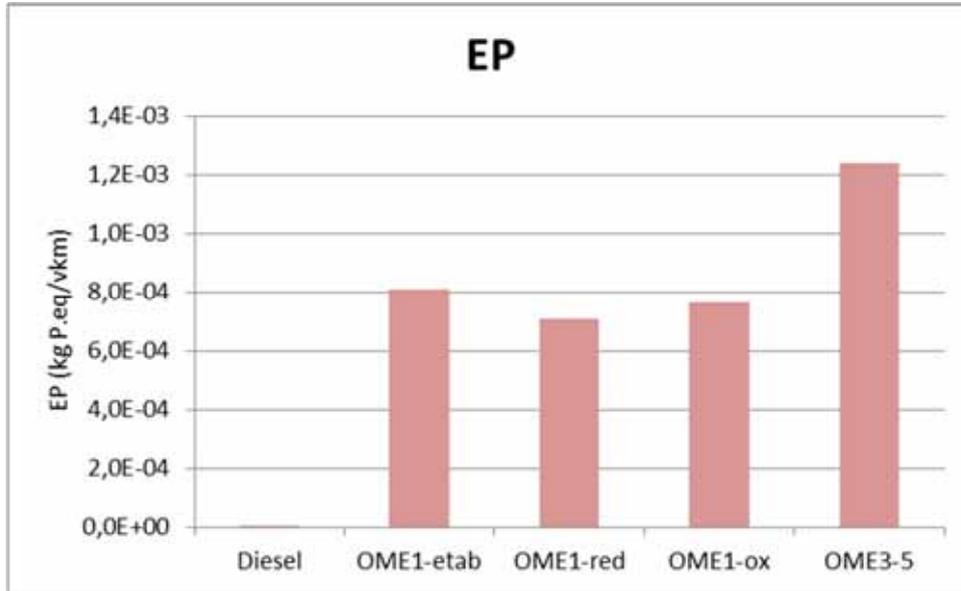


Quelle: Eigene Darstellung

Aufgrund der Datenlage konnte beim Versauerungspotenzial die Herstellung des PKWs nicht mitbewertet werden. Somit zeigen die Ergebnisse nur die Herstellung (inkl. Vorketten) und Verbrennung des Kraftstoffs. Auch hier weisen die OME-Routen deutlich höhere Lasten auf als die Diesel-Route.

7.1.7. Eutrophierungspotenzial (EP)

Abbildung 7-7: EP der OME-Routen mit Strombezug 2018 (ohne Fahrzeugbau)



Quelle: Eigene Darstellung

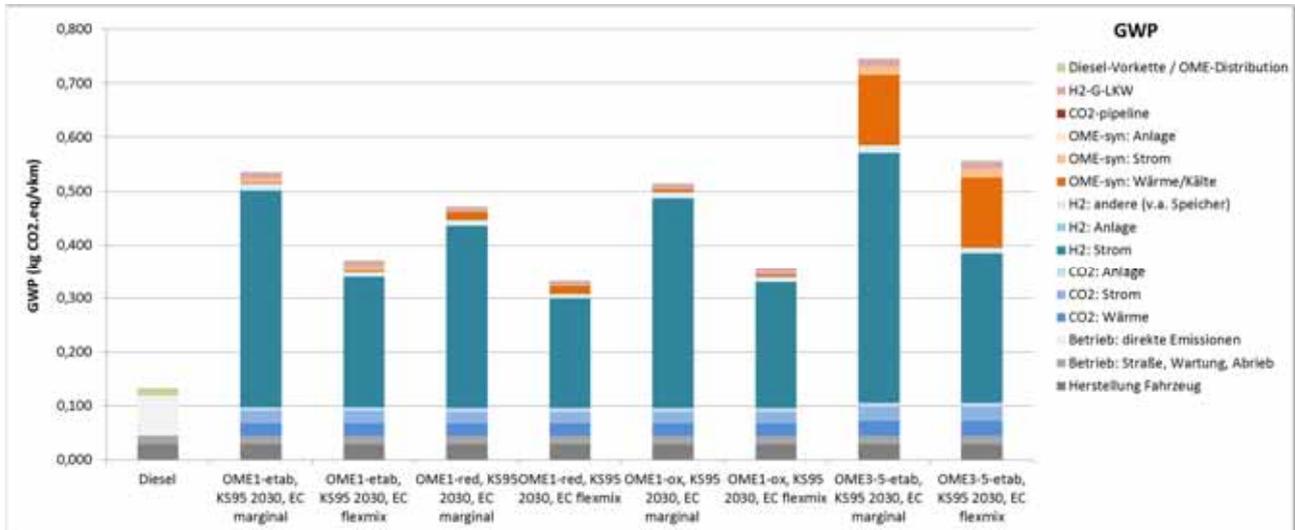
Aufgrund der Datenlage konnte beim Eutrophierungspotenzial die Herstellung des PKWs nicht mitbewertet werden. Somit zeigen die Ergebnisse nur die Herstellung (inkl. Vorketten) und Verbrennung des Kraftstoffs. Auch hier weisen die OME-Routen deutlich höhere Lasten auf als die Diesel-Route.

7.2. Strommix 2030

Abbildung 7-8 bis Abbildung 7-14 zeigen die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für den Strombezug des Jahres 2030. Die Zahlenwerte sind in Annex II aufgeführt. Auch hier liegen die Umweltlasten der OME-Routen in allen Umweltwirkungen liegen deutlich höher als die Dieselroute, in den meisten ebenfalls deutlich. Die Grafiken zeigen auch eine Aufgliederung nach einzelnen Beiträgen zur Umweltkategorie.

7.2.1. Treibhauspotenzial (GWP)

Abbildung 7-8: GWP der OME-Routen mit Strombezug 2030



Quelle: Eigene Darstellung

Die Treibhausgasemissionen aus Herstellung des Fahrzeugs, Bau und Wartung der Straße sowie Abrieb der Reifen sind bei allen Routen gleich.

Bei der Diesel-Route weisen die direkten Emissionen aus der Dieselverbrennung den größten Beitrag auf, die Dieselvorkette hat hingegen einen geringen Beitrag.

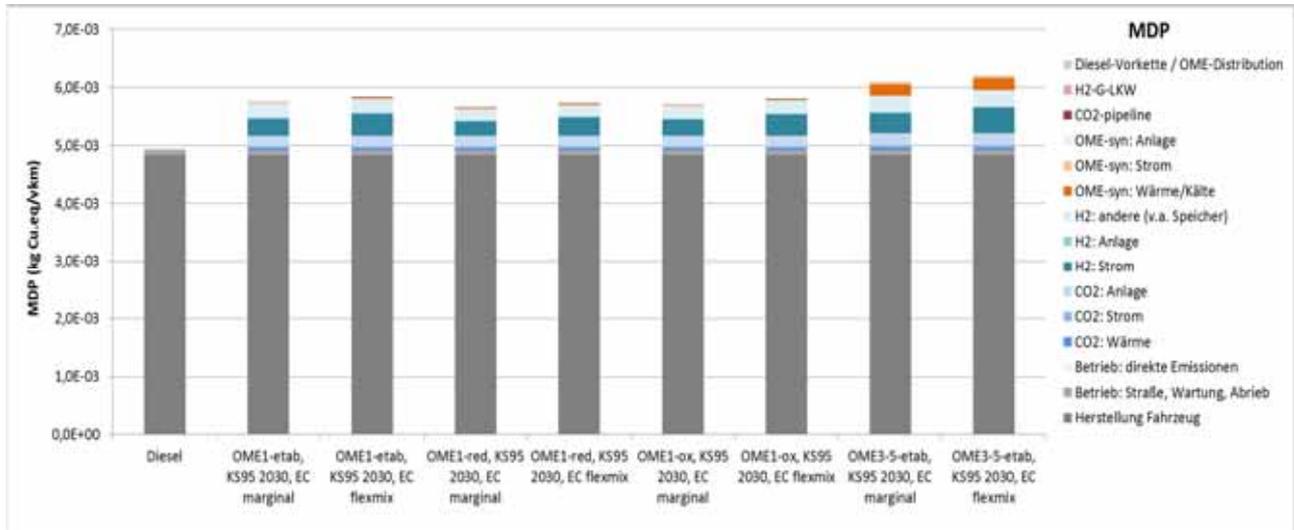
Bei OME₁-Routen kommt der größte Beitrag aus dem Strombedarf für die Elektrolyse. Die drei OME₁ Routen unterscheiden sich untereinander wenig, OME₁-red hat aufgrund des geringeren H₂-Bedarfs etwas geringere THG-Emissionen.

Bei OME₃₋₅ zeigt sich ein deutlicher Beitrag aus dem Wärmebedarf der Trioxansynthese.

Sowohl bei den OME₁-Routen als auch bei OME₃₋₅ zeigt die Verwendung des Marginalstroms einen signifikant höheren Beitrag zum GWP als die Verwendung des Durchschnittsmix in den Betriebsstunden der Elektrolyseure. Dies liegt an dem deutlich höheren Anteil an fossilen Energieträgern im Marginalstrommix für 2030, insbesondere an dem deutlich höheren Anteil der Steinkohle bzw. des Erdgases.

7.2.2. Surplus Ore Potential (SOP)

Abbildung 7-9: SOP der OME-Routen mit Strombezug 2030



Quelle: Eigene Darstellung

Der Verbrauch mineralischer Ressourcen aus Herstellung des Fahrzeugs, Bau und Wartung der Straße sowie Abrieb der Reifen ist bei allen Routen gleich.

Die Herstellung des PKWs zeigt den mit Abstand größten Beitrag: beim Diesel macht die Herstellung ca. 98 % aus, bei den OME₁-Routen 83 % bis 85 %, bei OME₃₋₅ ca. 78 %.

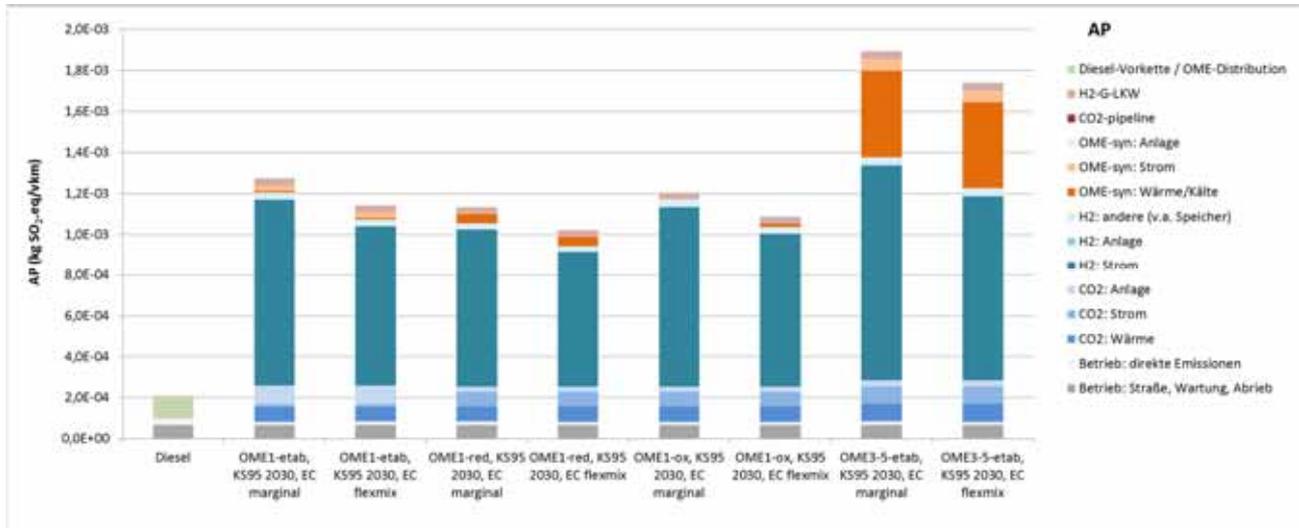
Der Beitrag aus der Dieselvorkette und der Dieselnutzung sind SOP marginal.

Bei den OME₁-Routen kommen kleinere Beiträge aus der CO₂-Abscheidungsanlage, dem H₂-Speicher und der Stromvorkette für die H₂-Elektrolyse, bei OME₃₋₅ zusätzlich noch aus der Stromvorkette für den Wärmebedarf der Trioxansynthese.

Die drei OME₁-Routen unterscheiden sich kaum, auch die Stromszenarien (marginal bzw. flexmix) haben nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse.

7.2.3. Versauerungspotenzial (AP)

Abbildung 7-10: AP der OME-Routen mit Strombezug 2030 (ohne Fahrzeugbau)



Quelle: Eigene Darstellung

Die Herstellung des Fahrzeugs ist in den Ergebnissen zum AP nicht enthalten, sie würde allerdings bei allen Routen die Ergebnisse um denselben Beitrag erhöhen. Die Säurebildneremissionen aus Bau und Wartung der Straße sind bei allen Routen gleich.

Bei der Diesel-Route weist die Dieselvorkette den größten Beitrag auf, die direkten Emissionen aus der Dieselverbrennung zeigen hingegen einen geringen Beitrag.

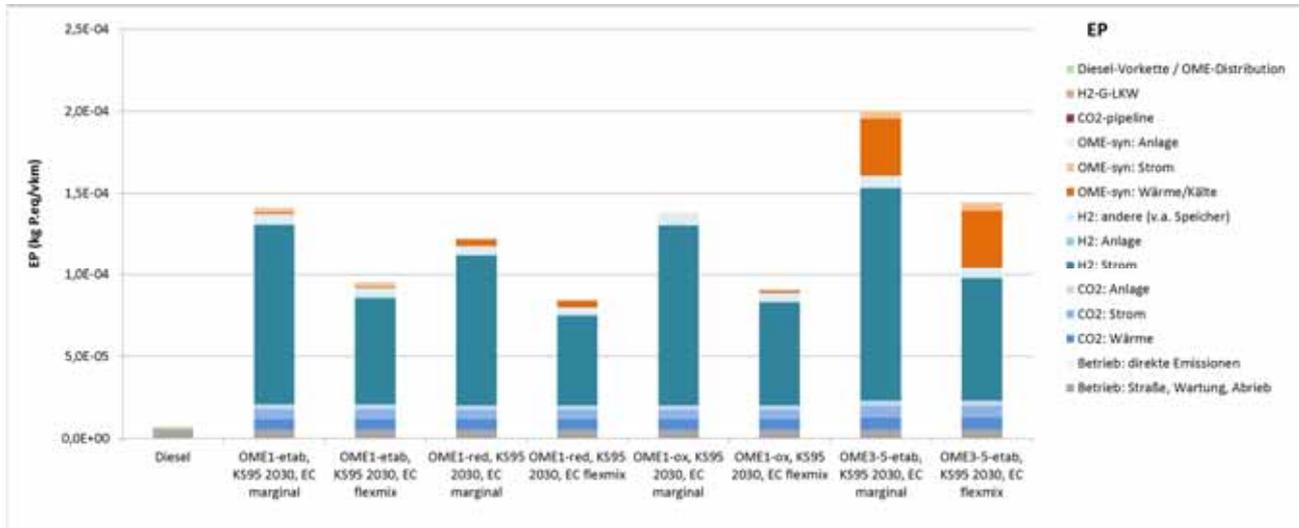
Bei OME₁-Routen kommt der größte Beitrag aus dem Strombedarf für die Elektrolyse. Die drei OME₁ Routen unterscheiden sich untereinander wenig, OME₁-red hat aufgrund des geringeren H₂-Bedarfs etwas geringere AP-Emissionen.

Bei OME₃₋₅ zeigt sich ein deutlicher Beitrag aus dem Wärmebedarf der Trioxansynthese.

Sowohl bei den OME₁-Routen als auch bei OME₃₋₅ zeigt die Verwendung des Marginalstroms einen signifikant höheren Beitrag zum AP als die Verwendung des Durchschnittsmix in den Betriebsstunden der Elektrolyseure. Dies liegt an dem deutlich höheren Anteil an fossilen Energieträgern im Marginalstrommix für 2030, insbesondere an dem deutlich höheren Anteil der Steinkohle bzw. des Erdgases.

7.2.4. Eutrophierungspotenzial (EP)

Abbildung 7-11: EP der OME-Routen mit Strombezug 2030 (ohne Fahrzeugbau)



Quelle: Eigene Darstellung

Die Herstellung des Fahrzeugs ist in den Ergebnissen zum EP nicht enthalten, sie würde allerdings bei allen Routen die Ergebnisse um denselben Beitrag erhöhen. Das Eutrophierungspotenzial aus Bau und Wartung der Straße ist bei allen Routen gleich.

Bei der Diesel-Route weisen sowohl die Dieselvorkette als auch die direkten Emissionen aus der Dieselerbrennung nur geringe Beiträge auf.

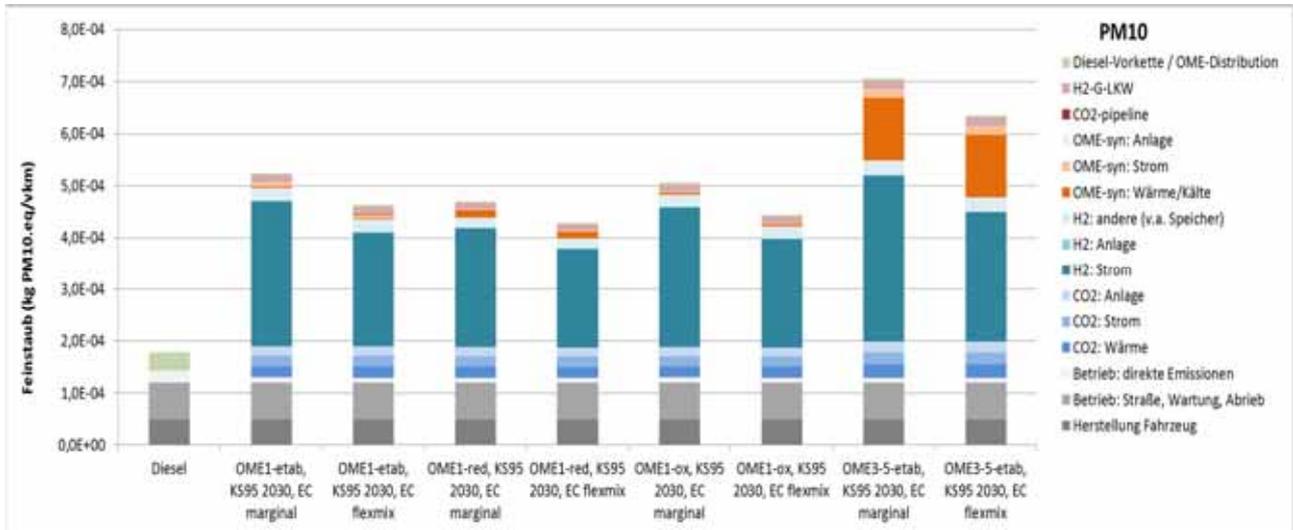
Bei OME₁-Routen kommt auch beim EP der größte Beitrag aus dem Strombedarf für die Elektrolyse. Die drei OME₁ Routen unterscheiden sich untereinander wenig, OME₁-red hat aufgrund des geringeren H₂-Bedarfs etwas geringere EP-Emissionen.

Bei OME₃₋₅ zeigt sich ein deutlicher Beitrag aus dem Wärmebedarf der Trioxansynthese.

Sowohl bei den OME₁-Routen als auch bei OME₃₋₅ zeigt die Verwendung des Marginalstroms einen signifikant höheren Beitrag zum EP als die Verwendung des Durchschnittsmix in den Betriebsstunden der Elektrolyseure. Dies liegt an dem deutlich höheren Anteil an fossilen Energieträgern im Marginalstrommix für 2030, insbesondere an dem deutlich höheren Anteil der Steinkohle bzw. des Erdgases.

7.2.5. Feinstaub (PM10)

Abbildung 7-12: PM10 der OME-Routen mit Strombezug 2030



Quelle: Eigene Darstellung

Die Feinstaubbildung (PM10) aus Herstellung des Fahrzeugs, Bau und Wartung der Straße sowie Abrieb der Reifen ist bei allen Routen gleich.

Bei der Diesel-Route kommen die direkten Emissionen vor allem aus den Ruß-Emissionen aus der Dieselerbrennung, auch die Dieselvorkette hat einen gewissen Beitrag.

Bei dem OME-Routen sind die direkten Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung deutlich geringer als bei der Diesel-Route. Auf der anderen Seite kommen hier deutliche Beiträge aus der Stromvorkette hinzu. Bei OME₁-Routen kommt der größte Beitrag aus dem Strombedarf für die Elektrolyse. Die drei OME₁ Routen unterscheiden sich untereinander wenig, OME₁-red hat aufgrund des geringeren H₂-Bedarfs etwas geringere PM10-Emissionen.

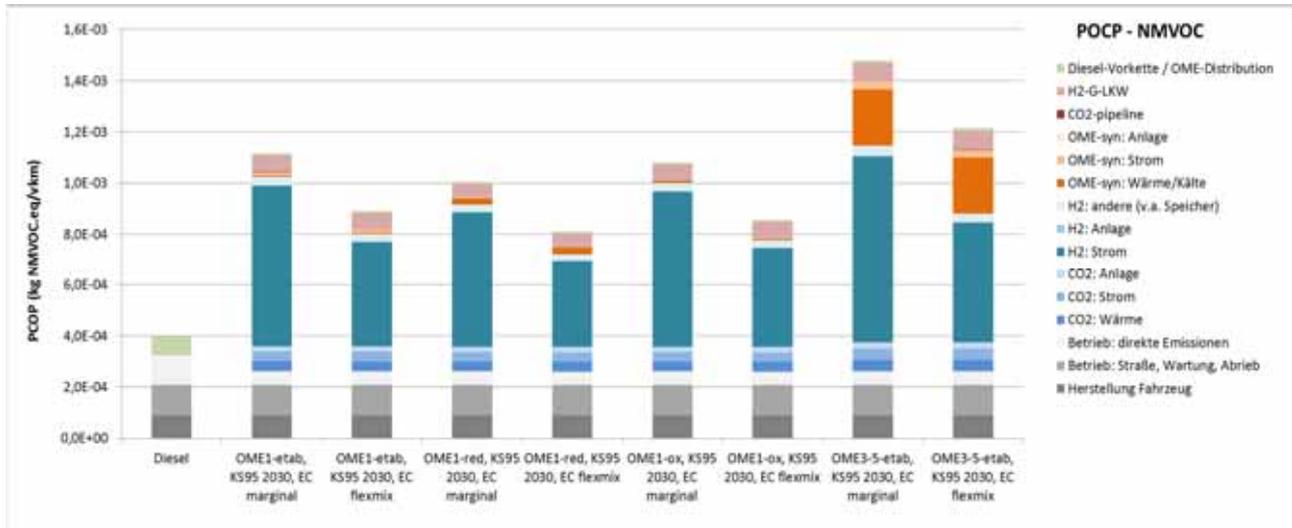
Bei OME₃₋₅ zeigt sich ein deutlicher Beitrag aus dem Wärmebedarf der Trioxansynthese.

Sowohl bei den OME₁-Routen als auch bei OME₃₋₅ zeigt die Verwendung des Marginalstroms einen signifikant höheren Beitrag zum PM10 als die Verwendung des Durchschnittsmix in den Betriebsstunden der Elektrolyseure. Dies liegt an dem deutlich höheren Anteil an fossilen Energieträgern im Marginalstrommix für 2030, insbesondere an dem deutlich höheren Anteil der Steinkohle.

Die verschiedenen Beiträge der PM10-Emissionen sind allerdings nicht vergleichbar. Für die tatsächlichen gesundheitlichen Auswirkungen spielt es eine große Rolle, wo die Emissionen entstehen, z. B. in Siedlungsgebieten oder außerhalb. Weiterhin zeigen die Feinstaubemissionen aus dem Abrieb auf der Straße aufgrund der Größenverteilung der Partikel andere gesundheitliche Auswirkungen.

7.2.6. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP, NMVOC)

Abbildung 7-13: POCP der OME-Routen mit Strombezug 2030



Quelle: Eigene Darstellung

Das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial (POCP) aus Herstellung des Fahrzeugs, Bau und Wartung der Straße sowie Abrieb der Reifen sind bei allen Routen gleich.

Bei der Diesel-Route kommen die direkten Emissionen vor allem aus den NO_x -Emissionen aus der Dieselerbrennung, auch die Dieselvorkette hat einen gewissen Beitrag.

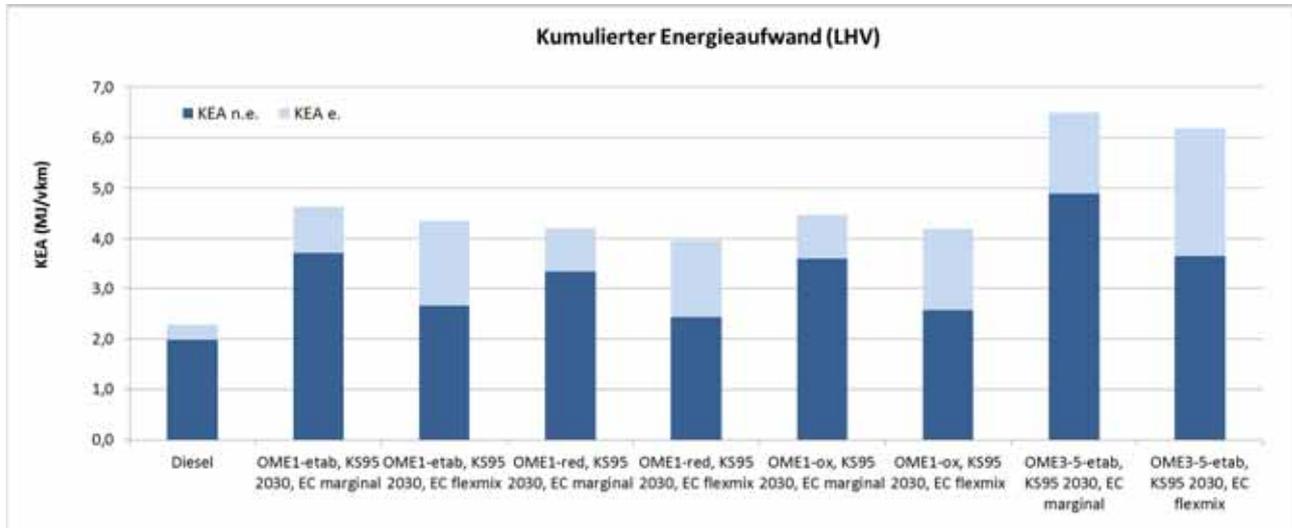
Bei dem OME-Routen sind die direkten Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung deutlich geringer als bei der Diesel-Route. Auf der anderen Seite kommen hier deutliche Beiträge aus der Stromvorkette hinzu. Bei OME_1 -Routen kommt der größte Beitrag aus dem Strombedarf für die Elektrolyse. Die drei OME_1 Routen unterscheiden sich untereinander wenig, OME_1 -red hat aufgrund des geringeren H_2 -Bedarfs etwas geringere POCP-Emissionen.

Bei OME_{3-5} zeigt sich ein deutlicher Beitrag aus dem Wärmebedarf der Trioxansynthese.

Sowohl bei den OME_1 -Routen als auch bei OME_{3-5} zeigt die Verwendung des Marginalstroms einen signifikant höheren Beitrag zum POCP als die Verwendung des Durchschnittsmix in den Betriebsstunden der Elektrolyseure. Dies liegt an dem deutlich höheren Anteil an fossilen Energieträgern im Marginalstrommix für 2030, insbesondere an dem deutlich höheren Anteil der Steinkohle.

7.2.7. Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Abbildung 7-14: KEA der OME-Routen mit Strombezug 2030



Quelle: Eigene Darstellung

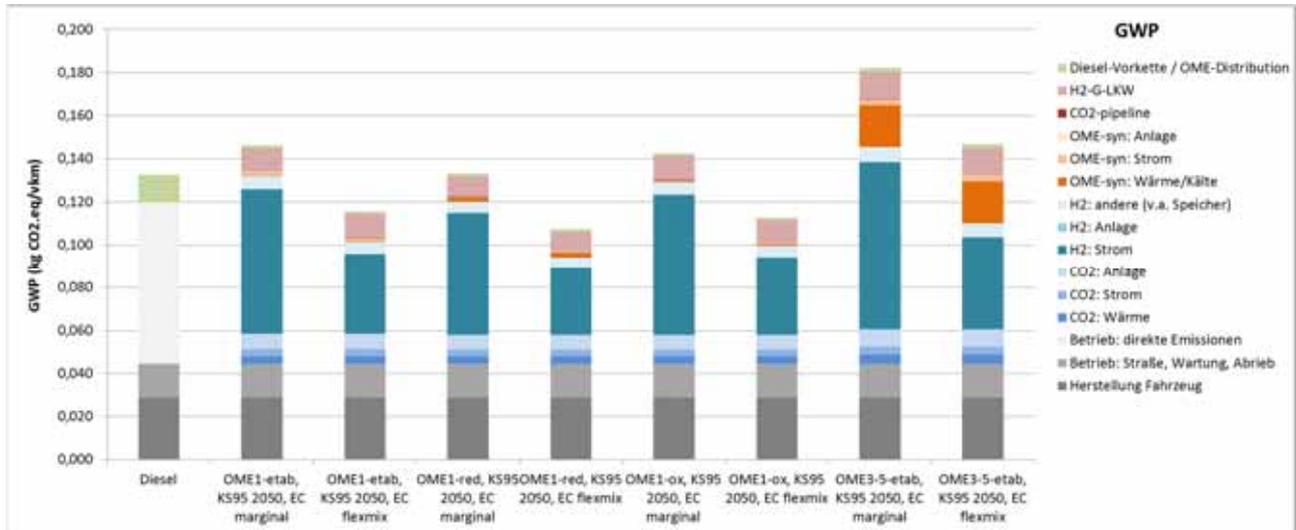
Bei der Darstellung des KEAs wird auf die Unterscheidung nach Beiträgen verzichtet (hierfür s. Kapitel 8.2.2.3), ausgewiesen wird hingegen der jeweilige Anteil des Kumulierten Energieaufwands aus erneuerbaren bzw. aus nicht-erneuerbaren Energieträgern. Der Gesamt-KEA ist bei allen OME-Routen deutlich höher als bei der Diesel-Route. Die Unterschiede zwischen den jeweiligen Stromszenarien (marginal bzw. flexmix) zeigen sich vor allem in einer Verschiebung von $KEA_{\text{nicht erneuerbar}}$ zu $KEA_{\text{erneuerbar}}$ aufgrund des höheren Anteils an erneuerbaren Energieträgern im flexmix-Szenario.

7.3. Strommix 2050

Abbildung 7-15 bis Abbildung 7-21 zeigen die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für den Strombezug des Jahres 2050. Die Zahlenwerte sind in Annex II aufgeführt.

7.3.1. Treibhauspotenzial (GWP)

Abbildung 7-15: GWP der OME-Routen mit Strombezug 2050



Quelle: Eigene Darstellung

Die Treibhausgasemissionen aus Herstellung des Fahrzeugs, Bau und Wartung der Straße sowie Abrieb der Reifen sind bei allen Routen gleich.

Bei der Diesel-Route weisen die direkten Emissionen aus der Dieselverbrennung den größten Beitrag auf, die Dieselvorkette hat hingegen einen geringen Beitrag.

Bei OME₁-Routen kommt der größte Beitrag aus dem Strombedarf für die Elektrolyse. Die drei OME₁ Routen unterscheiden sich untereinander wenig, OME₁-red hat aufgrund des geringeren H₂-Bedarfs etwas geringere THG-Emissionen. Bei OME₃₋₅ zeigt sich ein deutlicher Beitrag aus dem Wärmebedarf der Trioxansynthese.

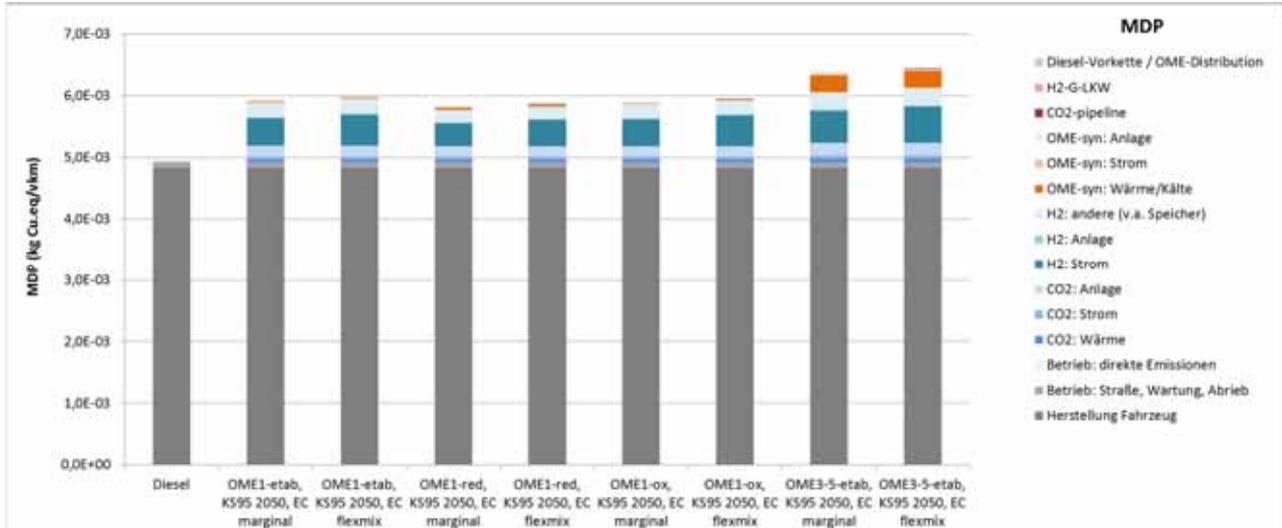
Da die Stromvorkette im Szenario „Strommix 2050“ nicht mehr so deutlich dominiert, werden bei allen OME-Routen auch andere Beiträge sichtbar, z. B. der Wasserstoff-Transports per LWK.

Sowohl bei den OME₁-Routen als auch bei OME₃₋₅ zeigt die Verwendung des Marginalstroms einen signifikant höheren Beitrag zum GWP als die Verwendung des Durchschnittsmix in den Betriebsstunden der Elektrolyseure. Dies liegt an dem deutlich höheren Anteil an Erdgas im Marginalstrommix für 2050.

Die GWP-Werte mit flexmix-Strom liegen unter denen der Dieselroute. Hier zeigt sich, dass die Verwendung von PtX-Kraftstoffen erst dann zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen führt, wenn der Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix sehr hoch ist. Solange noch fossile Energieträger, insbesondere Kohle, verwendet wird, können strombasierte Kraftstoffe nicht zu einer Reduktion der Emission von klimarelevanten Gasen beitragen. Ein weiteres Potenzial zur Reduktion der Treibhausgase ergibt sich, wenn die auch Herstellung der Windkraft- und PV-Anlagen mit erneuerbaren Energien betrieben wird.

7.3.2. Surplus Ore Potential (SOP)

Abbildung 7-16: SOP der OME-Routen mit Strombezug 2050



Quelle: Eigene Darstellung

Der Verbrauch mineralischer Ressourcen aus Herstellung des Fahrzeugs, Bau und Wartung der Straße sowie Abrieb der Reifen ist bei allen Routen gleich.

Die Herstellung des PKWs zeigt den mit Abstand größten Beitrag: beim Diesel macht die Herstellung ca. 97 % aus, bei den OME₁-Routen 69 % bis 73 %, bei OME₃₋₅ ca. 63 %.

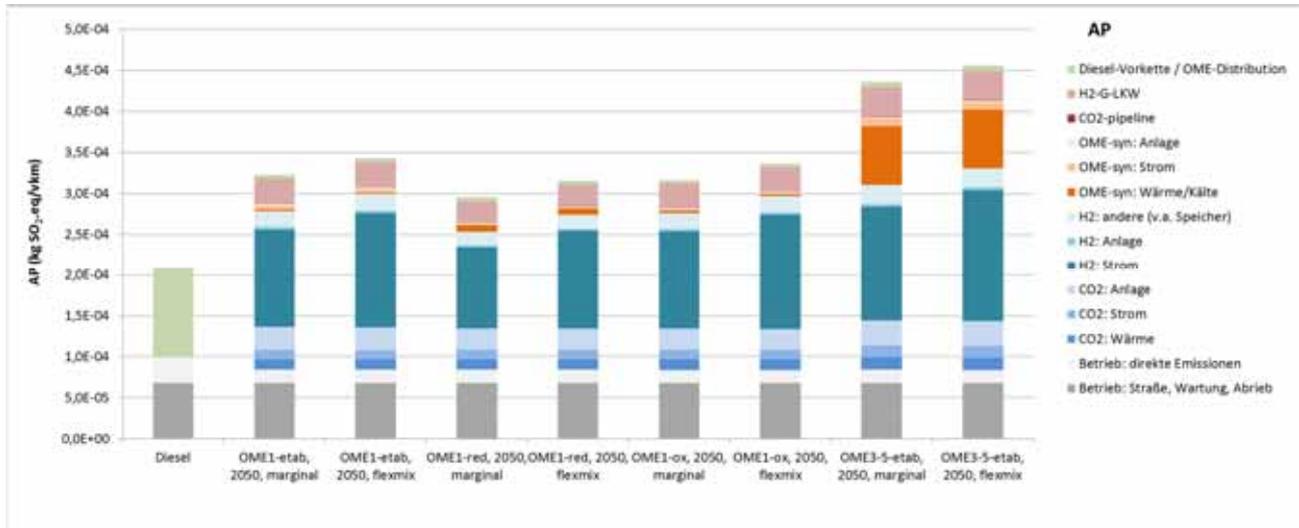
Der Beitrag aus der Dieselvorkette und der Dieselnutzung sind SOP marginal.

Bei den OME₁-Routen kommen kleinere Beiträge aus der CO₂-Abscheidungsanlage, dem H₂-Speicher und der Stromvorkette für die H₂-Elektrolyse, bei OME₃₋₅ zusätzlich noch aus der Stromvorkette für den Wärmebedarf der Trioxansynthese.

Die drei OME₁-Routen unterscheiden sich kaum, auch die Stromszenarien (marginal bzw. flexmix) haben nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse.

7.3.3. Versauerungspotenzial (AP)

Abbildung 7-17: AP der OME-Routen mit Strombezug 2050 (ohne Fahrzeugbau)



Quelle: Eigene Darstellung

Die Herstellung des Fahrzeugs ist in den Ergebnissen zum AP nicht enthalten, sie würde allerdings bei allen Routen die Ergebnisse um denselben Beitrag erhöhen. Die Säurebildneremissionen aus Bau und Wartung der Straße sind bei allen Routen gleich.

Bei der Diesel-Route weist die Dieselvorkette den größten Beitrag auf, die direkten Emissionen aus der Dieselverbrennung zeigen hingegen einen geringeren Beitrag.

Bei OME₁-Routen kommt auf 2050 der größte Beitrag aus dem Strombedarf für die Elektrolyse, kleinere Beiträge aus der CO₂-Abscheidungsanlage und dem H₂-Speicher. Die drei OME₁ Routen unterscheiden sich untereinander wenig, OME₁-red hat aufgrund des geringeren H₂-Bedarfs etwas geringere AP-Emissionen.

Bei OME₃₋₅ zeigt sich ein deutlicher Beitrag aus dem Wärmebedarf der Trioxansynthese.

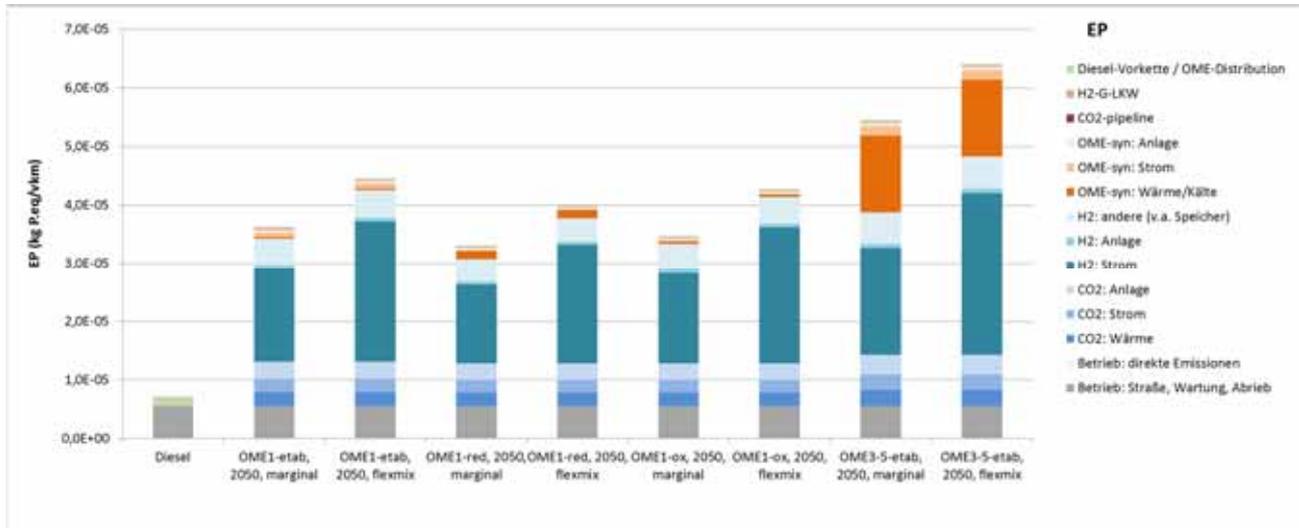
Da die Stromvorkette im Szenario „Strommix 2050“ nicht mehr so deutlich dominiert, werden bei allen OME-Routen auch andere Beiträge sichtbar, z. B. der Wasserstoff-Transport per LKW.

Sowohl bei den OME₁-Routen als auch bei OME₃₋₅ zeigt die Verwendung des Marginalstroms einen niedrigeren Beitrag zum AP als die Verwendung des Durchschnittsmix in den Betriebsstunden der Elektrolyseure. Dies liegt an dem deutlich höheren Anteil an Strom aus Photovoltaik flexmix-Strom für 2050.

Insgesamt liegen beim AP die Umweltlasten bei allen OME-Routen auch bei hohen Anteilen an erneuerbaren Energien höher als bei der Diesel-Route.

7.3.4. Eutrophierungspotenzial (EP)

Abbildung 7-18: EP der OME-Routen mit Strombezug 2050 (ohne Fahrzeugbau)



Quelle: Eigene Darstellung

Die Herstellung des Fahrzeugs ist in den Ergebnissen zum EP nicht enthalten, sie würde allerdings bei allen Routen die Ergebnisse um denselben Beitrag erhöhen. Das Eutrophierungspotenzial aus Bau und Wartung der Straße ist bei allen Routen gleich.

Bei der Diesel-Route weisen sowohl die Dieselvorkette als auch die direkten Emissionen aus der Dieselerbrennung nur geringe Beiträge auf.

Bei OME₁-Routen kommt auf 2050 der größte Beitrag aus dem Strombedarf für die Elektrolyse, kleinere Beiträge aus der CO₂-Abscheidungsanlage und dem H₂-Speicher. Die drei OME₁ Routen unterscheiden sich untereinander wenig, OME₁-red hat aufgrund des geringeren H₂-Bedarfs etwas geringere EP-Emissionen.

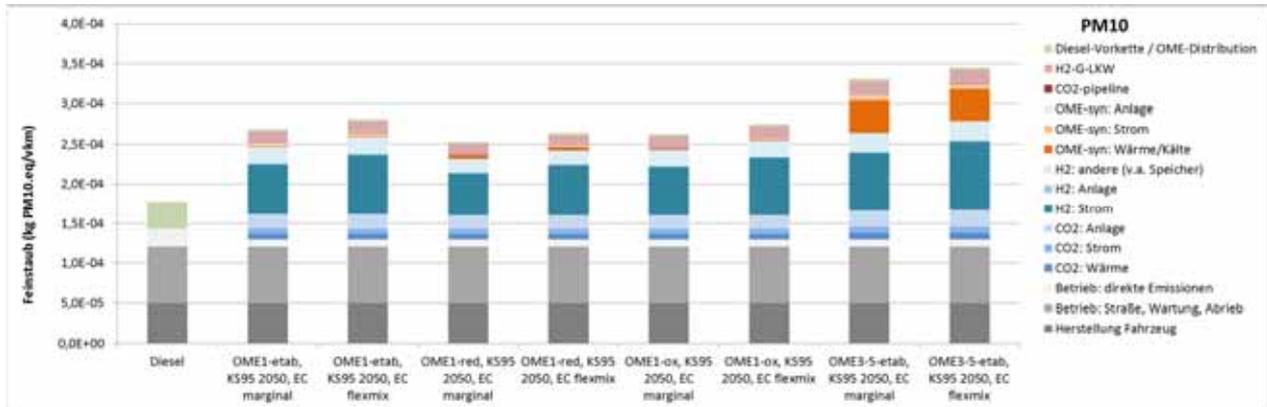
Bei OME₃₋₅ zeigt sich ein deutlicher Beitrag aus dem Wärmebedarf der Trioxansynthese.

Sowohl bei den OME₁-Routen als auch bei OME₃₋₅ zeigt die Verwendung des Marginalstroms einen niedrigeren Beitrag zum EP als die Verwendung des Durchschnittsmix in den Betriebsstunden der Elektrolyseure. Dies liegt an dem deutlich höheren Anteil an Strom aus Photovoltaik im flexmix-Strom für 2050.

Insgesamt liegen beim EP die Umweltlasten bei allen OME-Routen auch bei hohen Anteilen an erneuerbaren Energien höher als bei der Diesel-Route.

7.3.5. Feinstaub (PM10)

Abbildung 7-19: PM10 der OME-Routen mit Strombezug 2050



Quelle: Eigene Darstellung

Die Feinstaubbildung (PM10) aus Herstellung des Fahrzeugs, Bau und Wartung der Straße sowie Abrieb der Reifen ist bei allen Routen gleich.

Bei der Diesel-Route kommen die direkten Emissionen aus den Ruß-Emissionen aus der Dieselerbrennung, auch die Dieselvorkette hat einen deutlichen Beitrag.

Bei den OME-Routen sind die direkten Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung deutlich geringer als bei der Diesel-Route. Auf der anderen Seite kommen hier deutliche Beiträge aus der Stromvorkette hinzu, vor allem aus der Herstellung der Photovoltaikanlagen. Bei OME₁-Routen kommt der größte Beitrag aus dem Strombedarf für die Elektrolyse, kleinere Beiträge aus der CO₂-Abscheidungsanlage und dem H₂-Speicher. Die drei OME₁ Routen unterscheiden sich untereinander wenig, OME₁-red hat aufgrund des geringeren H₂-Bedarfs etwas geringere PM10-Emissionen.

Bei OME₃₋₅ zeigt sich ein deutlicher Beitrag aus dem Wärmebedarf der Trioxansynthese.

Da die Stromvorkette im Szenario „Strommix 2050“ nicht mehr so deutlich dominiert, werden bei allen OME-Routen auch andere Beiträge sichtbar, z. B. der Wasserstoff-Transports per LWK.

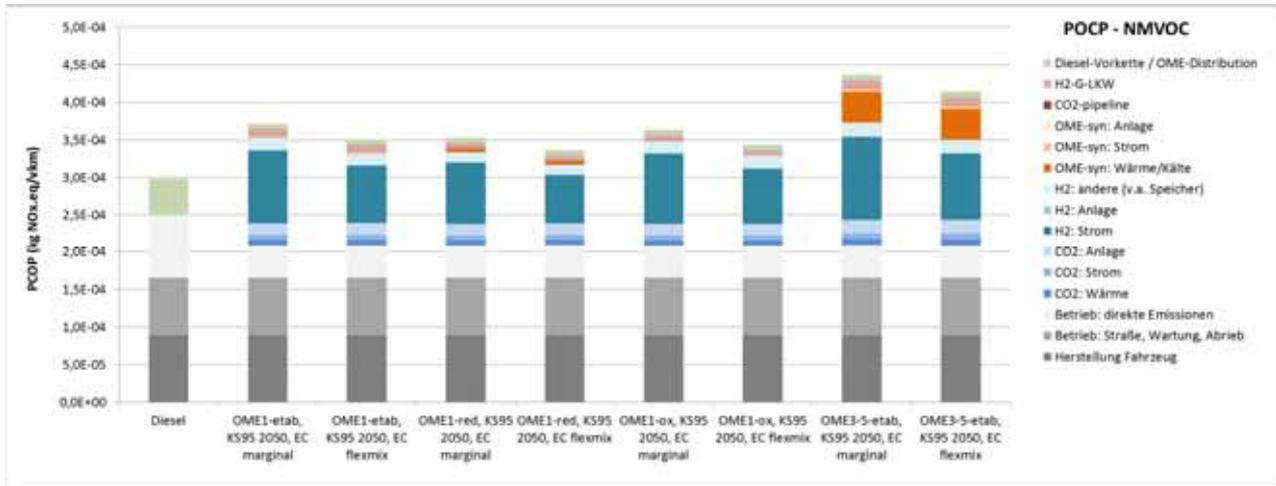
Sowohl bei den OME₁-Routen als auch bei OME₃₋₅ zeigt die Verwendung des Marginalstroms einen höheren Beitrag zum PM10 als die Verwendung des Durchschnittsmix in den Betriebsstunden der Elektrolyseure. Dies liegt an dem deutlich höheren Anteil an Strom aus Photovoltaik flexmix-Strom für 2050.

Sowohl bei den OME₁-Routen als auch bei OME₃₋₅ zeigt die Verwendung des Marginalstroms einen niedrigeren Beitrag zu den PM10-Emissionen als die Verwendung des Durchschnittsmix in den Betriebsstunden der Elektrolyseure. Dies liegt an dem deutlich höheren Anteil an Strom aus Photovoltaik im flexmix-Strom für 2050.

Insgesamt liegen die PM10-Emissionen bei allen OME-Routen auch bei hohen Anteilen an erneuerbaren Energien höher als bei der Diesel-Route. Die verschiedenen Beiträge zu den PM10-Emissionen sind allerdings nicht vergleichbar. Für die tatsächlichen gesundheitlichen Auswirkungen spielt es eine große Rolle, wo die Emissionen entstehen, z. B. in Siedlungsgebieten oder außerhalb. Weiterhin zeigen die Feinstaubemissionen aus dem Abrieb auf der Straße aufgrund der Größenverteilung der Partikel andere gesundheitliche Auswirkungen.

7.3.6. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP, NMVOC)

Abbildung 7-20: POCP der OME-Routen mit Strombezug 2050



Quelle: Eigene Darstellung

Das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial (POCP) aus Herstellung des Fahrzeugs, Bau und Wartung der Straße sowie Abrieb der Reifen sind bei allen Routen gleich.

Bei der Diesel-Route kommen die direkten Emissionen vor allem aus den NO_x-Emissionen aus der Dieselverbrennung, auch die Dieselvorkette hat einen gewissen Beitrag.

Bei dem OME-Routen sind die direkten Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung deutlich geringer als bei der Diesel-Route. Auf der anderen Seite kommen hier deutliche Beiträge aus der Stromvorkette hinzu. Bei OME₁-Routen kommt der größte Beitrag aus dem Strombedarf für die Elektrolyse. Die drei OME₁ Routen unterscheiden sich untereinander wenig, OME₁-red hat aufgrund des geringeren H₂-Bedarfs etwas geringere POCP-Emissionen.

Bei OME₃₋₅ zeigt sich ein deutlicher Beitrag aus dem Wärmebedarf der Trioxansynthese.

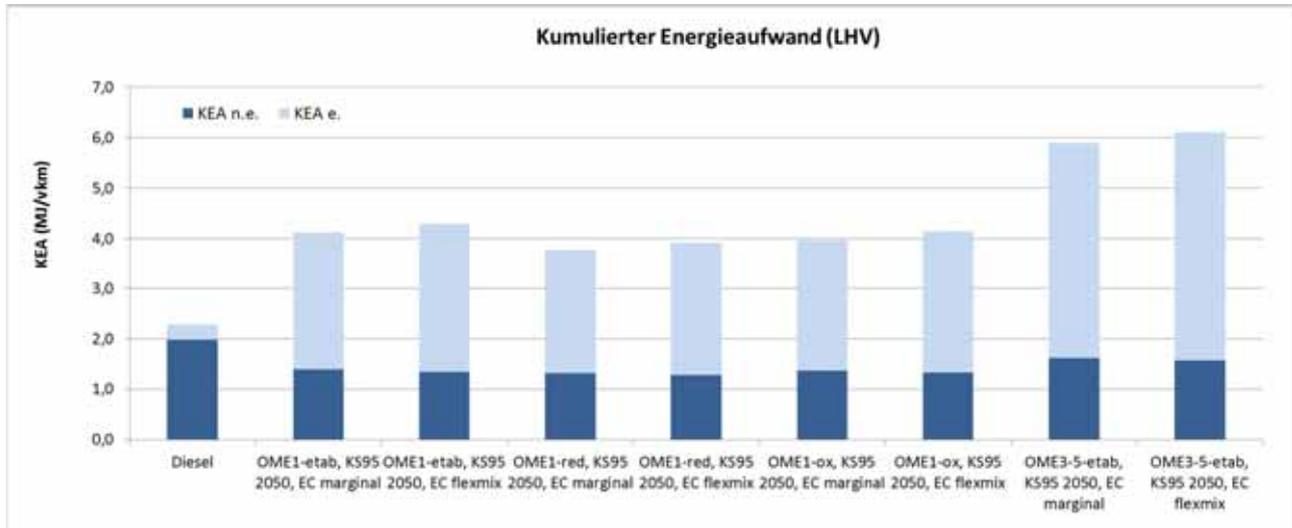
Da die Stromvorkette im Szenario „Strommix 2050“ nicht mehr so deutlich dominiert, werden bei allen OME-Routen auch andere Beiträge sichtbar, z. B. der des Wasserstoff-Transports per LWK.

Sowohl bei den OME₁-Routen als auch bei OME₃₋₅ zeigt die Verwendung des Marginalstroms einen etwas höheren Beitrag zum POCP als die Verwendung des Durchschnittsmix in den Betriebsstunden der Elektrolyseure. Dies liegt an dem höheren Anteil an Strom aus Erdgas im marginal-Strom für 2050.

Insgesamt liegen die POCP-Emissionen bei allen OME-Routen auch bei hohen Anteilen an erneuerbaren Energien höher als bei der Diesel-Route.

7.3.7. Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Abbildung 7-21: KEA der OME-Routen mit Strombezug 2050



Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Darstellung des KEAs wird auf die Unterscheidung nach Beiträgen verzichtet (hierfür s. Kapitel 8.2.2.3), ausgewiesen wird hingegen der jeweilige Anteil des Kumulierten Energieaufwands aus erneuerbaren bzw. aus nicht-erneuerbaren Energieträgern. Der Gesamt-KEA ist bei allen OME-Routen deutlich höher als bei der Diesel-Route. Die Unterschiede zwischen den jeweiligen Stromszenarien (marginal bzw. flexmix) zeigen sich vor allem in einer Verschiebung von $KEA_{\text{nicht-erneuerbar}}$ zu $KEA_{\text{erneuerbar}}$ aufgrund des höheren Anteils an erneuerbaren Energieträgern im flexmix-Szenario. Der nicht-erneuerbare KEA ist in allen OME-Routen deutlich niedriger als bei der Diesel-Route.

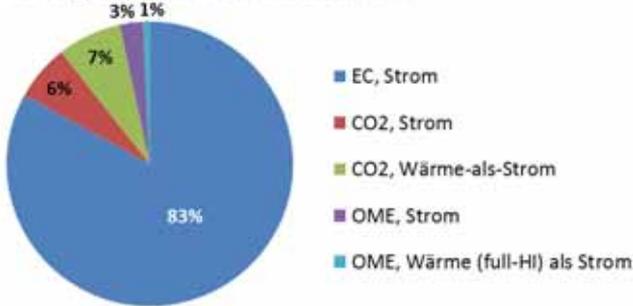
8. Auswertung der Ökobilanz

8.1. Identifizierung der signifikanten Parameter

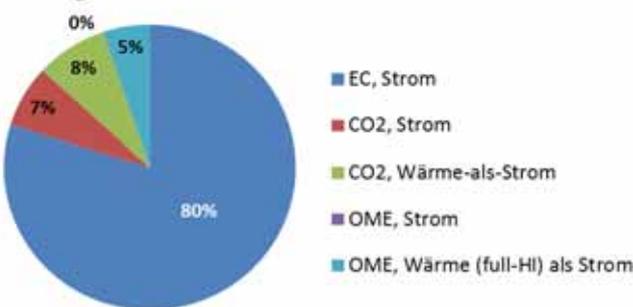
Die Ergebnisse der Umweltlasten zeigen in den meisten Umweltwirkungskategorien, abgesehen vom SOP, die Dominanz der Stromvorketten. Der Strombedarf rekrutiert vor allem aus dem Strombedarf für die Elektrolyse sowie für die CO_2 -Abscheidung und die OME-Synthese. Weiterhin wird Strom für die Erzeugung des Wärmebedarfs benötigt. Abbildung 8-1 zeigt die prozentualen Anteile der verschiedenen Prozessschritte nach Energiebedarf. Es zeigt sich, dass die Elektrolyse den höchsten Anteil am Strombedarf hat, bei den OME₁-Routen $\geq 80\%$. Bei der OME₃₋₅-Routen kommt hinzu der hohe Wärmebedarf im Zwischenschritt der Trioxan-Synthese.

Abbildung 8-1: Energiebedarf der OME_x-Produktionsrouten nach Anteilen in %

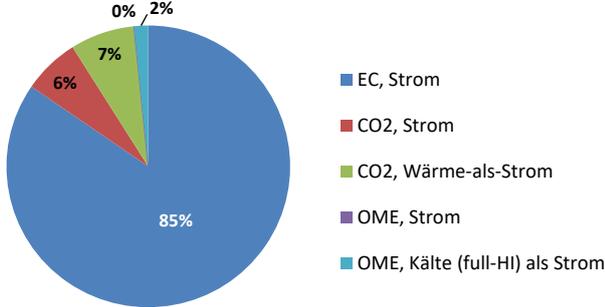
Energiebedarf OME1 etabliert



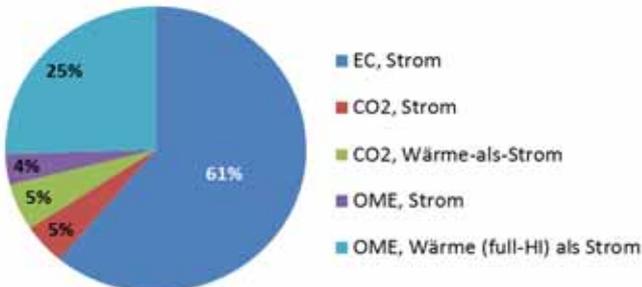
Energiebedarf OME1 reduktiv



Energiebedarf OME1 oxidativ



Energiebedarf OME3-5 etabliert



Systemwirkungsgrad der Elektrolyse 70% LHV-Basis

Quelle: eigene Darstellung

8.2. Beurteilung

8.2.1. Vollständigkeitsprüfung

Für die vorliegende Ökobilanz wurden Daten zu allen für die OME-Herstellung relevanten Prozessschritte erhoben. Mit wenigen Ausnahmen wurden nahezu alle Input- und Outputströme erfasst und über die beschriebenen Prozessschritte verfolgt.

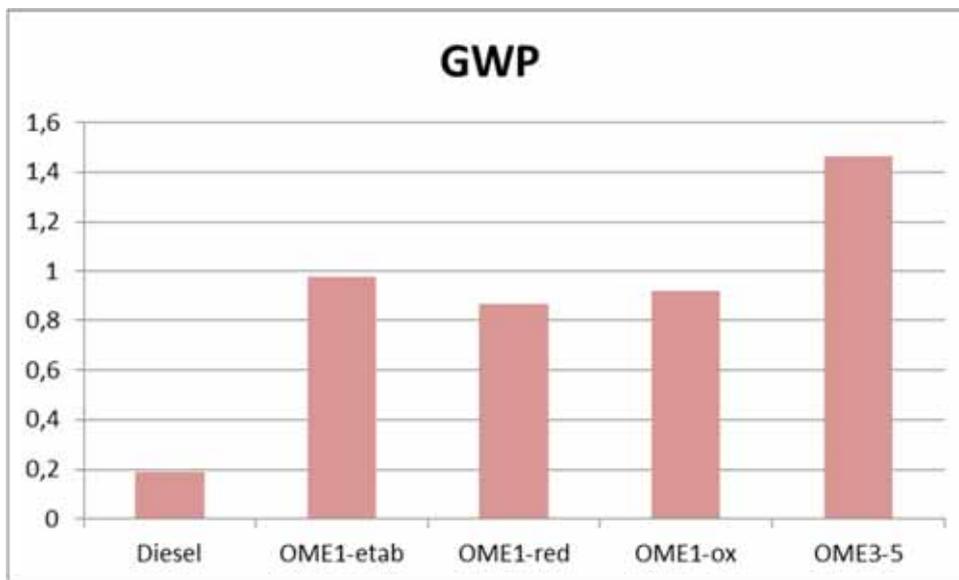
8.2.2. Sensitivitätsprüfung

Im Folgenden wird die Sensitivität der Ergebnisse der Ökobilanz gegenüber einer Variation von ausgewählten, ergebnisrelevanten Einflussgrößen dargestellt und diskutiert.

8.2.2.1. Dieserverbrauch

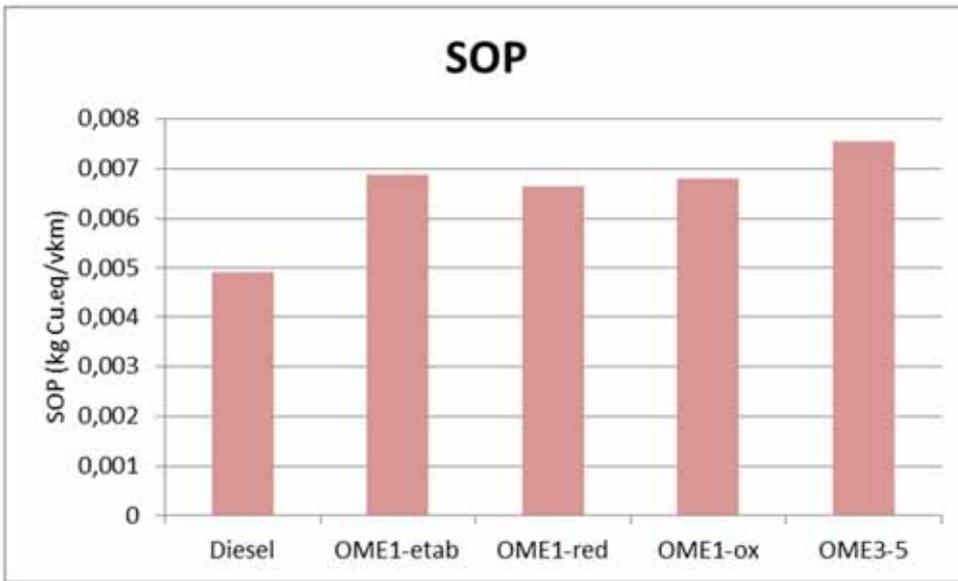
Der Kraftstoffverbrauch in den Basisrechnungen beruht auf Messungen nach dem WLTC-Zyklus [Audi 2019]. Da die Realverbräuche heute insbesondere bei Dieselfahrzeugen deutlich höher liegen (vgl. z. B. [ICCT 2017]), wird in dieser Sensitivitätsrechnung auch ein Verbrauchswert von 1,9 MJ Diesel/km (nach Daten des „Spritmonitors“ [Spritmonitor 2019]) betrachtet. Für die Bewertung von OME als Kraftstoff werden jeweils dieselben Verbrauchswerte verwendet. Abbildung 8-2 bis Abbildung 8-5 zeigen die Ergebnisse für die Wirkungskategorien GWP, SOP, PM10 und POCP. Die Zahlenwerte sind in Annex II aufgeführt.

Abbildung 8-2: GWP der OME-Routen mit Diesel-Realverbrauch (Bezugsjahr 2018)



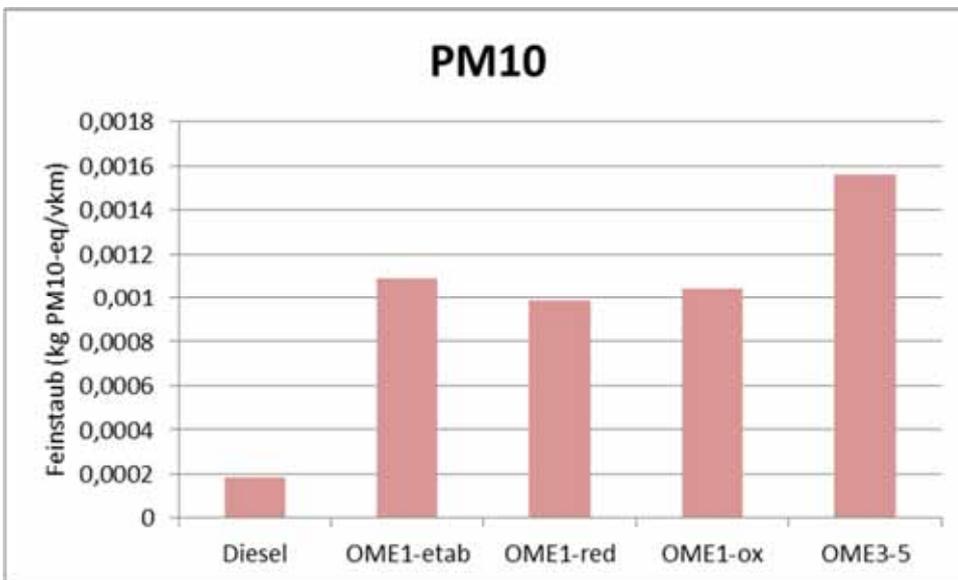
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 8-3: SOP der OME-Routen mit Diesel-Realverbrauch (Bezugsjahr 2018)

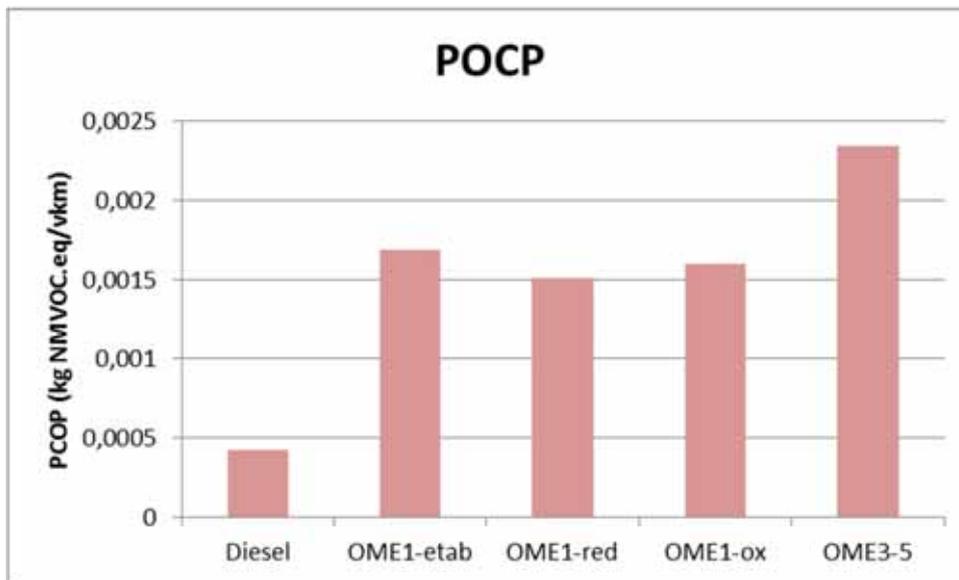


Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 8-4: PM10 der OME-Routen mit Diesel-Realverbrauch (Bezugsjahr 2018)



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 8-5: POCP der OME-Routen mit Diesel-Realverbrauch (Bezugsjahr 2018)

Quelle: Eigene Darstellung

8.2.2.2. Carbon capture and usage (CCU)

Als Alternative zur Abscheidung von CO₂ aus der Luft (Direct Air Capture, DAC) wird in dieser Sensitivitätsrechnung die Abscheidung von CO₂ aus den Abgasen eines Zementwerks betrachtet, in denen das CO₂ in deutlich höheren Konzentrationen als in der Luft vorliegt..

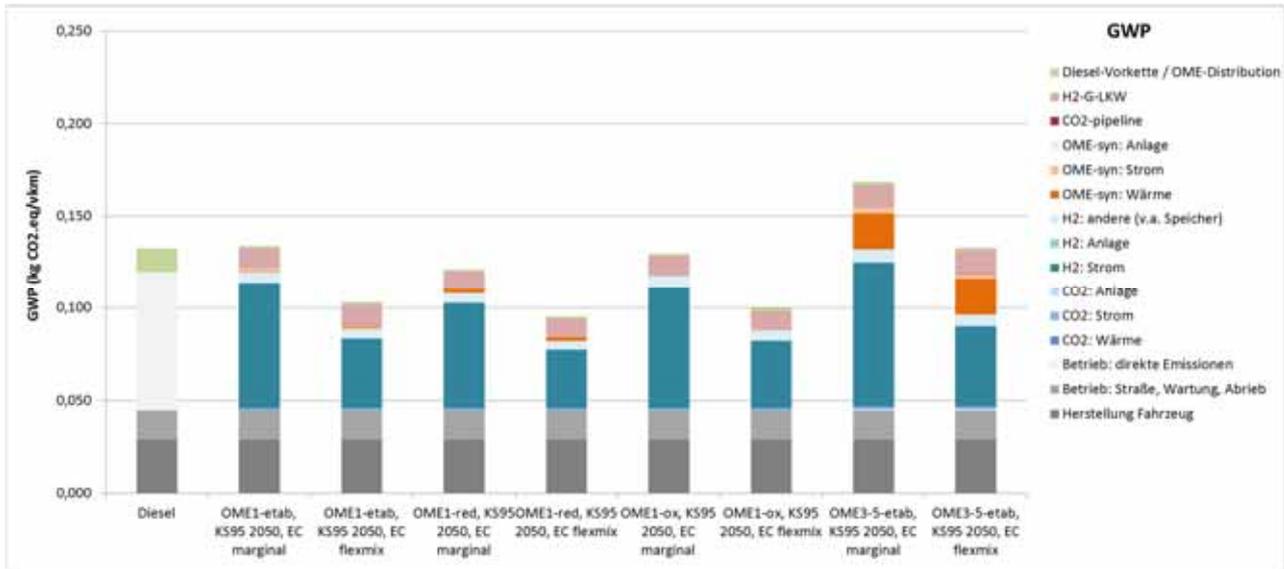
Der Aufwand für die CO₂-Abscheidung aus den Zementwerksabgasen wurde [Mathisen et al. 2014] entnommen. Dort werden für die Abscheidung zwei Optionen betrachtet: die konventionelle Verbrennung mit MEA⁶-Wäsche (als die der Kommerzialisierung am nächsten stehende Technologie) und die Oxyverbrennung mit einer nachgeschalteten Kompressions- und Reinigungseinheit für das CO₂ (als eine mögliche Zukunftstechnologie). Für diese Sensitivitätsanalyse wurde der Energiebedarf der Gewinnung nach der Oxyverbrennung (Betrieb einer Lufterlegungsanlage und einer CO₂-Kompressions- und Reinigungseinheit) berücksichtigt, da dieser mit insgesamt ca. 0,9 MJ/kg CO₂ deutlich geringer ist als der einer MEA-Wäsche. Letzterer liegt mit ca. 4 MJ/kg CO₂ fast im Bereich des Energiebedarfs der DAC (4,2 MJ/kg CO₂, bei Annahme einer Wärmepumpe, s. Kapitel 5). Die Vorgehensweise bei der Allokation ist in Kapitel 3.4.1 beschrieben. Die gemeinsam genutzten Rohstoffe und Energieträger wurden mithilfe eines generischen Ökobilanzdatensatzes zur heutigen Klinkerproduktion (ecoinvent 3.5) beispielhaft bestimmt und mit einem Klinkerfaktor von 0.68 kg Klinker/kg Zement, einem CO₂-Abscheidefaktor von 0,96 sowie einem CO₂-Bedarf von 1.9 kg CO₂/kg OME umgerechnet (s. Annex I).

Die Ergebnisse werden hier nur für das GWP gezeigt, zum einen in Abbildung 8-6 mit einer Allokation 100:0, d. h. das Zementwerk bekommt die volle Emission angerechnet, die der endgültigen Freisetzung am Ende des PtX Prozesses entspricht, der PtX-Prozess bekommt die vermiedenen Emission angerechnet (-1 kg CO₂/kg CO₂), zum zweiten in Abbildung 8-7 mit einer Allokation 50:50, d. h. das Zementwerk und der PtX-Prozess bekommen jeweils die Hälfte der vermiedenen Emission

⁶ Chemische Absorption mit Monoethanolamin [Mathisen et al. 2014]

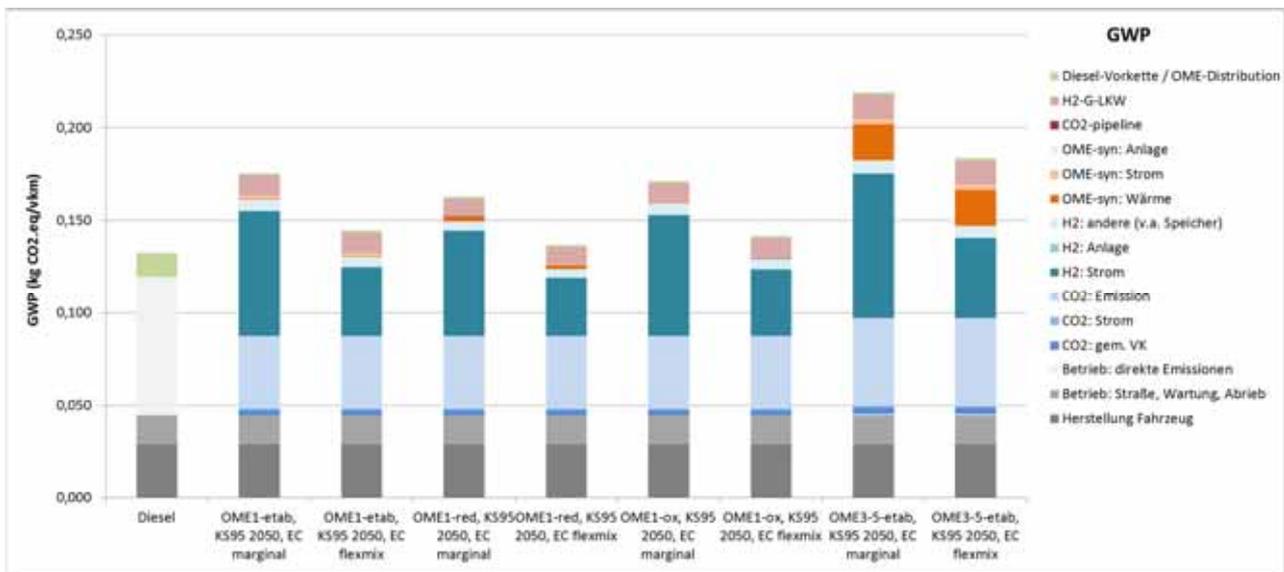
angerechnet. Die Zahlenwerte sind in Annex II aufgeführt. Im Fall der 100:0-Allokation trägt der PtX-Prozess die vollen Umweltwirkungen der CO₂-Abscheidung und –Aufreinigung. Im Fall der 50:50 Allokation werden diese Umweltwirkungen anteilig auf beide Teilsysteme aufgeteilt. Außerdem werden dann die Vorketten der gemeinsam genutzten Rohstoffe (in diesem Fall der Kalkstein und die gemeinsam genutzten Energieträger) auf beide Teilsysteme alloziert.

Abbildung 8-6: GWP der OME-Routen mit Strombezug 2050 (100:0)



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 8-7: GWP der OME-Routen mit Strombezug 2050 (50:50)



Quelle: Eigene Darstellung

Während bei einer 100:0 Allokation das GWP niedriger ausfällt als bei der Nutzung von CO₂ aus DAC (siehe Abbildung 7-15), da bei CCU der Aufwand zur Abtrennung des CO₂ deutlich niedriger ist als bei der Luftabscheidung, kommt bei einer 50:50 Allokation die Emission aus dem

Verbrennungsprozess hinzu, so dass hier alle OME-Routen ein höheres GWP, im besten Fall gleiches, aufweisen als die Dieselroute.

8.2.2.3. Batterieelektrisches Fahrzeug

Als Sensitivität wird ein batterieelektrisches Fahrzeug (battery electric vehicle, BEV) verglichen mit der Nutzung von OME₁ (am Beispiel der reduktiven Route) und Diesel in einem Diesel-Pkw. Die Herstellung des Fahrzeugs wurde modelliert nach Angaben von Audi (siehe Kapitel 5). Die Entsorgung für die selbst-modellierten Datensätze ist entsprechend der Recycled-Content-Methode berücksichtigt über die Verwendung der jeweiligen Cut-off Datensätze für die verwendeten Materialien aus ecoinvent. Tabelle 8-1 zeigt den Strombedarf pro vkm für heute (WLTC-Zyklus 2017 nach Angaben von Audi und Angaben zum Realverbrauch nach [Spritmonitor 2019]) sowie für 2030 nach dem WLTC-Zyklus nach Angaben von Audi (für 2050 wurde derselbe Wert zugrunde gelegt). Die Ladeverluste wurden mit 10 % angesetzt, die Ladeinfrastruktur wird zur Vereinfachung weggelassen. Für 2030 und 2050 wurde zum Vergleich das BEV jeweils auch mit den Strommischen flexmix und marginal bewertet, für 2050 wurde auch ein Szenario mit 100 % EE-Strom bewertet (70 % Wind, 30 % PV).

Tabelle 8-1: Stromverbrauch BEV

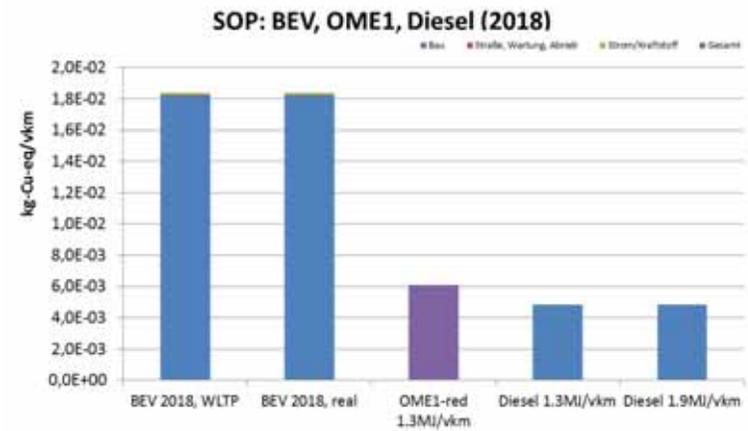
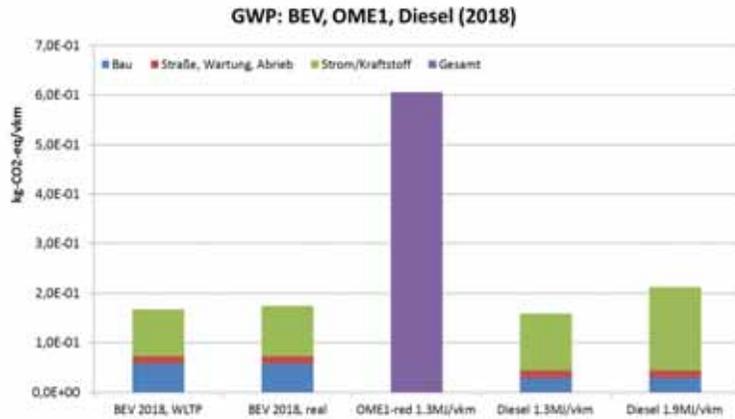
	[Spritmonitor 2019]	WLTC 2017	WLTC 2030	WLTC 2050 (wie 2030, eigene Annahme)
Stromverbrauch [MJ/vkm]	0,54	0,50	0,48	0,48

Die Ergebnisse (siehe Abbildung 8-8 bis Abbildung 8-10, die Zahlenwerte sind in Annex II aufgeführt) zeigen bei den Wirkungskategorien GWP und KEA für den Strommix 2018 signifikant niedrigere Werte für die verschiedene BEV-Szenarien im Vergleich zum OME-Prozess. Im Vergleich zum fossilen Diesel liegen die BEV bereits heute zwischen den Spritverbrauchszenarien. Die Partikelemissionen liegen beim BEV deutlich niedriger als bei OME, aber etwas höher als beim fossilen Diesel. Dies liegt an den Partikelemissionen aus der Herstellung der PV-Anlagen, deren Energiebedarf heute noch zum großen Teil aus Kohleverstromung gedeckt wird. Beim SOP zeigt das BEV deutlich höhere Umweltlasten als die Nutzung von OME oder fossilem Diesel aufgrund der Fahrzeugherstellung.

Auch beim Stromszenario 2030 zeigt sich dieses Bild: GWP und KEA zeigen beim BEV niedrigere Umweltlasten als OME, im Vergleich zum fossilen Diesel liegen sie aber in der gleichen Größenordnung. Hierbei ist allerdings darauf hinzuweisen, dass der Dieserverbrauch für 2030 mit 1 MJ/vkm u. U. eher optimistisch eingeschätzt wurde. Das SOP ist beim BEV aufgrund der Fahrzeugherstellung deutlich höher als bei OME oder fossilem Diesel und die Partikelemissionen liegen deutlich niedriger als bei OME, aber etwas höher als beim fossilen Diesel.

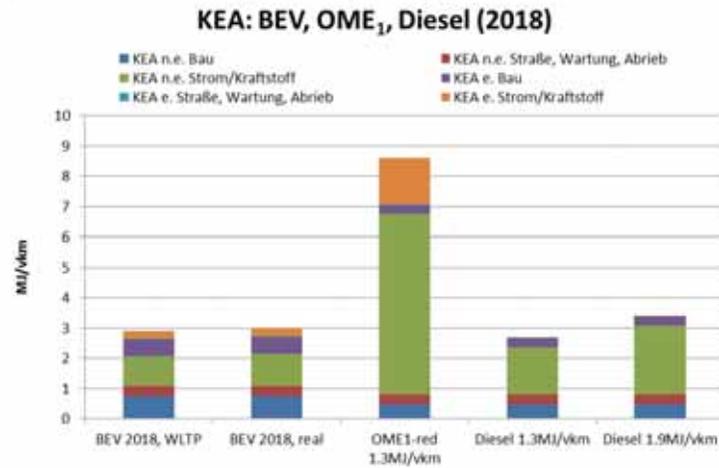
Im Stromszenario 2050 zeigt das BEV beim GWP sowohl im Vergleich zur Nutzung von OME wie auch von fossilem Diesel deutlich niedrigere Werte. Der KEA liegt in der gleichen Größenordnung wie beim fossilen Diesel, während das SOP beim BEV weiterhin deutlich höhere Lasten im Vergleich zu einem Diesel-Pkw aufweist.

Abbildung 8-8: Vergleich BEV mit OME₁ reductive und Diesel (2018)

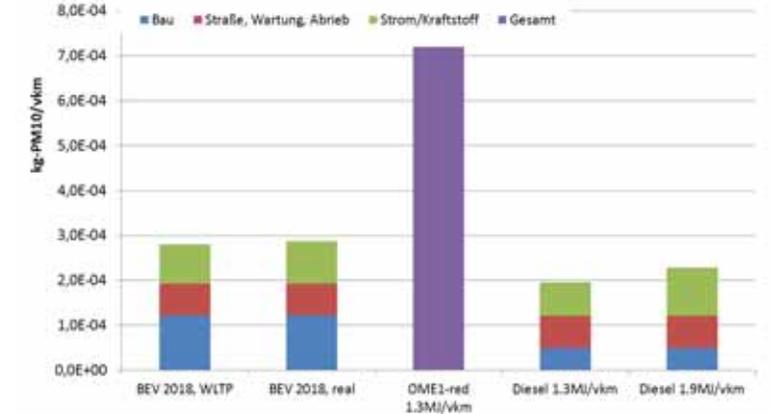


a) Global warming potential (GWP)

b) Surplus Ore Potential (SOP)



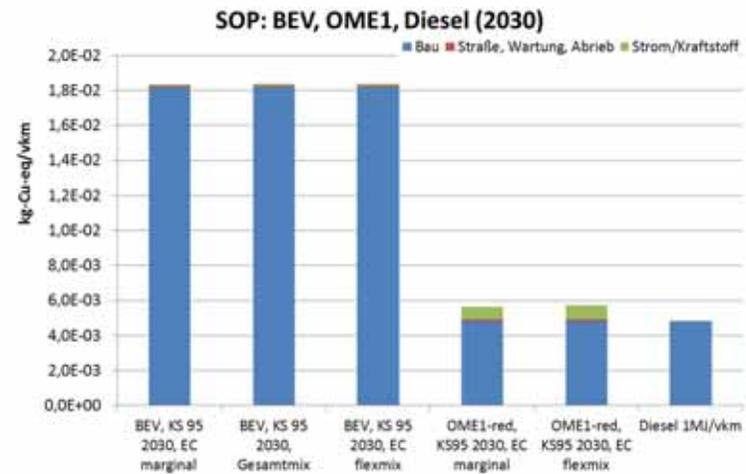
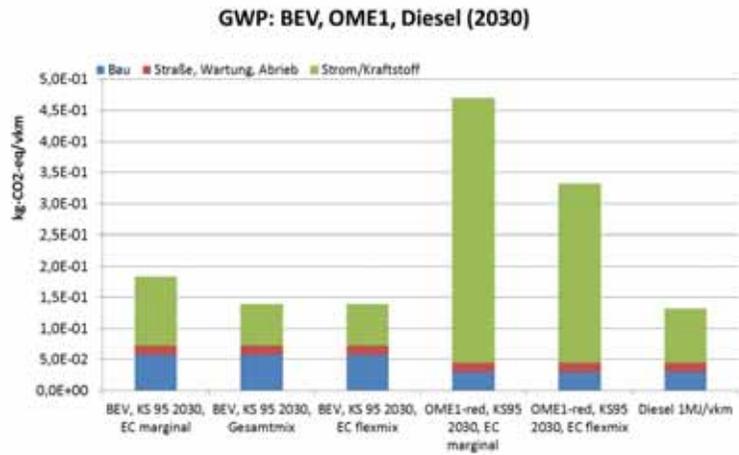
c) Kumulierter Energieaufwand (KEA)



d) Feinstaub PM 10

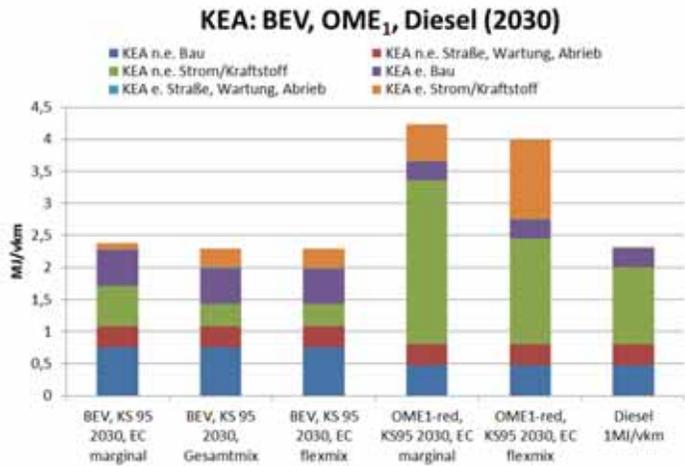
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 8-9: Vergleich BEV mit OME₁ reductive und Diesel (2030)

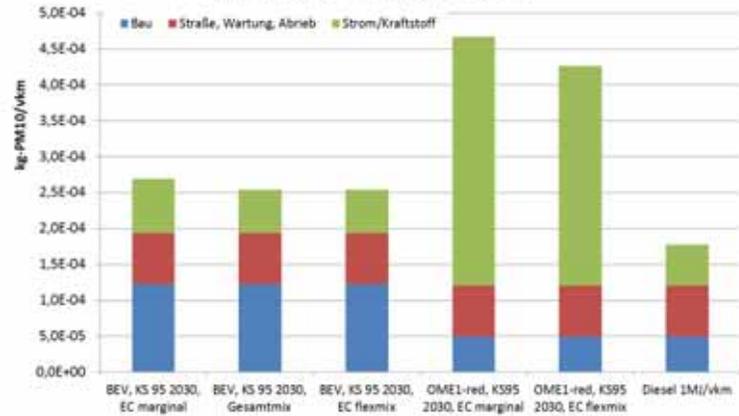


e) Global warming potential (GWP)

f) Surplus Ore Potential (SOP)



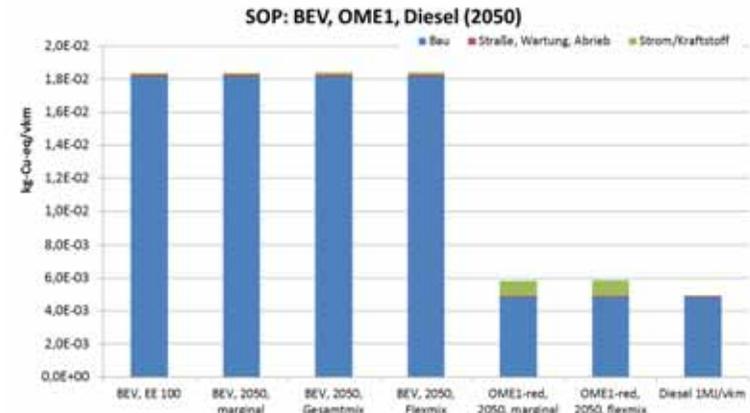
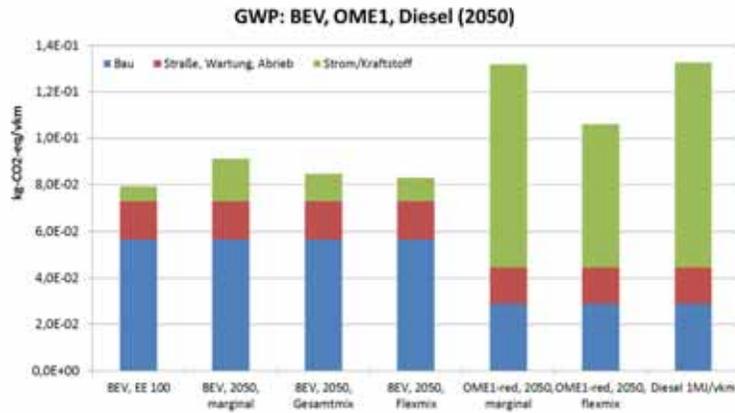
g) Kumulierter Energieaufwand (KEA)



h) Feinstaub PM 10

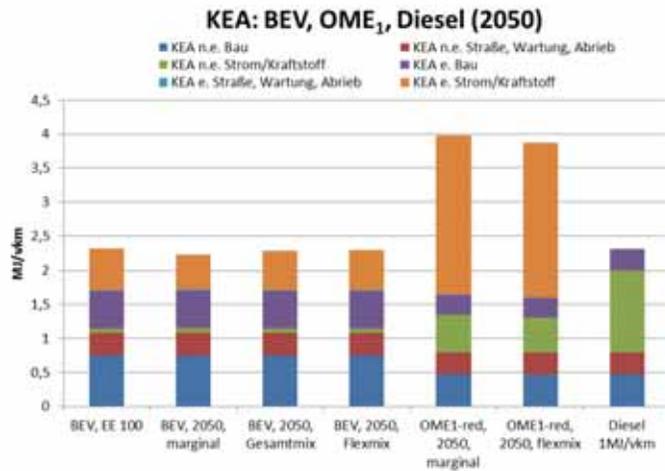
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 8-10: Vergleich BEV mit OME₁ reductive und Diesel (2050)

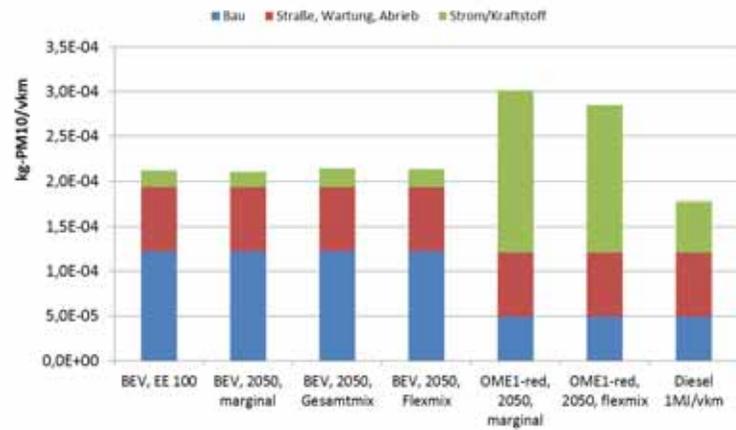


i) Global warming potential (GWP)

j) Surplus Ore Potential (SOP)



k) Kumulierter Energieaufwand (KEA)



l) Feinstaub PM 10

Quelle: Eigene Darstellung

8.2.3. Konsistenzprüfung

In der Datengenerierung wird eine konsistente Vorgehensweise verfolgt. Das Projekt verbindet unterschiedliche Datenlieferanten mit unterschiedlichem Ansatz. So finden sich automatisierte Pilotanlagen (Industrie) bis zu manuellen Laborversuchen (frühes Forschungsstadium, Universität). Im Hinblick auf das Gesamtergebnis wird der Einfluss als eher gering eingeschätzt.

Im Forschungsverbund P2X sind die Materialflüsse qualitativ gut verfolgbar. Es wurden keine generischen Zwischenschritte modelliert, so dass ein konsistenter Zusammenhang hergestellt wurde. Dadurch kann ein konsistenter Datensatz qualitätsgesichert werden.

Eine Inkonsistenz ergibt sich aus dem prospektiven Charakter der Modellierungen. Neben der Unsicherheit, die in den angesetzten Strommixen der betrachteten Zeithorizonte 2030 und 2050 liegen, wurden auch für zukünftige Betrachtungen die Vorketten von Materialien und Energieträgern mit heutigen Produktionsdatensätzen berechnet. Es ist davon auszugehen, dass künftig insbesondere die Emission von Treibhausgasen aus diesen Vorketten geringer ausfallen wird und teilweise Produktionen auf komplett neue, ebenfalls strombasierte Verfahren umgestellt werden.

Die Charakterisierungsfaktoren für die Umweltwirkungen (WP, AP, EP und SOP) sind einer einheitlichen Quelle entnommen [ReCiPe 2016], die Faktoren für PM10 und POCP aus [ReCiPe 2008] v1.13, um Konsistenz mit den von Audi zur Verfügung gestellten Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung zu garantieren.

9. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Nutzung von OME als Pkw-Kraftstoff ist in allen Fällen mit einem deutlich höheren kumulierten Energieaufwand als die Nutzung von konventionellem Diesel verbunden, da der strombasierte Kraftstoff erst durch die Integration von Energie in „energielose“ Grundstoffe (CO₂ und Wasser) erschaffen werden muss. Bei sehr hohen Anteilen erneuerbaren Stroms in der Herstellung sinkt zwar der nicht-erneuerbare KEA unter den fossilen KEA von Diesel. Dies wird jedoch durch den deutlichen Anstieg des erneuerbaren KEA überkompensiert. Als oxygenierter Kraftstoff kann OME deutlich zur Reduktion von Ruß und NO_x-Emissionen am Auspuff beitragen. Andererseits können die Feinstaubemissionen an anderen Stellen, insbesondere in der Stromvorkette durch die Produktion von z. B. Photovoltaikanlagen steigen. Dem kann durch Verbesserungen wie, z. B. durch eine Steigerung des erneuerbaren Anteils an der Stromgewinnung in den Herstellungsländern, vor allem in China, wo ein Großteil der heutigen Photovoltaikanlagen hergestellt wird, entgegengewirkt werden. Insgesamt ergeben sich nach der vorliegenden Bilanz mit Ausnahme des Treibhauspotenzials durchgängig höhere Umweltwirkungen für die Bereitstellung und Nutzung von strombasiertem OME im Pkw im Vergleich zu Diesel. Eine Reduktion der Treibhausgasemissionen wird dabei nur bei einem sehr hohen Anteil erneuerbarer Energien am Strommix erreicht oder über eine direkte Kopplung der PtX-Erzeugungsanlagen mit einer Anlage zur Erzeugung Erneuerbarer Energien (z. B. einem Windpark) unter Berücksichtigung der Zusätzlichkeit der EE-Erzeugung. Die beschriebenen Tendenzen zeigen sich für alle untersuchten OME-Syntheserouten. Im Rahmen der Ungenauigkeiten sind dabei die Umweltwirkungen für die drei OME1-Synthesewege vergleichbar groß. Die reduktive OME1-Synthese weist aufgrund des geringeren Wasserstoffbedarfs nach heutigem Stand der Modellierung den niedrigsten Wert auf. Die OME3-5-Synthese ist v.a. aufgrund des hohen Wärmebedarfs der Trioxansynthese mit deutlich höheren Umweltwirkungen verbunden.

Die Nutzung von strombasierten Kraftstoffen, insbesondere OME, führt zu einem signifikant höheren Strombedarf als die direkte Stromnutzung in batterieelektrischen PKW, sofern kein steigender

Speicherbedarf für die Direktelektrifizierung in Form von Power-to-Gas-Anlagen angesetzt wird, um Dunkelflauten zu überbrücken. Dies zeigt sich in den betrachteten Wirkungskategorien insbesondere beim KEA und beim GWP, sowie aufgrund der Emissionen aus den Vorketten auch beim Feinstaub. Beim Verbrauch mineralischer Ressourcen (SOP) führen sowohl OME-Kraftstoffe als auch die Elektrifizierung des Verkehrs zu höheren Umweltlasten als der Einsatz fossilen Diesels aufgrund der Lasten aus der Stromvorkette. Beim BEV kommen zudem deutliche Lasten aus dem Fahrzeug hinzu. Hier sind durch Optimierungen und signifikante Änderungen in der Vorkette, z. B. durch die Verwendung von erneuerbarem Strom in der Herstellung von Wind- und PV-Anlagen und Batteriezellen, deutliche Verbesserungen in der Zukunft nötig. Weiterhin können die Umweltlasten aus der Verwendung von Technologiemetallen, wie z. B. Lithium, Kobalt oder Seltene Erden durch neue Recyclingsysteme verringert werden. Bei den untersuchten Mittelklassewagen weist die Nutzung eines BEV bereits heute ein GWP auf, das in einer ähnlichen Höhe liegt wie das der Nutzung eines Diesel-Pkws.

Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen 2019 Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. Stand: 06.03.2019
- Audi 2019 Susanne Forster, Audi AG; persönliche Kommunikation, Januar und März 2019
- Bareiß et al. 2019 Bareiß, K.; de la Rua, C.; Mockl, M.; Hamacher, T. (2019): Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems; *Applied Energy* 237, 862–872; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.001>
- Bausa et al. 1998 Bausa, J., Watzdorf, R. v., Marquardt, W.: Shortcut methods for nonideal multicomponent distillation: I. Simple columns, *AIChE Journal*, Bd. 44, Nr. 10, S. 2181–2198, Okt. 1998.
- Bertuccioli et al. 2014 Bertuccioli, L.; Chan, A.; Hart, D.; Lehner, F.; Madden, B.; Standen, E.: Development of Water Electrolysis in the European Union, Fuel Cells and Hydrogen joint Undertaking, Final Report, Feb. 2014
- BGR 2016 Bundesanstalt fur Geowissenschaften und Rohstoffe, „Platin: Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe“ Hannover, Februar 2016
- Brostow 2007 Brostow, W. (Hrsg.): *Physical properties of polymers handbook*. New York, NY: Springer, 2007.
- Burger et al. 2012 Burger, J., Strofer, E., Hasse, H.: Chemical Equilibrium and Reaction Kinetics of the Heterogeneously Catalyzed Formation of Poly(oxymethylene) Dimethyl Ethers from Methylal and Trioxane. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51 (2012), 39, S. 12751–12761
- Burger et al. 2013 Burger, J., Strofer, E., Hasse, H.: Production process for diesel fuel components poly(oxymethylene) dimethyl ethers from methane-based products by hierarchical optimization with varying model depth, *Chemical Engineering Research and Design*, Bd. 91, Nr. 12, S. 2648–2662, Dez. 2013.
- Burre et al. 2018 Burre, J., Bongartz, D., Mitsos, A.: Modellierung eines Benchmarkprozesses zur Produktion von OME3-5 aus regenerativ erzeugtem H₂ und grunem CO₂. Frankfurt am Main 2018: RWTH Aachen University, Aachener Verfahrenstechnik, Systemverfahrenstechnik
- Deutz et al. 2018 Deutz, S., Bongartz, D., Heuser, B., Katelhon, A., Schulze Langenhorst, L., Omari, A., Walters, M., Klankermayer, J., Leitner, W., Mitsos, A., Pischinger, S., Bardow, A.: Cleaner production of cleaner fuels: wind-to-wheel – environmental assessment of CO₂-based oxymethylene ether as a drop-in fuel. *Energy & Environmental Science*, Bd. 11, Nr. 2, S. 331–343, 2018.
- Drunsel et al. 2012 Drunsel, J.-O., Renner, M., Hasse, H.: Experimental study and model of reaction kinetics of heterogeneously catalyzed methylal synthesis. *Chemical Engineering Research and Design*, 90 (2012), 5, S. 696–703.
- EC 2013 European Commission (2013) Commission Recommendation on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of the products and organizations. Annex II: Product Environmental Footprint (PEF) Guide to Commission Recommendation on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of the products and organizations. Official Journal of the European Union Volume 56, L 124, 4.5.2013
- EC 2014 European Commission (2014): Environmental Footprint Pilot Guidance document, - Guidance for the implementation of the EU Product Environmental Footprint (PEF) during the Environmental Footprint (EF) pilot phase, v. 4.0, May 2014

ecoinvent v3.5	Ökobilanz-Datenbank ecoinvent v3.5; http://www.ecoinvent.org ; integriert in Open LCA
Freveland/Hedelund o. J.	Freveland, L. K., Hedelund, J. W.: Process for production of methylal, US 2563742.
Fu/Shen 2007	Fu, Y., & Shen, J. (2007). Selective Oxidation of Methanol to Dimethoxymethane under Mild Conditions over V ₂ O ₅ /TiO ₂ with Enhanced Surface Acidity. <i>Chemical Communications</i> , (21), 2172-2174.
FZJ 2019	Petra Zapp, persönliche Kommunikation, Forschungszentrum Jülich, März 2019
Goedkoop/Spriensma 1999	Goedkoop, M.; Spriensma, R.S., The Eco-indicator 99, a Damage oriented method for LCIA, Ministry VROM, the Hague 1999
Goeppert et al. 2012	Goeppert, A.; Czaun, M.; Surya Prakash, G. K.; Olah, G. A.: Air as the renewable carbon source of the future: an overview of CO ₂ capture from the atmosphere. In: <i>Energy & Environmental Science</i> , Bd. 5, Nr. 7, S. 7833, 2012.
Grützner et al. 2007	Grützner, T., Hasse, H., Lang, N., Siegert, M., Ströfer, E.: Development of a new industrial process for trioxane production, <i>Chemical Engineering Science</i> , Bd. 62, Nr. 18–20, S. 5613–5620, Sep. 2007.
Guinée et al. 2001	Guinée J.B., de Bruijn H., van Duin R., Gorrae M., Heijungs R., Huijbregts M.A.J., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Sleeswijk A.W., Suh S., de Haes H.A.U.: Life cycle assessment – an operational guide to the ISO standards, part 2b. Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden, 2001
ICCT 2017	ICCT Whitepaper (2017): From laboratory to road - a 2017 update of official and "real-world" fuel consumption and CO ₂ values for passenger cars in Europe; https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Lab-to-road-2017_ICCT-white %20paper_06112017_vF.pdf
ifeu 2018a	Balint Simon, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, persönliche Kommunikation, Februar 2018
ifeu 2018b	Thomas Fröhlich, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, persönliche Kommunikation, Dezember 2018
ILCD 2010	ILCD-Handbook: General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance; European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability; 1st Edition, 2010
ISO 2006	DIN EN ISO 14040:2006-10: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006
ISO 2013	ISO/TS 14067:2013 Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification and communication. May 2013
ISO 2018	DIN EN ISO 14044:2018-05: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018, Englische Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018
Klöpffer 2009	Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf; Wiley-VCH, Weinheim, 2009
Kopp et al. 2017	Kopp, M.; Coleman, D.; Stiller, C.; Scheffer, K.; Aichinger, J.; Scheppat, B.: Energiepark Mainz: Technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis. In: <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , Bd. 42, Nr. 19, S. 13311–13320, Mai 2017.

- Lehmann 2015 Lehmann, A., Bach, V., Finkbeiner, M.: Product environmental footprint in policy and market decisions: Applicability and impact assessment. In: Integrated Environmental Assessment and Management 2015 Vol: 11 (3) :417-424. doi: 10.1002/ieam.1658
- Luftl et al. 2014 Luftl, S.; M., V. P.; Sarathchandran, C. (Hrsg.): Polyoxymethylene handbook: structure, properties, applications and their nanocomposites. Hoboken, New Jersey: Scrivener Publishing/Wiley, 2014.
- Mathisen et al. 2014 Mathisen, A.; Skinnemoen, M.M., Nord, L.O.: Evaluating CO2 capture technologies for retrofit in cement plant; Energy Procedia 63 (2014) 6484 – 6491; doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.684
- OEKO 2012 Jenseit, W.; Sutter, J.; Dittrich, S.: LCA-Bewertung einer zukünftigen Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland, USA und China. Im Auftrag der AUDI AG. Darmstadt 2012
- OEKO/ISI 2015 Repenning, J., Emele, L., Blanck, R., Böttcher, H., Dehoust, G., Förster, H., Greiner, B., Harthan, R., Hennenberg, K., Hermann, H., Jörß, W., Loreck, C., Ludig, S., Scheffler, M., Schumacher, K., Wiegmann, K., Zell-Ziegler, C., Braungardt, S., Eichhammer, W., Elsland, R., Fleiter, T., Hartwig, J., Kockat, J., Pfluger, B., Schade, W., Schlomann, B., Sensfuß, F., Ziesing, H., Matthes, F.: Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht, 2015; Öko-Institut, Fraunhofer-ISI; im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; 2015; <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/klimaschutzszenario-2050-2-endbericht/>
- OEKO/ZSW 2016 Stahl, H.; Bauknecht, D.; Hermann, A.; Jenseit, W.; Köhler, A.; Merz, C. (2016): Ableitung von Recycling - und Umwelanforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern. Unter Mitarbeit von L. Jörissen und U. Storr. Hg. v. Umweltbundesamt. Öko-Institut e.V.; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg. Dessau-Roßlau (UBA Texte). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_07_2016_ableitung_von_recycling-und_umwelanforderungen.pdf
- Omari et al. 2017 Omari, A., B. Heuser, B., Pischinger, S.: Potential of oxymethylenetherdiesel blends for ultra-low emission engines, Fuel, Bd. 209, S. 232–237, Dez. 2017.
- Ouda et al. 2018 Ouda, M., Mantei, F., Hesterwerth, K., Bargiacchi, E., Klein, H., & White, R. J. (2018). A hybrid description and evaluation of oxymethylene dimethyl ethers synthesis based on the endothermic dehydrogenation of methanol. Reaction Chemistry & Engineering, 3(5), 676-695.
- Pontzen et al. 2011 Pontzen, F., Liebner, W., Gronemann, V., Rothaemel, M., & Ahlers, B. (2011). CO2-based methanol and DME—Efficient technologies for industrial scale production. Catalysis Today, 171(1), 242-250.
- ReCiPe 2008 Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., de Schryver, A., Struijs, J. & van Zelm, R., 2009. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition. Report 1: characterisation.
- ReCiPe 2013 Goedkoop M.J. / Heijungs, R. / Huijbregts, M. u.a.: ReCiPe 2008 - First Edition. Report I: Characterisation - May 2013. Amersfoort / Leiden / Nijmegen / Bilthoven 2013.
- ReCiPe 2016 Huijbregts, M. A. J.; Steinmann, J.N.; Elshout, P. M. F.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M. D. M.; Hollander, A.; Zijp, M.; van Zelm, R.: ReCiPe 2016. A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization. RIVM Report 2016-0104

- Reuss et al. 2012 Reuss, G., Disteldorf, W., Gamer, A. O., Hilt, A.: Formaldehyde. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Hrsg. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012.
- Roadmap 1.0 Ausfelder, F.; Dura, H. E. (Hrsg.): 1. Roadmap des Kopernikus-Projektes „Power-to-X“: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X). Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien. Herausforderungen – Potentiale – Methoden – Auswirkungen. Bundesministerium für Bildung und Forschung. 2018. Online unter <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/power-to-x>
- Roadmap 2.0 Ausfelder, F.; Dura, H. E. (Hrsg.): 2. Roadmap des Kopernikus-Projektes „Power-to-X“: Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X). Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien. Bundesministerium für Bildung und Forschung. (in prep.)
- RWTH AVT.SVT 2019 Dominik Bongartz, Jannik Burre, RWTH Aachen AVT.SVT, persönliche Kommunikation, Februar 2019
- RWTH LTT 2019 Sarah Deutz, RWTH Aachen LTT, persönliche Kommunikation, 2019
- RWTH VKA 2019 Ahmad Omari, RWTH Aachen VKA, persönliche Kommunikation, 2019
- Schieweck/Klankermayer 2017 Schieweck, B. G. Klankermayer, J.: Tailor-made Molecular Cobalt Catalyst System for the Selective Transformation of Carbon Dioxide to Dialkoxymethane Ethers, *Angewandte Chemie International Edition*, Bd. 56, Nr. 36, S. 10854–10857, Aug. 2017.
- Schmid 2006 Schmid, J. et al.: Gefährdungspotenzial durch Cyclopentan aus der Behandlung von VOC-Kühlgeräten. Im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg. 2006
- Smolinka et al. 2018 Smolinka, T.; Wiebe, N.; Sterchele, P.; Palzer, A.; Lehner, F.; Jansen, M.; Kiemel, S.; Miehe, R.; Wahren, S.; Zimmermann, F.: Studie IndWEDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE 2018
- Spritmonitor 2019 Spritmonitor. Verbrauchswerte real erfahren. Online unter <https://www.spritmonitor.de>. Abgerufen im Mai 2019
- Thenert et al. 2016 Thenert, K. Beydoun, K., Wiesenthal, J., Leitner, W., Klankermayer, J.: Ruthenium-Catalyzed Synthesis of Dialkoxymethane Ethers Utilizing Carbon Dioxide and Molecular Hydrogen, *Angewandte Chemie International Edition*, Bd. 55, Nr. 40, S. 12266–12269, Sep. 2016.
- Töpler & Lehmann 2014 Töpler, J.; Lehmann, J. (Hrsg.): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- UBA 1995 Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bewertung. Umweltbundesamt; Gesellschaft für Consulting und Analytik im Umweltbereich (C.A.U.); ifeu. Umweltbundesamt Texte, 23/95. 1995
- UNEP 2013 Reuter, M.; Hudson, C.; Schaik, A. van; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.: Metal Recycling - Opportunities, Limits, Infrastructure; Hrsg. UNEP, International Resource Panel, Working Group on the Global Metal Flows, 2013
- Van-Dal/Bouallou 2013 Van-Dal, É. S.; Bouallou, C.: Design and simulation of a methanol production plant from CO₂ hydrogenation, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 57, S. 38–45, Okt. 2013.
- VW 2019 Von der Wiege bis zur Bahre: Konsequent von Anfang bis zum Ende denken. Volkswagen 2019. Online verfügbar unter <https://www.volkswagen-nag.com/de/news/stories/2019/04/from-the-well-to-the-wheel.html>; abgerufen am 10.09.2019

- Weger et al. 2017 Weger, L.; Abánades, A.; Butler, T.: Methane cracking as a bridge technology to the hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 42, Nr. 1, S. 720–731, Jan. 2017.
- Weidert et al. 2017 Weidert, J.-O., Burger, J., Renner, M., Blagov, S., Hasse, H.: Development of an Integrated Reaction–Distillation Process for the Production of Methylal, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Bd. 56, Nr. 2, S. 575–582, Jan. 2017.
- Wu et al. 2018 Wu, L., Li, B., & Zhao, C. (2018). Direct Synthesis of Hydrogen and Dimethoxymethane from Methanol on Copper/Silica Catalysts with Optimal Cu⁺/Cu⁰ Sites. *ChemCatChem*, 10(5), 1140-1147.

Annex I: Parameterliste

Parameterliste	Parameter	Wert	Einheit	Quelle/Kommentar
Allgemein	Heizwert, Wasserstoff	120	MJ/kg	
	Heizwert, OME ₁	23,3	MJ/kg	
	Heizwert, OME ₃₋₅	19,2	MJ/kg	Mischung nach Burger et al. 2013, mit 43 % OME ₃ , 34 % OME ₄ , 23 % OME ₅
	Realer Wirkungsgrad Wärmepumpe & Kältemaschine	60 %		RWTH LTT 2019
	Übertragungsverluste Stromnetz	4 %		eigene Abschätzung
Fahrzeug	für Diesel: ecoinvent-Datensatz "transport, passenger car, small size, diesel, EURO 5" mit Adaptierung:			
	Diesel-Pkw	Golf 7 TDI		Audi 2019
	Laufleistung	200.000	km	Audi 2019
	Kraftstoffverbrauch, real, heute	1,9	MJ/vkm	Spritmonitor 2019
	Kraftstoffverbrauch, WLTC, heute	1,3	MJ/vkm	Audi 2019
	Kraftstoffverbrauch, WLTC, 2030 & 2050	1	MJ/vkm	Audi 2019
	CO ₂ -Emissionen	berechnet		stöchiometrisch aus Verbrauch
	NO _x	80	mg/vkm	EURO 6
	PM2.5	4,5	mg/vkm	EURO 6
	für OME: ecoinvent-Datensatz "transport, passenger car, small size, diesel, EURO 5" mit Adaptierung:			
	Diesel-Pkw	Golf 7 TDI		Audi 2019
	Laufleistung	200.000	km	Audi 2019

	Kraftstoffverbrauch, real, heute	1,9	MJ/vkm	Spritmonitor 2019
	Kraftstoffverbrauch, WLTC, heute	1,3	MJ/vkm	Audi 2019
	Kraftstoffverbrauch, WLTC, 2030 & 2050	1	MJ/vkm	Audi 2019
	CO ₂ -Emissionen	berechnet		stöchiometrisch aus Verbrauch
	NO _x	40	mg/vkm	RWTH VKA 2019; angepasst
	PM2.5	0		RWTH VKA 2019; angepasst
	SO ₂ - und Metall-emissionen	0		angepasst
	Batterieelektrischer Pkw			
	Modell	e-Golf 7		Audi 2019
	Laufleistung	200.000	km	Audi 2019
	Stromverbrauch, real, heute	0,54	MJ/vkm	Spritmonitor 2019
	Stromverbrauch, WLTC, heute	0,5	MJ/vkm	Audi 2019
	Stromverbrauch, WLTC, 2030 & 2050	0,48	MJ/vkm	Audi 2019
	Ladeverluste	10 %		
	Wartung, Pkw	6,5E-06		ecoinvent 3.5, wie Diesel-Pkw
	Straße (Bau)	7,0E-04	m*a	ecoinvent 3.5, wie Diesel-Pkw
	Straßenabrieb	-1,3E-05	kg/vkm	ecoinvent 3.5, wie Diesel-Pkw
	Bremsabrieb	-5,8E-06	kg/vkm	ecoinvent 3.5, wie Diesel-Pkw

	Reifenabrieb	-7,4E-05	kg/vkm	ecoinvent 3.5, wie Diesel-Pkw
Wasserstoffbereitstellung				
Elektrolyseur	Vollaststunden, 2030 & 2050	5000	h/a	eigene Annahme
	Systemwirkungsgrad, heizwertbasiert, heute	60 %		Bareiß et al. 2019, Smolinka et al. 2018
	Systemwirkungsgrad, heizwertbasiert, 2030	70 %		eigene Annahme
	Systemwirkungsgrad, heizwertbasiert, 2050	70 %		eigene Annahme, Smolinka et al. 2018
	Materialzusammensetzung der Anlage, heute			s. Bareiß et al. 2019 Table 2 "today" und Table 3
	Materialzusammensetzung der Anlage, 2030 & 2050			s. Bareiß et al. 2019 Table 2 "near future" und Table 3
	Recyclinganteil Platin	23 %		BGR 2016
	Recyclinganteil Iridium	10 %		UNEP 2013 untere Grenze; Iridium mit ecoinvent-Datensatz für Platin, nur Recyclinganteil angepasst
	Lebensdauer des Stacks, heute	7	a	Bareiß et al. 2019
	Lebensdauer des Stacks, 2030 & 2050	10	a	Bareiß et al. 2019
	Lebensdauer der restlichen Anlage	20	a	Bareiß et al. 2019
Wasserstoffkompression	Strombedarf	3	MJ/kg H2	von 30 auf 200 bar, eigene Abschätzung
Wasserstofftransport	Druckgas-Lkw bei 200bar	2,3E-14	item/MJ-H2	Modellierung nach OEKO 2012

	Kraftstoffverbrauch	0,002	kg/MJ-H2	OEKO 2012, vereinfachend fossiler Diesel
	Transportdistanz	200	km	eigene Annahme
Wasserstoffspeicher	Standard-Niederdruck-Tank	4,8E-06	item/kg H2	Materialzusammensetzung s. OEKO/ZSW 2015
CO2-Bereitstellung				
CO2-Abscheidung aus der Luft	Vollaststunden	8400	h/a	ifeu 2018b
	Strombedarf	1,8	MJ/kg CO2	ifeu 2018b basierend auf Daten der Firma clime-works 2017
	Wärmebedarf	5,4	MJ/kg CO2	ifeu 2018b basierend auf Daten der Firma clime-works 2017
	Wärmepumpe	2,63	MJ_th/MJ_el	zwischen 15°C und 100°C; RWTH LTT 2019: technisch möglich, aber bisher nicht kommerziell verfügbar
	Adsorbent	0,00776	kg/kg CO2	ifeu 2018a basierend auf Daten der Firma clime-works 2017
	Betonfundament	0,00511	kg/kg CO2	ifeu 2018b basierend auf Daten der Firma clime-works 2017
	Legierter Stahl	0,00351	kg/kg CO2	ifeu 2018b basierend auf Daten der Firma clime-works 2017
	Niedriglegierter Stahl	0,00287	kg/kg CO2	ifeu 2018b basierend auf Daten der Firma clime-works 2017
	Aluminium	0,00253	kg/kg CO2	ifeu 2018b basierend auf Daten der Firma clime-works 2017
	Kupfer	6,9E-05	kg/kg CO2	ifeu 2018b basierend auf Daten der Firma clime-works 2017

	Ethylenglycol 100 %	0,00145	kg/kg CO2	ifeu 2018b basierend auf Daten der Firma clime-works 2017
	Lebensdauer der Anlage	12	a	ifeu 2018b basierend auf Daten der Firma clime-works 2017
	Anlagenkapazität	1800	t CO2/a	ifeu 2018b basierend auf Daten der Firma clime-works 2017
	CO2-Kompression	0,368	MJ/kg CO2	von 1 auf 70bar, RWTH AVT.SVT 2019
CO2-Abscheidung aus Zementwerk	Strombedarf (Air separation unit & compression and purification unit)	0,9	MJ/kg CO2	Mathisen et al. 2014
	Bau ASU	1,1E-09	items/kg O2	ecoinvent 3.5; Bau CPU vernachlässigt
	Abscheidefaktor CO2	0,96	kg/kg emittiert	Mathisen et al. 2014
	Klinkerherstellung: ecoinvent-Datensatz "clinker production, cutoff, Europe without Switzerland" zur Allokation der CO2-Emissionen und der Vorketten der gemeinsam genutzten Rohstoffe			
	Klinkerfaktor	0,684	kg/kg Zement	ecoinvent 3.5; "cement production, alternative constituents 21-35 %, cutoff, Europe without Switzerland"
CO2-Transport	CO2 Transport Pipeline 200 km ohne Rekompresion	Modellierung FZJ		FZJ 2019
	Transportdistanz	200	km	eigene Annahme
OME-Synthese	Anlage, organische Synthese	4E-11	item/kg OME	ecoinvent 3.5 "chemical factory construction, organics, cutoff, RER"
OME1-Synthese, etablierte Route	Wasserstoff	0,26	kg/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019

	CO2	1,9	kg/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019
	Strom	1,4	MJ/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019
	Wärme	1,2	MJ/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019; vollständige Wärmeintegration
	Wärmepumpe	2,84	MJ_th/MJ_el	zwischen 15°C und 92°C; RWTH LTT 2019: technisch möglich, aber bisher nicht kommerziell verfügbar
OME3-5-Synthese, etablierte Route	Wasserstoff	0,25	kg/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019
	CO2	1,8	kg/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019
	Strom	2,5	MJ/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019
	Wärme	17,9	MJ/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019; vollständige Wärmeintegration
	Wärmepumpe	-		entfällt; Temperaturniveau zu hoch
OME1-Synthese, oxidative Route	Wasserstoff	0,26	kg/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019
	CO2	1,9	kg/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019
	Strom	-	MJ/kg OME	nicht modelliert
	Wärme	0	MJ/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019; Minimum energy demand calculation & vollständige Wärmeintegration
	Kälte @ -23°C	2,1	MJ/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019; Minimum energy demand calculation & vollständige Wärmeintegration
	Kältemaschine	3,95	MJ_th/MJ_el	zwischen 15°C und -23°C
	Kälte @ -87°C	0,46	MJ/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019; Minimum energy demand calculation & vollständige Wärmeintegration

	Kältemaschine	1,47	MJ_th/MJ_el	zwischen 15°C und -87°C
OME1-Synthese, re- duktiv	Wasserstoff	0,22	kg/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019
	CO2	1,9	kg/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019
	Strom	-	MJ/kg OME	nicht modelliert
	Wärme	6,23	MJ/kg OME	RWTH AVT.SVT 2019; Minimum energy demand calculation & vollständige Wärmeintegration
	Wärmepumpe	2,52	MJ_th/MJ_el	zwischen 15°C und 105°C; RWTH LTT 2019: technisch möglich, aber bisher nicht kommerziell verfügbar

Annex II: Ergebnisse der LCA

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der OME-Routen mit Strombezug 2018

Diesel OME1-etab OME1-red OME1-ox OME3-5

		Diesel	OME1-etab	OME1-red	OME1-ox	OME3-5
GWP	kg CO2-eq/vkm	1,42E-01	6,83E-01	6,05E-01	6,52E-01	1,02E+00
SOP	kg Cu-eq/vkm	4,92E-03	6,26E-03	6,11E-03	6,21E-03	6,73E-03
PM10	kg PM10-eq/vkm	1,70E-04	7,90E-04	7,20E-04	7,66E-04	1,11E-03
AP	kg SO2-eq/vkm	1,09E-04	2,41E-03	2,13E-03	2,79E-03	3,60E-03
EP	kg P-eq/vkm	5,53E-06	8,10E-04	7,10E-04	7,68E-04	1,24E-03
POCP	kg NMVOC/vkm	3,58E-04	1,22E-03	1,10E-03	1,17E-03	1,67E-03
KEA n.e.	MJ/vkm	2,4	7,6	6,8	7,3	11,1
KEA e.	MJ/vkm	0,3	2,1	1,8	2,0	3,0

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der OME-Routen mit Strombezug 2030

Diesel OME1-etab, OME1-etab, OME1-red, OME1-red, OME1-ox, OME1-ox, OME3-5-etab, OME3-5-etab,
 KS95 2030, EC
 marginal flexmix marginal flexmix marginal flexmix marginal flexmix marginal flexmix

GWP (kg CO2-eq/vkm)		Diesel	OME1-etab, KS95 2030, EC marginal	OME1-etab, KS95 2030, EC flexmix	OME1-red, KS95 2030, EC marginal	OME1-red, KS95 2030, EC flexmix	OME1-ox, KS95 2030, EC marginal	OME1-ox, KS95 2030, EC flexmix	OME3-5-etab, KS95 2030, EC marginal	OME3-5-etab, KS95 2030, EC flexmix
Vehicle	Herstellung Fahrzeug	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02
	Betrieb: direkte Emissionen	7,52E-02								
CO2	CO2: Wärme		2,36E-02	2,36E-02	2,29E-02	2,29E-02	2,29E-02	2,29E-02	2,72E-02	2,72E-02
	CO2: Strom		2,24E-02	2,24E-02	2,17E-02	2,17E-02	2,17E-02	2,17E-02	2,59E-02	2,59E-02
	CO2: Anlage		6,91E-03	6,91E-03	6,69E-03	6,69E-03	6,69E-03	6,69E-03	7,97E-03	7,97E-03
H2	H2: Strom		4,04E-01	2,42E-01	3,40E-01	2,04E-01	3,91E-01	2,34E-01	4,65E-01	2,79E-01
	H2: Anlage		3,33E-04	3,33E-04	2,85E-04	2,85E-04	3,22E-04	3,22E-04	3,81E-04	3,81E-04

	H2: andere (v.a. Speicher)		1,18E-02	8,95E-03	9,92E-03	7,54E-03	1,14E-02	8,67E-03	1,36E-02	1,03E-02
OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		2,51E-03	2,51E-03	1,48E-02	1,48E-02	4,49E-03	4,49E-03	1,30E-01	1,30E-01
	OME-syn: Strom		7,65E-03	7,65E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,62E-02	1,62E-02
	OME-syn: Anlage		2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,80E-04	2,80E-04
Distribution	CO2-pipeline		7,91E-05	7,91E-05	7,66E-05	7,66E-05	7,66E-05	7,66E-05	9,13E-05	9,13E-05
	H2-G-LKW		1,11E-02	1,11E-02	9,36E-03	9,36E-03	1,08E-02	1,08E-02	1,28E-02	1,28E-02
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	1,28E-02	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,63E-03	1,63E-03
	Total	1,33E-01	5,37E-01	3,72E-01	4,73E-01	3,34E-01	5,11E-01	3,52E-01	7,47E-01	5,57E-01

SOP
(kg Cu-eq/vkm)

Vehicle	Herstellung Fahrzeug	4,83E-03								
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	8,98E-05								
Betrieb: direkte Emissionen										
CO2	CO2: Wärme		3,65E-05	3,65E-05	3,53E-05	3,53E-05	3,53E-05	3,53E-05	4,21E-05	4,21E-05
	CO2: Strom		3,46E-05	3,46E-05	3,36E-05	3,36E-05	3,35E-05	3,35E-05	4,00E-05	4,00E-05
	CO2: Anlage (Pipeline vern.b)		1,77E-04	1,77E-04	1,76E-04	1,76E-04	1,76E-04	1,76E-04	2,13E-04	2,13E-04
H2	H2: Strom		2,90E-04	3,80E-04	2,50E-04	3,20E-04	2,80E-04	3,70E-04	3,40E-04	4,40E-04
	H2: Anlage		2,06E-05	2,06E-05	1,74E-05	1,74E-05	1,99E-05	1,99E-05	2,38E-05	2,38E-05
	H2: andere (v.a. Speicher)		2,36E-04	2,37E-04	1,95E-04	1,96E-04	2,26E-04	2,27E-04	2,77E-04	2,79E-04
OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		3,88E-06	3,88E-06	2,29E-05	2,29E-05	6,93E-06	6,93E-06	2,00E-04	2,00E-04
	OME-syn: Strom		1,18E-05	1,18E-05					2,49E-05	2,49E-05
	OME-syn: Anlage		9,36E-06	9,36E-06	9,36E-06	9,36E-06	9,36E-06	9,36E-06	1,14E-05	1,14E-05
Distribution	CO2-pipeline		3,20E-06	3,20E-06	3,10E-06	3,10E-06	3,09E-06	3,09E-06	3,69E-06	3,69E-06
	H2-G-LKW		2,65E-06	2,65E-06	2,23E-06	2,23E-06	2,56E-06	2,56E-06	3,05E-06	3,05E-06
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	2,16E-05	3,46E-06	3,46E-06	3,46E-06	3,46E-06	3,46E-06	3,46E-06	4,20E-06	4,20E-06
	Total	4,94E-03	5,75E-03	5,84E-03	5,67E-03	5,74E-03	5,71E-03	5,80E-03	6,09E-03	6,19E-03

PM10
(kg PM10.eq/vkm)

Vehicle	Herstellung Fahrzeug	4,94E-05								
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	7,11E-05								

	Betrieb: direkte Emissionen	2,28E-05	9,07E-06	8,93E-06	8,97E-06	8,93E-06	9,10E-06	8,97E-06	9,00E-06	9,04E-06
CO2	CO2: Wärme		2,15E-05	2,15E-05	2,08E-05	2,08E-05	2,08E-05	2,08E-05	2,48E-05	2,48E-05
	CO2: Strom		2,04E-05	2,04E-05	1,98E-05	1,98E-05	1,97E-05	1,97E-05	2,35E-05	2,35E-05
	CO2: Anlage (Pipeline vern.b)		1,83E-05	1,83E-05	1,77E-05	1,77E-05	1,77E-05	1,77E-05	2,11E-05	2,11E-05
H2	H2: Strom		2,80E-04	2,20E-04	2,30E-04	1,90E-04	2,70E-04	2,10E-04	3,20E-04	2,50E-04
	H2: Anlage		1,67E-06	1,67E-06	1,41E-06	1,41E-06	1,62E-06	1,62E-06	1,93E-06	1,93E-06
	H2: andere (v.a. Speicher)		2,41E-05	2,31E-05	2,03E-05	1,95E-05	2,33E-05	2,24E-05	2,78E-05	2,66E-05
OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		2,28E-06	2,28E-06	1,35E-05	1,35E-05	4,03E-06	4,03E-06	1,20E-04	1,20E-04
	OME-syn: Strom		6,96E-06	6,96E-06					1,47E-05	1,47E-05
	OME-syn: Anlage		8,94E-07	8,94E-07	8,94E-07	8,94E-07	8,94E-07	8,94E-07	1,09E-06	1,09E-06
Distribution	CO2-pipeline		3,26E-07	3,26E-07	3,16E-07	3,16E-07	3,16E-07	3,16E-07	3,76E-07	3,76E-07
	H2-G-LKW		1,51E-05	1,51E-05	1,27E-05	1,27E-05	1,46E-05	1,46E-05	1,74E-05	1,74E-05
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	3,44E-05	3,12E-06	3,12E-06	3,12E-06	3,12E-06	3,12E-06	3,12E-06	3,79E-06	3,79E-06
	Total	2,00E-04	5,40E-04	4,80E-04	4,90E-04	4,40E-04	5,20E-04	4,60E-04	7,20E-04	6,60E-04

POCP
(kg NMVOC/vkm)

Vehicle	Herstellung Fahrzeug	8,91E-05								
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	1,18E-04								
	Betrieb: direkte Emissionen	1,16E-04	5,28E-05	5,26E-05	5,27E-05	5,22E-05	5,28E-05	5,24E-05	5,28E-05	5,26E-05
CO2	CO2: Wärme		3,98E-05	3,98E-05	3,85E-05	3,85E-05	3,85E-05	3,85E-05	4,59E-05	4,59E-05
	CO2: Strom		3,78E-05	3,78E-05	3,66E-05	3,66E-05	3,66E-05	3,66E-05	4,36E-05	4,36E-05
	CO2: Anlage (Pipeline vern.b)		2,15E-05	2,15E-05	2,08E-05	2,08E-05	2,08E-05	2,08E-05	2,48E-05	2,48E-05
H2	H2: Strom		6,30E-04	4,10E-04	5,30E-04	3,40E-04	6,10E-04	3,90E-04	7,30E-04	4,70E-04
	H2: Anlage		1,82E-06	1,82E-06	1,54E-06	1,54E-06	1,76E-06	1,76E-06	2,10E-06	2,10E-06
	H2: andere (v.a. Speicher)		3,37E-05	2,97E-05	2,84E-05	2,50E-05	3,26E-05	2,88E-05	3,89E-05	3,43E-05
OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		4,23E-06	4,23E-06	2,49E-05	2,49E-05	7,55E-06	7,55E-06	2,20E-04	2,20E-04
	OME-syn: Strom		1,29E-05	1,29E-05					2,72E-05	2,72E-05
	OME-syn: Anlage		9,84E-07	9,84E-07	9,84E-07	9,84E-07	9,84E-07	9,84E-07	1,19E-06	1,19E-06
Distribution	CO2-pipeline		5,98E-07	5,98E-07	5,80E-07	5,80E-07	5,79E-07	5,79E-07	6,90E-07	6,90E-07
	H2-G-LKW		6,46E-05	6,46E-05	5,44E-05	5,44E-05	6,25E-05	6,25E-05	7,45E-05	7,45E-05
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	7,57E-05	7,83E-06	7,83E-06	7,83E-06	7,83E-06	7,83E-06	7,83E-06	9,50E-06	9,50E-06

	Total	4,00E-04	1,12E-03	8,90E-04	1,01E-03	8,10E-04	1,08E-03	8,50E-04	1,48E-03	1,21E-03
EP (kg P.eq/vkm)										
Vehicle	Herstellung Fahrzeug									
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	5,53E-06								
	Betrieb: direkte Emissionen	0,00E+00								
CO2	CO2: Wärme		6,26E-06	6,26E-06	6,07E-06	6,07E-06	6,06E-06	6,06E-06	7,23E-06	7,23E-06
	CO2: Strom		5,95E-06	5,95E-06	5,77E-06	5,77E-06	5,76E-06	5,76E-06	6,87E-06	6,87E-06
	CO2: Anlage (Pipeline vern.b)		2,92E-06	2,92E-06	2,83E-06	2,83E-06	2,83E-06	2,83E-06	3,37E-06	3,37E-06
H2	H2: Strom		1,10E-04	6,47E-05	9,18E-05	5,45E-05	1,10E-04	6,26E-05	1,30E-04	7,46E-05
	H2: Anlage		6,65E-07	6,65E-07	5,60E-07	5,60E-07	6,44E-07	6,44E-07	7,66E-07	7,66E-07
	H2: andere (v.a. Speicher)		6,23E-06	5,45E-06	5,25E-06	4,60E-06	6,03E-06	5,28E-06	7,18E-06	6,29E-06
OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		6,66E-07	6,66E-07	3,93E-06	3,93E-06	0,00E+00	1,24E-06	3,46E-05	3,46E-05
	OME-syn: Strom		2,03E-06	2,03E-06					4,28E-06	4,28E-06
	OME-syn: Anlage		4,54E-07	4,54E-07	4,54E-07	4,54E-07	4,54E-07	4,54E-07	5,51E-07	5,51E-07
Distribution	CO2-pipeline									
	H2-G-LKW		2,01E-07	2,01E-07	1,69E-07	1,69E-07	1,94E-07	1,94E-07	2,31E-07	2,31E-07
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	1,63E-06	2,62E-07	2,62E-07	2,62E-07	2,62E-07	2,62E-07	2,62E-07	3,18E-07	3,18E-07
	Total	7,16E-06	1,40E-04	9,51E-05	1,20E-04	8,46E-05	1,30E-04	8,96E-05	2,00E-04	1,40E-04
AP (kg SO2.eq/vkm)										
Vehicle	Herstellung Fahrzeug									
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	6,83E-05								
	Betrieb: direkte Emissionen	3,10E-05	1,57E-05	1,58E-05	1,59E-05	1,58E-05	1,57E-05	1,58E-05	1,60E-05	1,58E-05
CO2	CO2: Wärme		7,23E-05	7,23E-05	7,37E-05	7,37E-05	7,36E-05	7,36E-05	8,78E-05	8,78E-05
	CO2: Strom		1,16E-05	1,16E-05	7,00E-05	7,00E-05	7,00E-05	7,00E-05	8,34E-05	8,34E-05
	CO2: Anlage (Pipeline vern.b)		9,09E-05	9,09E-05	2,56E-05	2,56E-05	2,56E-05	2,56E-05	3,05E-05	3,05E-05
H2	H2: Strom		9,10E-04	7,80E-04	7,70E-04	6,60E-04	8,80E-04	7,50E-04	1,05E-03	9,00E-04
	H2: Anlage		3,55E-06	3,55E-06	2,99E-06	2,99E-06	3,44E-06	3,44E-06	4,09E-06	4,09E-06
	H2: andere (v.a. Speicher)		3,32E-05	3,09E-05	2,80E-05	2,60E-05	3,22E-05	2,99E-05	3,83E-05	3,56E-05

OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		8,09E-06	8,09E-06	4,77E-05	4,77E-05	0,00E+00	1,45E-05	4,20E-04	4,20E-04
	OME-syn: Strom		2,47E-05	2,47E-05					5,20E-05	5,20E-05
	OME-syn: Anlage		1,89E-06	1,89E-06	1,89E-06	1,89E-06	1,89E-06	1,89E-06	2,30E-06	2,30E-06
Distribution	CO2-pipeline		2,15E-07	2,15E-07	2,09E-07	2,09E-07	2,08E-07	2,08E-07	2,48E-07	2,48E-07
	H2-G-LKW		3,14E-05	3,14E-05	2,64E-05	2,64E-05	3,04E-05	3,04E-05	3,62E-05	3,62E-05
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	1,10E-04	4,96E-06	4,96E-06	4,96E-06	4,96E-06	4,96E-06	4,96E-06	6,02E-06	6,02E-06
Total		2,40E-04	1,31E-03	1,17E-03	1,17E-03	1,05E-03	1,24E-03	1,11E-03	1,93E-03	1,77E-03

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der OME-Routen mit Strombezug 2050

		Diesel	OME1-etab, 2050, marginal	OME1-etab, 2050, flexmix	OME1-red, 2050, marginal	OME1-red, 2050, flexmix	OME1-ox, 2050, marginal	OME1-ox, 2050, flexmix	OME3-5-etab, 2050, marginal	OME3-5-etab, 2050, flexmix
GWP (kg CO2-eq/vkm)										
Vehicle	Herstellung Fahrzeug	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02
Vehicle	Herstellung Fahrzeug	2,90E-02	2,90E-02	2,90E-02	2,90E-02	2,90E-02	2,90E-02	2,90E-02	2,90E-02	2,90E-02
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	1,60E-02	1,60E-02	1,60E-02	1,60E-02	1,60E-02	1,60E-02	1,60E-02	1,60E-02	1,60E-02
	Betrieb: direkte Emissionen	7,50E-02								
CO2	CO2: Wärme		3,50E-03	3,50E-03	3,40E-03	3,40E-03	3,40E-03	3,40E-03	4,10E-03	4,10E-03
	CO2: Strom		3,30E-03	3,30E-03	3,20E-03	3,20E-03	3,20E-03	3,20E-03	3,90E-03	3,90E-03
	CO2: Anlage		6,90E-03	6,90E-03	6,70E-03	6,70E-03	6,70E-03	6,70E-03	8,00E-03	8,00E-03
H2	H2: Strom		6,80E-02	3,70E-02	5,70E-02	3,10E-02	6,50E-02	3,60E-02	7,80E-02	4,30E-02
	H2: Anlage		3,30E-04	3,30E-04	2,80E-04	2,80E-04	3,20E-04	3,20E-04	3,80E-04	3,80E-04
	H2: andere (v.a. Speicher)		5,90E-03	5,40E-03	5,00E-03	4,50E-03	5,70E-03	5,20E-03	6,80E-03	6,20E-03
OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		3,70E-04	3,70E-04	2,20E-03	2,20E-03	8,10E-04	8,10E-04	1,90E-02	1,90E-02
	OME-syn: Strom		1,10E-03	1,10E-03					2,40E-03	2,40E-03
	OME-syn: Anlage		2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,80E-04	2,80E-04
Distribution	CO2-pipeline		7,90E-05	7,90E-05	7,70E-05	7,70E-05	7,70E-05	7,70E-05	9,10E-05	9,10E-05
	H2-G-LKW		1,10E-02	1,10E-02	9,40E-03	9,40E-03	1,10E-02	1,10E-02	1,30E-02	1,30E-02
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	1,30E-02	1,30E-03	1,30E-03	1,30E-03	1,30E-03	1,30E-03	1,30E-03	1,60E-03	1,60E-03
Total		0,133	0,147	0,116	0,134	0,108	0,142	0,113	0,183	0,147

SOP										
(kg Cu-eq/vkm)										
Vehicle	Herstellung Fahrzeug	4,80E-03								
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	9,00E-05								
Betrieb: direkte Emissionen										
CO2	CO2: Wärme		4,90E-05	4,90E-05	4,70E-05	4,70E-05	4,70E-05	4,70E-05	5,60E-05	5,60E-05
	CO2: Strom		4,60E-05	4,60E-05	4,50E-05	4,50E-05	4,50E-05	4,50E-05	5,40E-05	5,40E-05
	CO2: Anlage (Pipeline vern.b)		1,80E-04	1,80E-04	1,80E-04	1,80E-04	1,80E-04	1,80E-04	2,10E-04	2,10E-04
H2	H2: Strom		4,40E-04	5,00E-04	3,70E-04	4,20E-04	4,30E-04	4,90E-04	5,10E-04	5,80E-04
	H2: Anlage		2,10E-05	2,10E-05	1,70E-05	1,70E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,40E-05	2,40E-05
	H2: andere (v.a. Speicher)		2,40E-04	2,40E-04	2,00E-04	2,00E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,80E-04	2,80E-04
OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		5,20E-06	5,20E-06	3,10E-05	3,10E-05	9,20E-06	9,20E-06	2,70E-04	2,70E-04
	OME-syn: Strom		1,60E-05	1,60E-05					3,30E-05	3,30E-05
	OME-syn: Anlage		9,40E-06	9,40E-06	9,40E-06	9,40E-06	9,40E-06	9,40E-06	1,10E-05	1,10E-05
Distribution	CO2-pipeline		3,20E-06	3,20E-06	3,10E-06	3,10E-06	3,10E-06	3,10E-06	3,70E-06	3,70E-06
	H2-G-LKW		2,60E-06	2,60E-06	2,20E-06	2,20E-06	2,60E-06	2,60E-06	3,10E-06	3,10E-06
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	2,20E-05	3,50E-06	3,50E-06	3,50E-06	3,50E-06	3,50E-06	3,50E-06	4,20E-06	4,20E-06
Total		4,90E-03	5,90E-03	6,00E-03	5,80E-03	5,90E-03	5,90E-03	5,90E-03	6,40E-03	6,40E-03
PM10										
(kg PM10.eq/vkm)										
Vehicle	Herstellung Fahrzeug	4,90E-05								
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	7,10E-05								
Betrieb: direkte Emissionen										
CO2	CO2: Wärme		7,20E-06	7,20E-06	6,90E-06	6,90E-06	6,90E-06	6,90E-06	8,30E-06	8,30E-06
	CO2: Strom		6,80E-06	6,80E-06	6,60E-06	6,60E-06	6,60E-06	6,60E-06	7,90E-06	7,90E-06
	CO2: Anlage (Pipeline vern.b)		1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05	2,10E-05	2,10E-05
H2	H2: Strom		6,20E-05	7,50E-05	5,30E-05	6,30E-05	6,00E-05	7,20E-05	7,20E-05	8,60E-05
	H2: Anlage		1,70E-06	1,70E-06	1,40E-06	1,40E-06	1,60E-06	1,60E-06	1,90E-06	1,90E-06
	H2: andere (v.a. Speicher)		2,00E-05	2,10E-05	1,70E-05	1,70E-05	2,00E-05	2,00E-05	2,30E-05	2,40E-05
OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		7,60E-07	7,60E-07	4,50E-06	4,50E-06	1,40E-06	1,40E-06	4,00E-05	4,00E-05
	OME-syn: Strom		2,30E-06	2,30E-06					4,90E-06	4,90E-06

	OME-syn: Anlage		8,90E-07	8,90E-07	8,90E-07	8,90E-07	8,90E-07	8,90E-07	1,10E-06	1,10E-06
Distribution	CO2-pipeline		3,30E-07	3,30E-07	3,20E-07	3,20E-07	3,20E-07	3,20E-07	3,80E-07	3,80E-07
	H2-G-LKW		1,50E-05	1,50E-05	1,30E-05	1,30E-05	1,50E-05	1,50E-05	1,70E-05	1,70E-05
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	3,40E-05	3,10E-06	3,10E-06	3,10E-06	3,10E-06	3,10E-06	3,10E-06	3,80E-06	3,80E-06
Total		2,00E-04	2,90E-04	3,00E-04	2,70E-04	2,80E-04	2,80E-04	2,90E-04	3,50E-04	3,70E-04

POCP
(kg NMVOC/vkm)

Vehicle	Herstellung Fahrzeug		8,90E-05							
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb		1,20E-04							
	Betrieb: direkte Emissionen		1,20E-04	5,30E-05	5,30E-05	5,20E-05	5,30E-05	5,20E-05	7,50E-05	7,50E-05
CO2	CO2: Wärme		1,00E-05	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-05	1,20E-05	1,20E-05
	CO2: Strom		9,90E-06	9,90E-06	9,60E-06	9,60E-06	9,60E-06	9,60E-06	1,10E-05	1,10E-05
	CO2: Anlage (Pipeline vern.b)		2,10E-05	2,10E-05	2,10E-05	2,10E-05	2,10E-05	2,10E-05	2,50E-05	2,50E-05
H2	H2: Strom		1,30E-04	1,10E-04	1,10E-04	9,20E-05	1,30E-04	1,10E-04	1,50E-04	1,30E-04
	H2: Anlage		1,80E-06	1,80E-06	1,50E-06	1,50E-06	1,80E-06	1,80E-06	2,10E-06	2,10E-06
	H2: andere (v.a. Speicher)		2,50E-05	2,50E-05	2,10E-05	2,10E-05	2,40E-05	2,40E-05	2,90E-05	2,80E-05
OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		1,10E-06	1,10E-06	6,50E-06	6,50E-06	2,20E-06	2,20E-06	5,80E-05	5,80E-05
	OME-syn: Strom		3,40E-06	3,40E-06					7,10E-06	7,10E-06
	OME-syn: Anlage		9,80E-07	9,80E-07	9,80E-07	9,80E-07	9,80E-07	9,80E-07	1,20E-06	1,20E-06
Distribution	CO2-pipeline		6,00E-07	6,00E-07	5,80E-07	5,80E-07	5,80E-07	5,80E-07	6,90E-07	6,90E-07
	H2-G-LKW		6,50E-05	6,50E-05	5,40E-05	5,40E-05	6,30E-05	6,30E-05	7,40E-05	7,40E-05
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	7,60E-05	7,80E-06	7,80E-06	7,80E-06	7,80E-06	7,80E-06	7,80E-06	9,50E-06	9,50E-06
Total		4,00E-04	5,40E-04	5,20E-04	5,00E-04	4,90E-04	5,20E-04	5,30E-04	6,60E-04	6,20E-04

EP
(kg P.eq/vkm)

Vehicle	Herstellung Fahrzeug									
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	5,53E-06								
	Betrieb: direkte Emissionen									
CO2	CO2: Wärme		2,38E-06	2,38E-06	2,30E-06	2,30E-06	2,30E-06	2,30E-06	2,74E-06	2,74E-06
	CO2: Strom		2,26E-06	2,26E-06	2,19E-06	2,19E-06	2,19E-06	2,19E-06	2,61E-06	2,61E-06
	CO2: Anlage (Pipeline vern.b)		2,92E-06	2,92E-06	2,83E-06	2,83E-06	2,83E-06	2,83E-06	3,37E-06	3,37E-06

H2	H2: Strom		1,60E-05	2,41E-05	1,34E-05	2,03E-05	1,54E-05	2,33E-05	1,84E-05	2,78E-05
	H2: Anlage		6,65E-07	6,65E-07	5,60E-07	5,60E-07	6,44E-07	6,44E-07	7,66E-07	7,66E-07
	H2: andere (v.a. Speicher)		4,60E-06	4,74E-06	3,88E-06	4,00E-06	4,46E-06	4,59E-06	5,31E-06	5,47E-06
OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		2,53E-07	2,53E-07	1,49E-06	1,49E-06	4,40E-07	4,40E-07	1,31E-05	1,31E-05
	OME-syn: Strom		7,70E-07	7,70E-07					1,63E-06	1,63E-06
	OME-syn: Anlage		4,54E-07	4,54E-07	4,54E-07	4,54E-07	4,54E-07	4,54E-07	5,51E-07	5,51E-07
Distribution	CO2-pipeline									
	H2-G-LKW		2,01E-07	2,01E-07	1,69E-07	1,69E-07	1,94E-07	1,94E-07	2,31E-07	2,31E-07
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	1,63E-06	2,62E-07	2,62E-07	2,62E-07	2,62E-07	2,62E-07	2,62E-07	3,18E-07	3,18E-07
Total		7,16E-06	3,62E-05	4,45E-05	3,31E-05	4,01E-05	3,43E-05	4,23E-05	5,46E-05	6,41E-05

AP
(kg SO2.eq/vkm)

Vehicle	Herstellung Fahrzeug									
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	6,83E-05								
	Betrieb: direkte Emissionen	3,10E-05	1,60E-05	1,58E-05	1,59E-05	1,59E-05	1,57E-05	1,56E-05	1,59E-05	1,57E-05
CO2	CO2: Wärme		1,23E-05	1,23E-05	1,26E-05	1,26E-05	1,26E-05	1,26E-05	1,50E-05	1,50E-05
	CO2: Strom		1,16E-05	1,16E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,42E-05	1,42E-05
	CO2: Anlage (Pipeline vern.b)		2,78E-05	2,78E-05	2,56E-05	2,56E-05	2,56E-05	2,56E-05	3,05E-05	3,05E-05
H2	H2: Strom		1,20E-04	1,40E-04	1,00E-04	1,20E-04	1,20E-04	1,40E-04	1,40E-04	1,60E-04
	H2: Anlage		3,55E-06	3,55E-06	2,99E-06	2,99E-06	3,44E-06	3,44E-06	4,09E-06	4,09E-06
	H2: andere (v.a. Speicher)		1,94E-05	1,98E-05	1,63E-05	1,67E-05	1,88E-05	1,92E-05	2,24E-05	2,28E-05
OMEsyn	OME-syn: Wärme/Kälte		1,38E-06	1,38E-06	8,14E-06	8,14E-06	2,80E-06	2,80E-06	7,17E-05	7,17E-05
	OME-syn: Strom		4,21E-06	4,21E-06					8,88E-06	8,88E-06
	OME-syn: Anlage		1,89E-06	1,89E-06	1,89E-06	1,89E-06	1,89E-06	1,89E-06	2,30E-06	2,30E-06
Distribution	CO2-pipeline		2,15E-07	2,15E-07	2,09E-07	2,09E-07	2,08E-07	2,08E-07	2,48E-07	2,48E-07
	H2-G-LKW		3,14E-05	3,14E-05	2,64E-05	2,64E-05	3,04E-05	3,04E-05	3,62E-05	3,62E-05
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	1,10E-04	4,96E-06	4,96E-06	4,96E-06	4,96E-06	4,96E-06	4,96E-06	6,02E-06	6,02E-06
Total		0,00024	3,60E-04	3,80E-04	3,30E-04	3,50E-04	3,40E-04	3,60E-04	4,70E-04	4,90E-04

Ergebnisse der OME-Routen mit Diesel-Realverbrauch (Bezugsjahr 2018)

		Diesel	OME1-etab	OME1-red	OME1-ox	OME3-5
GWP	kg CO2-eq/vkm	1,87E-01	9,78E-01	8,64E-01	9,32E-01	1,47E+00
SOP	kg Cu-eq/vkm	4,92E-03	6,88E-03	6,66E-03	6,80E-03	7,57E-03
PM10	kg PM10-eq/vkm	1,84E-04	1,09E-03	9,88E-04	1,05E-03	1,56E-03
AP	kg SO2-eq/vkm	1,27E-04	3,49E-03	3,08E-03	4,05E-03	5,23E-03
EP	kg P-eq/vkm	5,53E-06	1,18E-03	1,04E-03	1,12E-03	1,81E-03
POCP	kg NMVOC/vkm	4,28E-04	1,69E-03	1,51E-03	1,61E-03	2,35E-03

Ergebnisse der OME-Routen mit CCU (Zementwerk), Strombezug 2050 (Allokation 100:0)

		Diesel	OME1-etab, 2050, marginal	OME1-etab, 2050, flexmix	OME1-red, 2050, marginal	OME1-red, 2050, flexmix	OME1-ox, 2050, marginal	OME1-ox, 2050, flexmix	OME3-5-etab, 2050, marginal	OME3-5-etab, 2050, flexmix
GWP	(kg CO2-eq/vkm)									
Vehicle	Herstellung Fahrzeug	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02
	Betrieb: direkte Emissionen	7,52E-02							7,31E-04	7,22E-04
CO2	CO2: gem. VK		2,95E-03	2,95E-03	2,95E-03	2,95E-03	2,95E-03	2,95E-03	3,58E-03	3,58E-03
	CO2: Strom		6,70E-04	6,70E-04	6,49E-04	6,49E-04	6,47E-04	6,47E-04	7,72E-04	7,72E-04
	CO2: Emission		3,93E-02	3,93E-02	3,93E-02	3,93E-02	3,93E-02	3,93E-02	4,77E-02	4,77E-02
H2	H2: Strom		6,75E-02	3,73E-02	5,69E-02	3,15E-02	6,54E-02	3,61E-02	7,79E-02	4,30E-02
	H2: Anlage		3,33E-04	3,33E-04	2,85E-04	2,85E-04	3,22E-04	3,22E-04	3,81E-04	3,81E-04
	H2: andere (v.a. Speicher)		5,90E-03	5,37E-03	4,97E-03	4,52E-03	5,71E-03	5,20E-03	6,80E-03	6,19E-03
OMEsyn	OME-syn: Wärme		3,70E-04	3,70E-04	2,20E-03	2,20E-03			1,94E-02	1,94E-02
	OME-syn: Strom		1,14E-03	1,14E-03					2,40E-03	2,40E-03
	OME-syn: Anlage		2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,80E-04	2,80E-04
Distribution	CO2-pipeline		7,91E-05	7,91E-05	7,66E-05	7,66E-05	7,66E-05	7,66E-05	9,13E-05	9,13E-05
	H2-G-LKW		1,11E-02	1,11E-02	9,36E-03	9,36E-03	1,08E-02	1,08E-02	1,28E-02	1,28E-02
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	1,28E-02	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,63E-03	1,63E-03
Total		1,33E-01	1,76E-01	1,45E-01	1,63E-01	1,37E-01	1,71E-01	1,42E-01	2,19E-01	1,84E-01

Ergebnisse der OME-Routen mit CCU (Zementwerk), Strombezug 2050 (Allokation 50:50)

		Diesel	OME1-etab, 2050, marginal	OME1-etab, 2050, flexmix	OME1-red, 2050, marginal	OME1-red, 2050, flexmix	OME1-ox, 2050, marginal	OME1-ox, 2050, flexmix	OME3-5-etab, 2050, marginal	OME3-5-etab, 2050, flexmix
GWP (kg CO2-eq/vkm)										
Vehicle	Herstellung Fahrzeug	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02
	Betrieb: Straße, Wartung, Abrieb	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02
	Betrieb: direkte Emissionen	7,52E-02							7,31E-04	7,22E-04
CO2	CO2: Wärme									
	CO2: Strom		1,34E-03	1,34E-03	1,30E-03	1,30E-03	1,29E-03	1,29E-03	1,54E-03	1,54E-03
	CO2: Anlage									
H2	H2: Strom		6,75E-02	3,73E-02	5,69E-02	3,15E-02	6,54E-02	3,61E-02	7,79E-02	4,30E-02
	H2: Anlage		3,33E-04	3,33E-04	2,85E-04	2,85E-04	3,22E-04	3,22E-04	3,81E-04	3,81E-04
	H2: andere (v.a. Speicher)		5,90E-03	5,37E-03	4,97E-03	4,52E-03	5,71E-03	5,20E-03	6,80E-03	6,19E-03
OMEsyn	OME-syn: Wärme		3,70E-04	3,70E-04	2,20E-03	2,20E-03			1,94E-02	1,94E-02
	OME-syn: Strom		1,14E-03	1,14E-03					2,40E-03	2,40E-03
	OME-syn: Anlage		2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,80E-04	2,80E-04
Distribution	CO2-pipeline		7,91E-05	7,91E-05	7,66E-05	7,66E-05	7,66E-05	7,66E-05	9,13E-05	9,13E-05
	H2-G-LKW		1,11E-02	1,11E-02	9,36E-03	9,36E-03	1,08E-02	1,08E-02	1,28E-02	1,28E-02
	Diesel-Vorkette / OME-Distribution	1,28E-02	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,34E-03	1,63E-03	1,63E-03
Total		1,33E-01	1,34E-01	1,03E-01	1,21E-01	9,53E-02	1,30E-01	9,99E-02	1,68E-01	1,33E-01

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung des Vergleichs BEV mit OME1 reductive und Diesel (2018)

	BEV, WLTC	BEV, real	OME1-red 1.3MJ/vkm	Diesel 1.3MJ/vkm	Diesel 1.9MJ/vkm
GWP (kg CO2-eq/vkm)					
Bau	5,68E-02	5,68E-02		2,88E-02	2,88E-02
Straße, Wartung, Abrieb	1,58E-02	1,58E-02		1,58E-02	1,58E-02
Strom/Kraftstoff	9,42E-02	1,02E-01		1,14E-01	1,67E-01
Total	1,67E-01	1,74E-01	6,05E-01	1,59E-01	2,12E-01

SOP (kg Cu-eq/vkm)					
Bau	1,82E-02	1,82E-02		4,83E-03	4,83E-03
Straße, Wartung, Abrieb	8,98E-05	8,98E-05		0,00E+00	0,00E+00
Strom/Kraftstoff	1,04E-04	1,12E-04		2,80E-05	4,10E-05
Total	1,84E-02	1,84E-02	6,11E-03	4,86E-03	4,87E-03

PM10 (kg PM10.eq/vkm)					
Bau	1,22E-04	1,22E-04		4,94E-05	4,94E-05
Straße, Wartung, Abrieb	7,11E-05	7,11E-05		7,11E-05	7,11E-05
Strom/Kraftstoff	8,75E-05	9,45E-05		7,44E-05	1,09E-04
Total	2,81E-04	2,88E-04	7,20E-04	1,95E-04	2,29E-04

KEA (MJ/vkm)					
KEA n.e. Bau	7,54E-01	7,54E-01	4,75E-01	4,75E-01	4,75E-01
KEA n.e. Straße, Wartung, Abrieb	3,22E-01	3,22E-01	3,22E-01	3,22E-01	3,22E-01
KEA n.e. Strom/Kraftstoff	9,98E-01	1,08E+00	5,96E+00	1,57E+00	2,29E+00
KEA e. Bau	5,53E-01	5,53E-01	2,89E-01	2,89E-01	2,89E-01
KEA e. Straße, Wartung, Abrieb	1,39E-02	1,39E-02	1,39E-02	1,39E-02	1,39E-02
KEA e. Strom/Kraftstoff	2,68E-01	2,90E-01	1,53E+00	6,21E-03	9,07E-03

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung des Vergleichs BEV BEV mit OME1 reductive und Diesel (2030)

BEV, EC marginal BEV, Gesamtmix BEV, EC flexmix OME1-red, EC marginal OME1-red, EC flexmix Diesel 1MJ/vkm

GWP (kg CO2-eq/vkm)						
Bau	5,68E-02	5,68E-02	5,68E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02
Straße, Wartung, Abrieb	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02
Strom/Kraftstoff	1,11E-01	6,70E-02	6,64E-02	4,26E-01	2,87E-01	8,79E-02
Gesamt	1,83E-01	1,40E-01	1,39E-01	1,63E-01	1,59E-01	1,32E-01

SOP (kg Cu-eq/vkm)						
Bau	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02	4,83E-03	4,83E-03	4,83E-03
Straße, Wartung, Abrieb	8,98E-05	8,98E-05	8,98E-05	8,98E-05	8,98E-05	0,00E+00
Strom/Kraftstoff	8,05E-05	1,00E-04	1,00E-04	7,45E-04	8,16E-04	2,16E-05

Gesamt	1,84E-02	1,84E-02	1,84E-02	1,84E-02	1,84E-02	4,85E-03
PM10 (kg PM10.eq/vkm)						
Bau	1,22E-04	1,22E-04	1,22E-04	4,94E-05	4,94E-05	4,94E-05
Straße, Wartung, Abrieb	7,11E-05	7,11E-05	7,11E-05	7,11E-05	7,11E-05	7,11E-05
Strom/Kraftstoff	7,61E-05	6,09E-05	6,04E-05	3,46E-04	3,05E-04	5,72E-05
Gesamt	3,10E-04	2,90E-04	2,90E-04	3,20E-04	3,20E-04	1,78E-04
KEA (MJ/vkm)						
KEA n.e. Bau	7,54E-01	7,54E-01	7,54E-01	4,75E-01	4,75E-01	4,75E-01
KEA n.e. Straße, Wartung, Abrieb	3,22E-01	3,22E-01	3,22E-01	3,22E-01	3,22E-01	3,22E-01
KEA n.e. Strom/Kraftstoff	6,41E-01	3,54E-01	3,51E-01	2,56E+00	1,66E+00	1,20E+00
KEA e. Bau	5,53E-01	5,53E-01	5,53E-01	2,89E-01	2,89E-01	2,89E-01
KEA e. Straße, Wartung, Abrieb	1,39E-02	1,39E-02	1,39E-02	1,39E-02	1,39E-02	1,39E-02
KEA e. Strom/Kraftstoff	9,05E-02	3,02E-01	3,05E-01	5,66E-01	1,23E+00	4,77E-03

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung des Vergleichs BEV BEV mit OME1 reductive und Diesel (2050)

	BEV, EE 100	BEV, EC marginal	BEV, Gesamt-mix	BEV, flexmix	EC OME1-red, marginal	OME1-red, flexmix	Diesel 1MJ/vkm
GWP (kg CO2-eq/vkm)							
Bau	5,68E-02	5,68E-02	5,68E-02	5,68E-02	2,88E-02	2,88E-02	2,88E-02
Straße, Wartung, Abrieb	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02	1,58E-02
Strom/Kraftstoff	6,46E-03	1,85E-02	1,21E-02	1,02E-02	8,74E-02	6,15E-02	8,79E-02
Gesamt	7,90E-02	9,11E-02	8,46E-02	8,28E-02	1,83E-01	1,40E-01	1,32E-01
SOP (kg Cu-eq/vkm)							
Bau	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02	1,82E-02	4,83E-03	4,83E-03	4,83E-03
Straße, Wartung, Abrieb	8,98E-05	8,98E-05	8,98E-05	8,98E-05	8,98E-05	8,98E-05	8,98E-05
Strom/Kraftstoff	1,00E-04	1,20E-04	1,40E-04	1,40E-04	8,98E-04	9,50E-04	2,16E-05
Gesamt	1,84E-02	1,84E-02	1,84E-02	1,84E-02	1,84E-02	1,84E-02	4,94E-03
							0,00E+00

PM10 (kg PM10.eq/vkm)							
Bau	1,22E-04	1,22E-04	1,22E-04	1,22E-04	4,94E-05	4,94E-05	4,94E-05
Straße, War- tung, Abrieb	7,11E-05						
Strom/Kraftstoff	1,90E-05	1,71E-05	2,11E-05	2,05E-05	1,81E-04	1,64E-04	5,72E-05
Gesamt	2,50E-04	2,50E-04	2,50E-04	2,50E-04	3,10E-04	2,90E-04	1,78E-04

KEA (MJ/vkm)							
KEA n.e. Bau	7,54E-01	7,54E-01	7,54E-01	7,54E-01	4,75E-01	4,75E-01	4,75E-01
KEA n.e. Straße, War- tung, Abrieb	3,22E-01						
KEA n.e. Strom/Kraftstoff	6,47E-02	7,69E-02	7,04E-02	6,47E-02	5,47E-01	5,10E-01	1,20E+00
KEA e. Bau	5,53E-01	5,53E-01	5,53E-01	5,53E-01	2,89E-01	2,89E-01	2,89E-01
KEA e. Straße, Wartung, Ab- rieb	1,39E-02						
KEA e. Strom/Kraftstoff	6,08E-01	5,17E-01	5,65E-01	5,77E-01	2,34E+00	2,26E+00	4,77E-03

Annex III: Externes kritisches Gutachten