

Mai 2023

Ergebnisbericht

reFuels – Kraftstoffe neu denken

gefördert durch
den Strategiedialog Automobilwirtschaft Baden-Württemberg SDA
und
das Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Kontakt

Dr.-Ing. Olaf Toedter

Email: olaf.toedter@kit.edu

Tel. 0721-608 43639

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

KIT – Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft





Inhalt

Inhalt.....	2
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
1 Management Summary	9
2 Problemstellung und Stand der Technik	11
3 Struktur des Projektes	12
4 Cluster A: Kraftstoffbereitstellung	15
4.1 Cluster A1: Techno-ökonomische Analyse und energiewirtschaftliche Betrachtung	16
4.1.1 Prozesssimulation und techno-ökonomische Analyse	16
4.1.2 Innerdeutsche reFuels-Produktion	20
4.1.3 Betrachtung von Greenfield-Ansätzen bei der reFuels Produktion	23
4.2 Cluster A2: Herstellung Methanol-basierter Ottokraftstoffe	33
4.2.1 Herstellung Methanol-basierter Ottokraftstoffe.....	33
4.2.2 Aufbereitung aromatenreicher Schwerbenzinfractionen	36
4.2.3 Herstellung von Diesekraftstoffen.....	43
4.3 Cluster A3: Konzeptstudie für eine Demoanlage zur Raffinerie-integrierten Herstellung von reFuels	49
4.3.1 Entwicklung des Anlagenkonzeptes	49
4.3.2 Variantenvergleich der Massen- und Energiebilanzen.....	50
4.3.3 Ansätze zur Entwicklung von Raffinerien zur Erzeugung von reFuels.....	52
5 Cluster B: Motorische Anwendung der Kraftstoffe	55
5.1 Kraftstoffanalyse.....	55
5.1.1 Benzinkraftstoff	55
5.1.2 Diesekraftstoff	57
5.2 Materialverträglichkeit	57
5.3 Bewertung der Kraftstoffe beim reFuels Partner Bosch	59
5.3.1 Übersicht Projektaktivitäten - Diesel.....	59
5.3.2 Übersicht Projektaktivitäten - Benzin.....	65
5.4 Messtechnik.....	71
5.5 Untersuchungen am Einzylinderforschungsaggregat.....	72
5.5.1 Untersuchungen mit Diesekraftstoffen	72
5.5.2 Untersuchungen mit Benzinkraftstoffen.....	73





- 5.6 Untersuchungen an Komponentenprüfständen 76
 - 5.6.1 Untersuchungen des Sprayaufbruchverhaltens an einer Druckkammer 76
 - 5.6.2 Einfluss auf Dichtungskomponenten 77
 - 5.6.3 Untersuchungen am CFR-Oktananzahlmotor 78
- 5.7 Untersuchungen am Vollmotor 78
 - 5.7.1 Untersuchungen mit Dieselmotoren 78
 - 5.7.2 Untersuchungen mit Benzinmotoren 82
- 5.8 Reale Emissionsmessungen auf der Straße (RDE) 87
 - 5.8.1 Allgemeine Anforderungen 87
 - 5.8.2 Ergebnisse der RDE-Messungen für die Dieselmotoren 90
 - 5.8.3 Ergebnisse der RDE-Messungen für die Benzinmotoren 92
- 5.9 Flottenversuch Lila Logistik/Porsche Logistik mit synthetischem paraffinischem Diesel 96
- 5.10 Weitere motorische Untersuchungen 97
- 5.11 Fazit der motorischen Untersuchungen 97
- 6 Cluster C: Technologiepartnerschaft reFuels 97**
 - 6.1 Cluster C1: Systemanalyse und Nachhaltigkeitsbewertung 98
 - 6.1.1 Systemanalyse 98
 - 6.1.2 Nachhaltigkeitsbewertung 102
 - 6.2 Cluster C2: reFuels und Zivilgesellschaft 113
 - 6.2.1 Dokumentenbasierte Positionsanalyse 113
 - 6.2.2 Gruppendelphi-Workshop 116
 - 6.3 Cluster C3: Kommunikation im Projekt 119
- 7 References Fehler! Textmarke nicht definiert.**



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das Energy Lab 2.0 der Karlsruher Institut für Technologie KIT als Pilotanlage zur e-Fuel Synthese 12

Abbildung 2: Gliederung der Stakeholder im Projekt reFuels - Kraftstoffe neu denken 13

Abbildung 3; Organisations-Struktur des Projektes reFuels - Kraftstoffe neu denken 13

Abbildung 4: Systematische Darstellung der Struktur und Zusammenhänge des Projektes reFuels - Kraftstoffe neu denken..... 14

Abbildung 5: Informations- Stoff- und Datenströme im Projekt reFuels - Kraftstoffe neu denken 15

Abbildung 6: Vergleich Investitionsbedarfszusammensetzung von PtL-Anlagen mit 100.000 t/a Produktionskapazität, basierend auf FTS und MtG, je nach Szenario und Bezugszeitpunkt in Mio. €₂₀₂₂. 18

Abbildung 7: Vergleich Zusammensetzung Gesteungskosten PtL-Kraftstoffen, basierend auf FTS und MtG, je nach Szenario und Bezugszeitpunkt in €₂₀₂₂/Liter. 19

Abbildung 8: Abhängigkeit der Kraftstoffgestehungskosten in €₂₀₂₂ von Jahresvolllaststunden und Strombezugskosten für den Bezugszeitpunkt 2030 je nach angenommenem Szenario. 20

Abbildung 9: Optimale Allokation und Kapazitäten der Elektrolyse innerhalb des deutschen Energiesystems ohne Beschränkung des Strombezugs in 2030. (rot: Übertragungsnetzleitungen, blau: HGÜ-Verbindungen, grün: Elektrolyseure 22

Abbildung 10: Optimale Allokation und Kapazitäten der Elektrolyse im deutschen Energiesystem mit Beschränkung des Strombezugs durch die RED II-Kriterien in 2030. 23

Abbildung 11: In- und Outputs des PtX-Standortmodells 26

Abbildung 12: Potentielle Volllaststunden der Windkraftanlagen je Standort für alle Wetterjahre..... 27

Abbildung 13: Potentielle Stromgestehungskosten der Windkraftanlagen je Standort für alle Wetterjahre.. 27

Abbildung 14: Potentielle Volllaststunden der Photovoltaikanlagen je Standort für alle Wetterjahre..... 27

Abbildung 15: Potentielle Stromgestehungskosten der Photovoltaikanlagen je Standort für alle Wetterjahre 28

Abbildung 16: Normiertes Wind- und Solarprofil für den ausgewählten Standort in Marokko für einige Stunden des Jahres 1999 28

Abbildung 17: Produktionskosten der verschiedenen Prozessrouten und Standorte. 29

Abbildung 18: Wasserstoffspeicherkapazität der FTS-DAC und MtG-DAC-Route. 30

Abbildung 19: Verhältnis der Elektrolysekapazität zur Elektrolyseauslastung. 31

Abbildung 20: Potentielle Stromerzeugung und Elektrolyseleistung..... 31

Abbildung 21: Zeitliche Stromerzeugung aus PV und Wind..... 32

Abbildung 22: Blockfließbild der bioliq[®]-Syntheseanlage (grün: CO₂-Abtrennung, blau: WGS-Reaktor, orange: DME-Synthese, violett: Benzin-Synthese, flieder: Benzinstabilisierung durch Destillation)..... 34

Abbildung 23: a) Grundfließbild für das Upgrading des bioliq[®]-Kraftstoffs im Rahmen von reFuels b) Festbettreaktor am Engler-Bunte-Institut für das Hydroprocessing des Schwerbenzins. 38

Abbildung 24: Siedekennwerte in Abhängigkeit der Benzinausbeute unter Variation der Temperatur. [21].. 39

Abbildung 25: a) MOZ (schwarze Symbole) und ROZ (weiße Symbole) in Abhängigkeit der Benzinausbeute unter Variation der Temperatur und b) Ringschrumpfung der C7-Fraktion in Abhängigkeit der Reaktionstemperatur. [21]..... 40

Abbildung 26: bioliq[®] Rohbenzin (weiß gepunktet), bioliq[®]-Blend (grau gepunktet) und EBI-Blend (schwarz gepunktet) im Vergleich zur DIN EN 228 41

Abbildung 27: Durch das Modell vorhergesagte YSI aufgetragen über den Erwartungswerten für das Testdatenset..... 42

Abbildung 28: Prozesskette zur Herstellung von Dieselmotorkraftstoffen mittels der Fischer-Tropsch-Synthese..... 43

Abbildung 29: Aufbau des Anlagenverbundes für die Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung von Diesel (Bild: KIT-PPQ)..... 44





Abbildung 30: Synthese-Container zur Herstellung von Fischer-Tropsch-Kraftstoffen aus CO₂ und Wasserstoff am EnergyLab 2.0 (Bild: Ineratec GmbH) 44

Abbildung 31: *Technikumsanlage für die Fischer-Tropsch-Synthese in Kombination mit Hydrocracking-Reaktoren.* 45

Abbildung 32: Integrale kohlenstoffnormierte Produktselektivitäten der flüssigen bzw. festen Produktfraktionen des Gesamtprozesses für verschiedene Wachsumsätze X_{C22+} im Hydrocracker bei konstantem FT-Zulauf..... 46

Abbildung 33: Verteilung der n- und iso-Alkane nach der hydrierenden Aufarbeitung. 46

Abbildung 34: Vakuumdestillationsanlage für kleine Chargen im Technikum des IMVT..... 48

Abbildung 35: Schema des Konzepts zur Diesel-Herstellung 50

Abbildung 36: Schema des Konzepts zur Kerosin-Herstellung..... 50

Abbildung 37: Variantenvergleich zur Produktionskapazität (a), Kohlenstoffausnutzung (b), CO₂-Einsparungspotenzial (c) und Energieeffizienz (d). Von unten nach oben: Basisfall 1, Varianten 2-4 jeweils für Diesel und Kerosin (blau bzw. orange) sowie die technische Variante 5 und 6 mit RWGS bzw. Co-SOEC für Diesel (blau)..... 51

Abbildung 38: Degression der Herstellkosten mit der Produktionskapazität der Demoanlage 52

Abbildung 39: Modulares Demonstrationsanlagenkonzept für grüne Raffinerien zur Herstellung erneuerbarer Kraft- und Brennstoffe..... 54

Abbildung 40: Analysen zum Einfluss paraffinischen Diesels auf Elastomerdichtungen 58

Abbildung 41 kinematische Viskosität verschiedener Dieselmotorkraftstoffe 60

Abbildung 42 Dichtekennlinien verschiedener Dieselmotorkraftstoffe..... 60

Abbildung 43 Mengenabweichung 2000bar und 800µs Ansteuerdauer (VL PP) 62

Abbildung 44 Einspritzrate gravimetrisch 2000bar, 800µs Ansteuerdauer 62

Abbildung 45 Wirkung des Dichteeffekts auf Einspritzrate und Merkmalerkennung NCC 63

Abbildung 46 Betriebstankstelle Bosch Schwieberdingen 64

Abbildung 47 Schattenbildaufnahmen zum Zeitpunkt 1,26 ms nach elektrischem Start der Einspritzung (oben) und zeitlicher Verlauf der Eindringtiefe und des Spraywinkels (unten) bei jeweils 20°C und 200°C Kammertemperatur für die Kraftstoffe Bosch EU5 Cert, POSYN und G40. Kraftstofftemperatur 85°C. Kammerdruck 400 mbar abs., Kraftstoffdruck 350 bar. Einspritzdauer konstant 1,0 ms für alle Kraftstoffe. . 67

Abbildung 48 Wichtige motorische Kenngrößen und Rohemissionen für die Kennfeldmessung (Lastvariation BMEP) bei 2000 U/min und betriebswarmen Motor für die im Projekt verwendeten Kraftstoffkandidaten. 68

Abbildung 49 PN Rohpartikelemissionen der untersuchten Kraftstoffkandidaten für den 14 Stunden PN Drift Dauerlauf und Fotos der Düsenkuppen nach dem Dauerlauf inkl. Beispielfoto eines gereinigten Injektors am Start der Messung. 69

Abbildung 50 Ölverdünnungsraten für Bosch EU5 Cert, POSYN und G40..... 70

Abbildung 51 Zusammenfassung der funktionalen Bewertung im Bosch Kraftstoffbewertungsprogramm. 71

Abbildung 47 Prüfstands Aufbau Einzylinderaggregat Diesel..... 72

Abbildung 48 Links: Brenndauer in Abhängigkeit von Lambda; Rechts: Stickoxidemissionen in Abhängigkeit der AGR-Rate (2000 U/min und 4 - 7,5 bar pmi) 73

Abbildung 49 Partikelanzahlmissionen unterschiedlicher bioliq-Chargen bei 2000 min⁻¹..... 74

Abbildung 50: Porsche Einzylindermotor aufgebaut am Prüfstand des IFKM 74

Abbildung 51: Ergebnisse der Versuche mit SP98 und G40 am Prüfstand bei der Porsche AG..... 75

Abbildung 52: Ergebnisse der Versuche mit E5 und G40 am Prüfstand am IFKM 76

Abbildung 53 Sprayuntersuchungen von bioliq®-Chargen..... 77

Abbildung 54: Einlagerungsversuche von G40 und G85 mit unterschiedlichen Dichtungskomponenten 77

Abbildung 55: Zunahme der Oktanzahl bei Erhöhung des MTBE-Anteils 78



Abbildung 56: Versuchsaggregat OM654 im Kälteprüfstand mit Abgasentnahmestellen vor Abgasnachbehandlung AGN (im Bild markiert)..... 79

Abbildung 57: Partikelanzahlemissionen bei einem Lastsprung von $p_{me}=2\text{bar}$ auf $p_{me}=14\text{bar}$ von fossilem Diesel zu HVO. 79

Abbildung 58: Differenzkennfelder der Stickoxidemissionen, Partikelanzahl und Partikelmasse. $\Delta= B7\text{-HVO}$. 80

Abbildung 59: Partikelgrößenverteilungen von B7 und HVO. Links: 2000 min-1/300 Nm, rechts: 3000 min-1/50 Nm. 80

Abbildung 60: Drehzahl/Drehmomentprofil der verwendeten Zyklen. Oben RDE, unten WLTP 81

Abbildung 61: WLTP-Zyklus mit einer Starttemperatur von -7°C 82

Abbildung 62: Schematisches Prüfstandschemata für die Kaltstartuntersuchungen mit Abgasentnahmesonden vor Abgasnachbehandlung. 82

Abbildung 63: PN-Emissionen von E5, G40 und G85(von links nach rechts) 83

Abbildung 64: Partikelgrößenverteilung bei 2000min-1/120Nm (links) und 4000min-1/70Nm (rechts)..... 83

Abbildung 65: Lastsprünge bei 2000 min-1 bei einer Starttemperatur von -10°C 83

Abbildung 66: Lastsprünge bei 2000 min-1 zwischen 50°C und 90°C 84

Abbildung 67: Ablauf der Ölverdünnungsuntersuchung: 3x 30 Minuten WLTP-Zyklen mit unterschiedlicher Starttemperatur..... 84

Abbildung 68: Leistungsprofile von RDE-Zyklus(oben) und WLTP-Zyklus(unten) 85

Abbildung 69: Spezifische WLTP-Emissionen von E5, G40 und G85 bei verschiedenen Starttemperaturen ... 85

Abbildung 70: Spezifische RDE-Emissionen von E5, G40 und G85 bei verschiedenen Starttemperaturen 86

Abbildung 71: PN-Emissionen von E5, G40 und G85 bei verschiedenen Starttemperaturen..... 86

Abbildung 72: PN-Verlauf bei -15°C RDE-Test 87

Abbildung 73: Entwickelte RDE-Route am IFKM 88

Abbildung 74: Motor- und Fahrzeuggeschwindigkeitsverläufe bei der RDE-Fahrt..... 88

Abbildung 75: Ergebnisse der RDE-Fahrten mit Audi Q3 für R33 und B7, Fahrmodus: Efficiency..... 90

Abbildung 76: Ergebnisse der RDE-Fahrten mit Audi Q3 für R33 und B7, Fahrmodus: Dynamic 91

Abbildung 77: Vergleich zwischen R33 und B7 in Bezug auf NOx-Emissionen und Partikelanzahl für Audi Q3 92

Abbildung 78: Vergleich zwischen G40 und E5 in Bezug auf NOx-Emissionen und Partikelanzahl für Skoda Fabia 93

Abbildung 79: Ergebnisse der RDE-Fahrten mit Ford Tourneo für G40 und E5, Startpunkt Motorkühlmitteltemperatur = -2°C 94

Abbildung 80: Ergebnisse der RDE-Fahrten mit Ford Tourneo für G40 und E5, Startpunkt Motorkühlmitteltemperatur = 19°C 94

Abbildung 81: Vergleich zwischen G40 und E5 für Ford Tourneo in Bezug auf NOx-Emissionen und Partikelanzahl 95

Abbildung 82: Häufigkeit der Nutzung des mit der Kompressionszündung verknüpften Magerbetriebes im Vergleich zwischen reFuels Blend G40 und Tankstellenkraftstoff E10 in einem Vergleichstest der Fa. Mahle mit einem Mazda 3 Skyactiv-X..... 96

Abbildung 83: Spitzendruck bei verschiedenen Betriebspunkten 97

Abbildung 84: Fließschema Bereitstellung von FT-Diesel - Synthese mit MVT Reaktoren 107

Abbildung 85: Fließschema der konventionellen Fischer-Tropsch-Synthese..... 107

Abbildung 86: Fließschema des bioliq[®]-Prozesses ohne Einspeisung von Wasserstoff, basierend auf Trippe_CTVL0015cba7ff2e0ea464fa91a21042068fd9c [63]..... 108

Abbildung 87: Global Warming Potential durch Kraftstoffproduktion und –bereitstellung - kg CO2 Äq / MJ Kraftstoff - Basisszenarien 111

Abbildung 88: Global Warming Potential durch Kraftstoffproduktion und –bereitstellung - kg CO2 Äq / MJ Kraftstoff - erweiterte Szenarien..... 112

Abbildung 89: Beispielhafte Darstellungen aus der Kommunikation des Projektes 120





Abbildung 90: Beispielhafte Kommunikationselemente in reFuels - Kraftstoffe neu denken..... 121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Effizienzkennwerte der ausgewählten Prozesspfade basierend auf dem unteren Heizwert (LHV), aus den im Projekt erarbeiteten Prozesssimulationsdaten..... 17

Tabelle 2: Ökonomische Randbedingungen..... 18

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Maßnahmen zur Integration der volatilen Stromerzeugung..... 24

Tabelle 4: Ausgewählte Standorte zur Berechnung der Wind- und Solarprofile, der Volllaststunden und der Stromgestehungskosten..... 26

Tabelle 5: Petrochemische Parameter des bioliq®-Rohbenzins im Vergleich zur DIN EN 228..... 37

Tabelle 6 Eigenschaften untersuchter Benzinkraftstoffe..... 55

Tabelle 7 Eigenschaften untersuchter Dieselmotorkraftstoffe..... 57

Tabelle 8 Prüfprogramm Komponentenuntersuchung CRI Hydraulikprüfbank..... 59

Tabelle 9 Weitere wichtige Eigenschaften der untersuchten Kraftstoffe..... 61

Tabelle 10 Bosch Kraftstoffbewertungsprogramm am Motoren- und Sprayprüfstand..... 65

Tabelle 11 Wichtige Eigenschaften der untersuchten Kraftstoffe..... 66

Tabelle 10. Verwendete Messtechnik..... 71

Tabelle 11 Ergebnisse Ölverdünnung. Δ = Ölprobe – Referenzölprobe..... 84

Tabelle 12: Zusammensetzung der modellierten Strommixe..... 105

Tabelle 13: Parameter und Technologien für die Importszenarien..... 106

Tabelle 14: Zusammenstellung der betrachteten Organisationen (eigene Darstellung)..... 113

Tabelle 15: Übersicht aller Stakeholder im Steckbrief Verbandsposition (eigene Darstellung)..... 114

Tabelle 16: Übersicht der im Workshop vertretenen Institutionen..... 117





Abkürzungsverzeichnis

B7	Diesekraftstoff mit 7 Vol.-% Biodiesel
BMEP	Break Mean Effective Pressure
BSFC	Break Specific Fuel Consumption
BtL	Biomass-to-Liquid
C9 / C9+	Aromatenanteil mit ohlenstoffkettenlänge > 9 Atome
CAPEX	Capital Expenses, Investitionsausgaben
CFPP	Cloud Filter Plugging Point
CI	Cetane Index (Cetahl-Zahl)
CO	Kohlenstoffmonoxidemissionen
COV	Coefficient of Variation (Druckschwankungen im Motorlauf)
CP	Cloud Point
DAC	Direct Air Capture
DME	Dimethylether
DtG	Dimethylether-to-Gasoline
DtO	Dimethylether-to-Olefins
E150	Verdampftes Kraftstoffvolumen bei 150°C
FBP	Finaler Siedepunkt
FT	Fischer-Tropsch
FTS	Fischer-Tropsch-Synthese
G40	Kraftstoffkandidat mit 40% erneuerbarem Anteil
G85	Kraftstoffkandidat mit 85% erneuerbarem Anteil
HDEV	Hochdruckeinspritzventil
HFRR	High Frequency Reciprocating Rig
HC	Unverbrannte Kohlenwasserstoffemissionen
HVO	Hydrogenated Vegetable Oil
ICEV-d	Fahrzeug mit Dieselmotor
ICEV-g	Fahrzeug mit Ottomotor
IFKM	Institut für Kolbenmaschinen
IKFT	Institut für Katalysatorforschung und -technologie
ITAS	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KNN	Künstliches Neuronales Netz
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LHV	Lower Heating Value, Unterer Heizwert
MFB50	50% Mass Fraction Burned = Verbrennungsschwerpunkt
MOZ	Motoroktanzahl
MtG	Methanol-to-Gasoline
MtO	Methanol-to-Olefins
NCC	Needle Closing Control
NOx	Sammelbegriff für Stickoxidemissionen
OPEX	Operational Expenses, Betriebskosten
OtJ	Olefin-to-Jet fuel
PbL	Power assisted Biomass-to-Liquids
PKW	Personenkraftwagen
POSYN	Porsche Synthetic Fuel = bei Porsche entwickelter Kraftstoffkandidat
PN	Partikelanzahl



PP	Prüfpunkt
PSI	Paul-Scherrer-Institut
PtL	Power-to-Liquid
R33®	Diesekraftstoff mit 33 Vol.-% erneuerbarem Anteil – seit Anfang 2023 als Blue Diesel bezeichnet
RME	Rapsmethylester
ROZ	Research Oktanzahl
RPM	Rounds Per Minute (Umdrehungen pro Minute)
SOI	Start of Injection (Einspritzzeitpunkt)
THG	Treibhausgas
WGS	Wassergas-Shift-Reaktion
WOT	Wide Open Throttle (geöffnete Drosselklappe)
VL	Volllast
YSI	Yield Sooting Index

1 Management Summary

Im vom Verkehrsministerium Baden-Württemberg im Rahmen des Strategiedialogs Automobilwirtschaft unterstützten Projekt „reFuels – Kraftstoffe neu denken“ wurde die Herstellung und der Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen ganzheitlich betrachtet. Das Konsortium des Projekts das auf eine 2017 begründete Technologiepartnerschaft zurückzuführen ist, besteht aus Industriepartnern der Bereiche Energieversorgung, Kraftstoffherzeugung, Motoren- und Fahrzeugherstellung, Zulieferindustrie und Systementwicklung im Bereich Mobilität sowie einem Cluster von unterstützenden Forschungsinstituten. Das Konsortium hat einen maßgeblichen Eigenanteil an den Projektkosten eingebracht.

Im Rahmen des Projekts wurden die Herstellung und der Einsatz in der bestehenden Fahrzeugflotte demonstriert, sowie die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit als auch gesellschaftliche Akzeptanz für diese Kraftstoffe analysiert und erprobt. Das Projekt wie auch das Konsortium umfassen die gesamte Wertschöpfungskette, vom Energieversorger, der Kraftstoffsynthese, über Lieferanten, Systementwickler bis hin zu Motoren- und Fahrzeugherstellern.

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- *reFuels Projekt (1/2019 – 12/2020)*
 - Bereitstellung und Validierung von *reFuels* Produktmustern (normgerechte Produktmuster Diesel und Benzin) im Tonnen-Maßstab
 - Erhöhung der Technologie-Reifegrade für Methanol und Fischer-Tropsch-basierte Verfahren
 - Erhöhung der Kohlenstoff- und Energieeffizienz durch effiziente Nutzung und Aufbereitung der Koppelprodukte und durch Nutzung der Energie- und Stoffströme gekoppelter Anlagen in der Integration der Prozesse
 - Ganzheitliche Bewertung – Herstellungsverfahren, Herstellkosten, Produkteigenschaften, Umwelteinflüsse (Lebenszyklusanalyse) und Anwendung im Bestand.
 - Stakeholder-Diskurs und Kommunikation der Ergebnisse in die Gesellschaft
 - Entwicklung des Konzeptes einer Raffinerie-integrierten Demonstrationsanlage inkl. Bewertung der Stoffströme und Kosten und Darstellung von Effizienzpotenzialen
- *reFuels-Projekt-Verlängerung und -Ergänzung (1/2021 – 6/2022)*



- Vorbereitung der Umsetzung und Integration in ein bestehendes Anlagenumfeld
- Erweiterung der bewerteten Technologieszenarien um Importszenarien für Zwischenprodukte wie Methanol und Erstellung eines weiteren Konzeptes für eine Raffinerie-integrierte Demoanlage auf dieser Basis
- Erhöhung der Beimischquoten bis zum „reFuels-Reinkraftstoff“
- Dauerlauf in Kooperation mit einer Spedition mit ca. 1 Mio. Kilometer





2 Problemstellung und Stand der Technik

Ziel des Projektes war es von Beginn an, die Inverkehrbringung der regenerativen Kraftstoffe zu fördern, die Effizienz der Syntheseschritte und ihren Technologiereifegrad zu steigern, die damit hergestellten Kraftstoffkomponenten mit existierenden Kraftstoffen innerhalb der bestehenden Kraftstoffnormen zu blenden, diese in einer großen Bandbreite an Versuchsträgern zu testen und hinsichtlich ökonomischer, ökologischer und auch sozialer Aspekte zu bewerten. Mit Blick auf die Umsetzung im industriellen Maßstab wurde auf Basis der Ergebnisse des Projektes eine Projektverlängerung und -ergänzung bewilligt.

Zu Beginn des Projektes waren bereits mehrere Technologiepfade bekannt, die in Pilotanlagen demonstriert hatten, dass auf diesem Wege synthetische Kraftstoffe aus regenerativen Quellen synthetisiert werden konnten. Gleichwohl waren die Hemmnisse einer großflächigen Einführung derselben vielschichtig:

- Unterschiedliche Kraftstoffsyntheseprozesse (Pyrolyse, Fischer-Tropsch, Methanisierung, etc.) und unterschiedliche Ausgangsstoffe (Feedstocks) werden mit unterschiedlichen Bezeichnungen (advanced Biofuels, e-Fuels, Reststoff-Kraftstoffe etc.) bezeichnet und meist alternativ diskutiert statt ergänzend.
- Der Technologiereifegrad einzelner Prozessschritte war gegeben, aber nicht für integrierte Anlagenkonzepte mit signifikanten Mengen demonstriert
- In der öffentlichen Diskussion wurden die einzelnen Technologiepfade als ausschließlich betrachtet statt als ergänzend
- In der Wissenschaft wurden viele unterschiedliche Ausprägungsformen und Kraftstoff-formulierungen diskutiert, was eine Fokussierung der Industrie sowohl auf der Synthese- als auch auf der Anwendungsseite erschwert
- Es gab keine neutrale gesamtheitliche Betrachtung zur Anwendung dieser Kraftstoffe, v.a. mit Blick auf die Bestandsflotte
- Es gab keine zusammenhängende Umweltbilanzierung, die vergleichbar die unterschiedlichen Technologiepfade und die komplette Prozesskette von der Energiewandlung, der Synthese, bis zur Nutzung abbildet
- Bisherige Systemanalysen haben nur einzelne Kraftstofftypen betrachtet, statt eines Gesamtkonzeptes
- Die o.g. Informationen mussten mit den betroffenen Stakeholdern diskutiert und der Öffentlichkeit kommuniziert werden.

Um die Additivität dieser Kraftstoffe begrifflich abzubilden, und auch die Randbedingung regenerativer Quellen (und damit Tauglichkeit für Kreisprozesse) wurde der Begriff reFuels definiert, der all die o.g. Kraftstofftypen zusammenfasst.

Mit Blick auf die Notwendigkeit rascher Ergebnisse einer signifikanten Treibhausgasreduktion wurde innerhalb des Steuerkreises und auch innerhalb des Konsortiums entschieden den Fokus auf eine maximale Treibhausgasreduktion mit synthetischen Kraftstoffen innerhalb der bestehenden Kraftstoffnormen EN228 (Ottokraftstoffe), EN590 (Dieselkraftstoffe) und EN 15940 (paraffinische Dieselkraftstoffe) zu legen. Damit sind Bestandsfahrzeuge der Bereiche Bahn, Schiff, Nutzfahrzeug und Pkw für alle in diesem Projekt betrachteten Kraftstoffe freigegeben und können sie nutzen. Es verbleibt nur, die Tauglichkeit aller Materialien für die





Verwendung dieser Kraftstoffe zu analysieren, um eine Alternative zu den fossilen Kraftstoffen bereitstellen zu können und somit die Mobilität zu defossilisieren.



Abbildung 1: Das Energy Lab 2.0 der Karlsruher Institut für Technologie KIT als Pilotanlage zur e-Fuel Synthese

3 Struktur des Projektes

So vielfältig die Facetten der Fragestellungen bei der Einführung und dem schnellen Hochlauf der reFuels sind, so dringend sind diese Fragestellungen, um mit Blick auf das verbleibenden Treibhausgas-Budget zu agieren. Nur die rasche Skalierung in Kombination mit dem Einsatz in der Bestandsflotte in Kombination mit Maßnahmen zur Verkehrswende ermöglicht es noch, die in Paris vertraglich zugesagten Treibhausgasreduktionen in dem Mobilitätssektor umzusetzen. Das Gesamtprojekt muss damit sowohl die Komplexität abbilden, als auch die Abhängigkeiten berücksichtigen, um die im Projekt erarbeiteten Teilergebnisse in den Folgearbeitspaketen nutzen zu können.

Zur Steuerung des Projektes sind mit einem Steuerkreis und einem Lenkungsreis zwei Instrumente eingesetzt worden. Der Steuerkreis dient hierbei der strategischen Steuerung des Projektes und ermöglicht Diskussion der Ergebnisse und weiteren Vorgehens mit ausgewählten Vertretern aus den Bereichen Landespolitik, Mineralölindustrie, Fahrzeugindustrie, Systemzulieferern und auch Verbänden aus Industrie und Landesorganisationen. Der strategisch ausgerichtete Steuerkreis wird durch einen operativ ausgerichteten Lenkungsreis ergänzt, in dem Vertreter aller Partner des Projektes die Ergebnisse mit Blick auf technische und systemische Zusammenhänge austauschen, diskutieren und Impulse für die weitere Vorgehensweise geben.

Die Einbindung aller Stakeholder entlang der gesamten Wertschöpfungskette und Stoffstromkette in das Projekt ist ein weiteres Merkmal, dass das Projekt reFuels – Kraftstoffe neu denken zu einem bundesweit einzigartigen Projekt gestaltet hat. Die Partner aus den o.g. Industrie-Segmenten sind im Projekt als Partner eingebunden und haben signifikante Beiträge zur Beantwortung der o.g. Fragestellungen geleistet. Die Industrie-Partner haben als Eigenleistung Materialien, Motoren und Fahrzeuge bereitgestellt, haben Tests an Motoren, Fahrzeugen und Materialien durchgeführt, haben Komponenten und Systeme analysiert und begutachtet und ihre Erfahrungen in das Projekt eingebracht.

Die Förderung des Projektes hat sich auf das KIT beschränkt, wo im Verbund von sechs Instituten die o.b. Fragestellungen bearbeitet wurden.

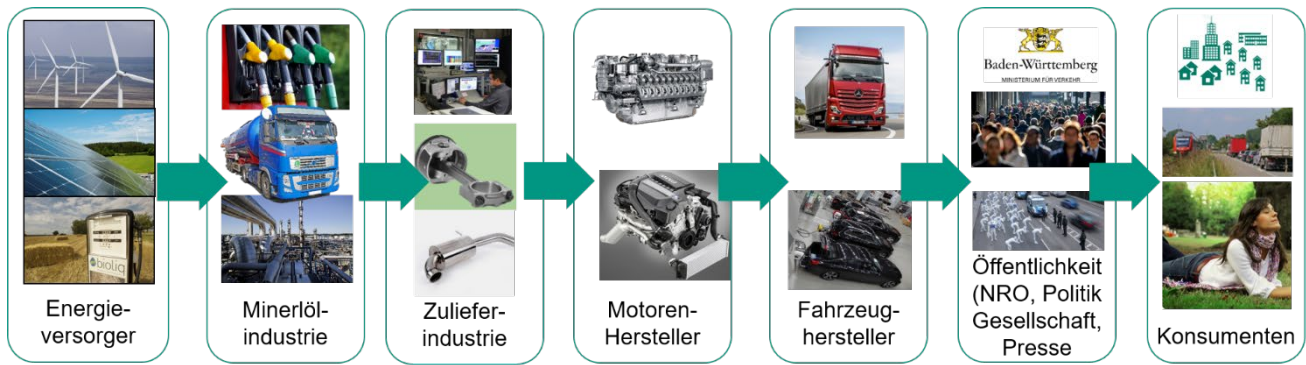


Abbildung 2: Gliederung der Stakeholder im Projekt reFuels - Kraftstoffe neu denken

Das Gesamtprojekt ist inhaltlich in drei Cluster gegliedert, die geeignet sind, die vielfältigen Arbeitspakete zu bündeln. Auf diesem Wege können drei Clusterleiter die jeweiligen Cluster koordinieren und die Kommunikation innerhalb dieser Cluster ermöglichen.

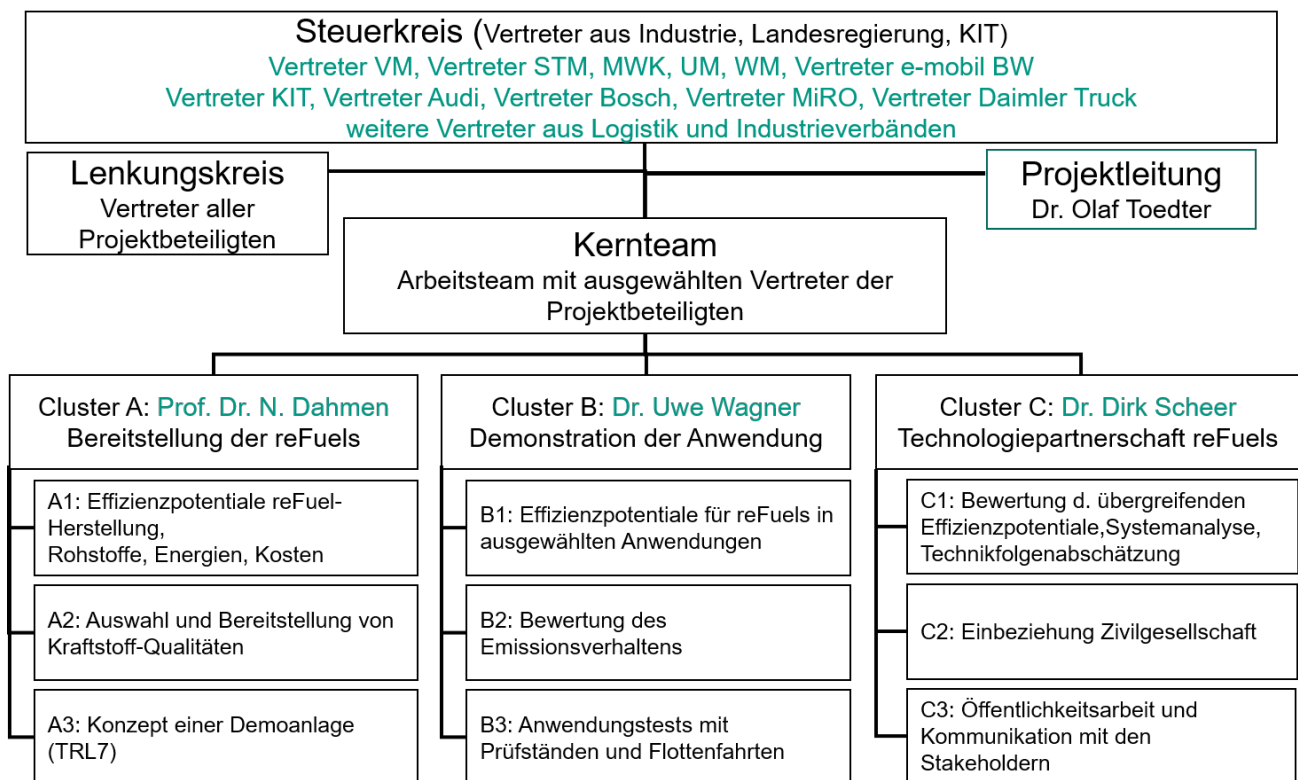


Abbildung 3: Organisations-Struktur des Projektes reFuels - Kraftstoffe neu denken

Pro Cluster gibt es jeweils drei Arbeitspakete, in denen wiederum bis zu drei Institute zusammengearbeitet haben. Die in den jeweiligen Arbeitspaketen mitwirkenden Institute bzw. KIT Dienstleistungseinheiten sind:

A Bereitstellung der reFuels

A1 Effizienzpotentiale reFuels-Herstellung:

[Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion \(IIP\)](#)

A2 Auswahl und Bereitstellung von Kraftstoffen

[Institut für Katalysatorforschung und -technologie \(IKFT\)](#)

[Engler-Bunte Institut – Chemische Energieträger -Brennstofftechnologie](#)

[Institut für Mikroverfahrenstechnik \(IMVT\)](#)

B Demonstration der Anwendung

[Institut für Kolbenmaschinen \(IFKM\)](#)

C Technologiepartnerschaft reFuels

[Institut für Technikfolgen-abschätzung und System-analyse \(ITAS\) - „Soziotechnische Energiezukünfte“](#)

[Institut für Technikfolgen-abschätzung und System-analyse \(ITAS\) - „Forschung für nachhaltige Energietechnologien“](#)

[Strategische Entwicklung und Kommunikation \(SEK\)](#)

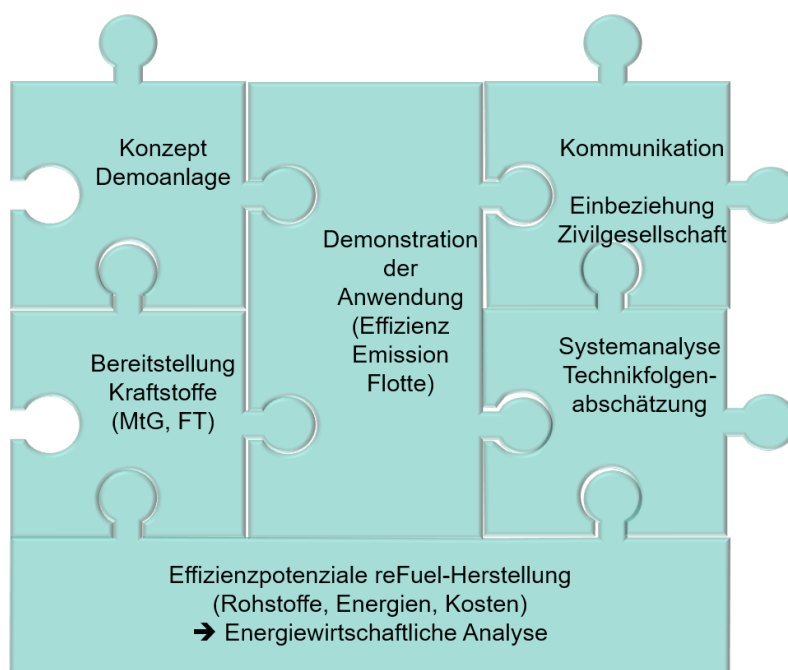


Abbildung 4: Systematische Darstellung der Struktur und Zusammenhänge des Projektes reFuels - Kraftstoffe neu denken

Die Bearbeitung der Fragestellungen erfolgte über die hier vorgestellte Projektstruktur wurde aber nicht in abgeschlossenen fachlichen Gruppierungen, sondern zeichnet sich durch interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen allen o.g. Instituten aus (s.a. Abbildung 3). Diese Zusammenarbeit ist notwendig, die ebenso interdisziplinären Zusammenhänge abbilden zu können. Zu diesem Zweck werden auch Mitarbeiter in Bereichen eingesetzt die in denen ihre speziellen fachlichen Kenntnisse die notwendigen Inhalte bereitstellen.

Da die Arbeitspakete sich auch inhaltlich einander beeinflussen, ist es wesentlich, neben der organisatorischen Struktur auch eine Informationsstruktur zu installieren, entlang dieser in gemeinsamen Abstimmungen die entsprechenden Einflüsse berücksichtigt werden (s.a. Abbildung 5)

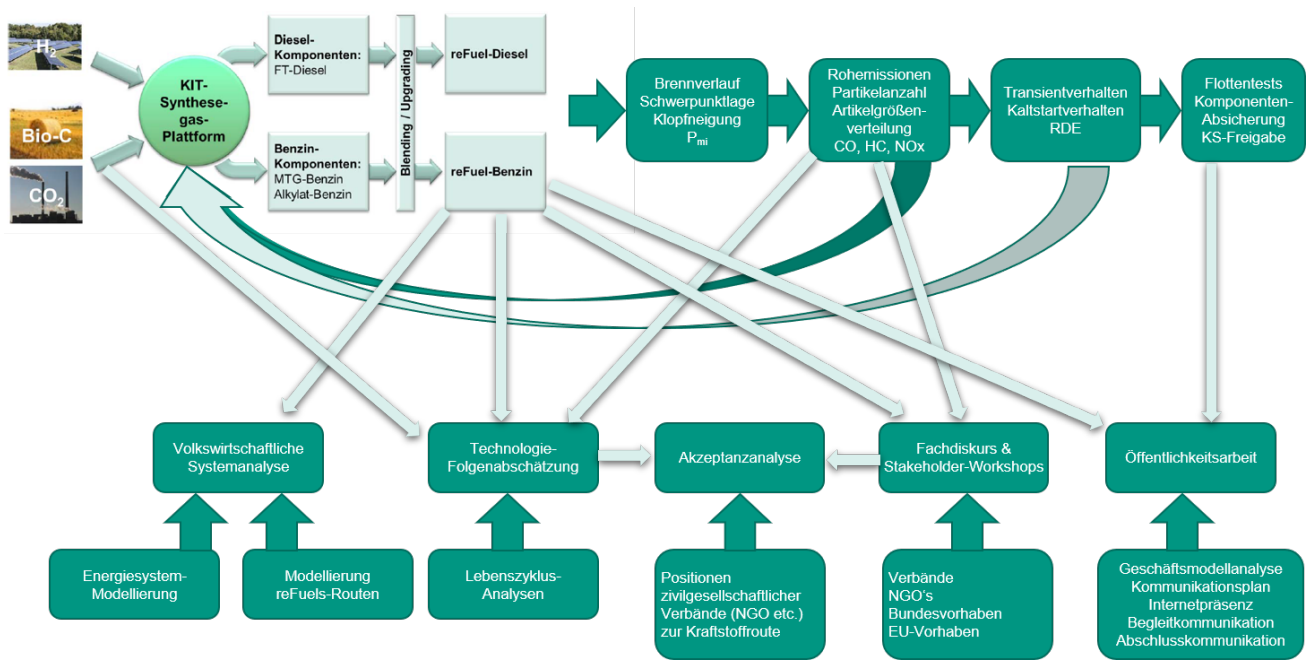


Abbildung 5: Informations- Stoff- und Datenströme im Projekt reFuels - Kraftstoffe neu denken

Die hier beschriebene Projekt- und Organisationsstruktur hat die zahlreichen Ergebnisse ermöglicht, von denen im Folgenden eine Auswahl dargestellt wird.

Detailliertere Informationen können der Webseite www.reFuels.de oder den publizierten Fachartikeln entnommen werden und gerne auch auf Anfrage bereitgestellt werden.

4 Cluster A: Kraftstoffbereitstellung

Im Projekt reFuels wurde die Herstellung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen und Energie technisch in relevanten Mengen demonstriert sowie entlang der gesamten Wertschöpfungskette im Hinblick auf betriebs- und volkswirtschaftliche sowie umweltbezogenen Kennzahlen betrachtet und untersucht. Für die Implementierung solcher Technologien wurde beispielhaft das Konzept für eine Raffinerie-integrierte Demonstrationsanlage entwickelt.

Auf Grundlage der absehbar zu erzeugenden reFuels-Mengen sowie auf der Grundlage der Rohstoff- und Energieverfügbarkeit wurden unterschiedliche Prozesse zur Bereitstellung der reFuels (inklusive möglicher zeitlicher Flexibilisierung der Prozesse) in ein Energiesystemmodell integriert (Arbeitspaket A1 „Technoökonomische Analyse und Energiewirtschaftliche Betrachtung“). Aus den anschließenden Berechnungen ergeben sich Technologie- und Szenarien-abhängige Potenziale hinsichtlich Klimagas- und Kostenreduktion bei der Strombereitstellung über einen längeren Zeithorizont. Die Betrachtung der einzelnen Prozessketten und der (indirekten) Einflüsse auf das Energiesystem erfolgt dabei in enger Zusammenarbeit mit der Lebenszyklusanalyse (LCA) in Arbeitspaket C1.

Zur Beurteilung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials neuer Verfahren zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe müssen Betriebsergebnisse aus einem relevanten Anlagenmaßstab sowie Kraftstoffmuster in ausreichender Menge für die Arbeiten in Cluster B bereitgestellt werden. Aus dem Betrieb der am KIT existierenden Pilotanlagen bioliq® und Energy Lab 2.0 wurden wenige Tonnen Kraftstoffkomponenten auf regenerativer Basis hergestellt und für den Einsatz in Otto- und Dieselmotoren zur Verfügung gestellt



(Arbeitspaket A2 „Herstellung Methanol-basierter Otto- und Dieselmotorkraftstoffe). Blends von 10 bis über 85% erneuerbarem Anteil wurde auf diese Weise hergestellt und erfolgreich getestet.

Die Ergebnisse der Analysen zur Energie- und Rohstoffbereitstellung und zur Optimierung der Prozessketten mündeten in einem technischen Konzept für eine Raffinerie-integrierte Demonstrationsanlage (Arbeitspaket A3, „Conceptual Design Demo-Plant“) ein, mit der ein Technology Readiness Level (TRL) von ≥ 7 erreicht werden soll. Die für das Verfahrenskonzept erstellten Massen- und Energiebilanzen und das zugehörige Anlagenkonzept ermöglichten eine Schätzung der spezifischen Herstellungskosten für die reFuels.

4.1 Cluster A1: Techno-ökonomische Analyse und energiewirtschaftliche Betrachtung

4.1.1 Prozesssimulation und techno-ökonomische Analyse

Heinzmann, Paul; Glöser-Chahoud, Simon; Schultmann, Frank (IIP)

Zur Herstellung von erneuerbaren fortschrittlichen Kraftstoffen kommen verschiedene verfahrenstechnische Technologien in Frage, sowie darauf basierende Prozesspfade. Je nach Prozesspfad ergeben sich unterschiedliche technische, ökonomische und operative Aspekte.

Um diese genauer zu analysieren und eine Datengrundlage für deren Integration in Energiesystemmodelle zu generieren, wurden im reFuels-Projekt mehrere Prozesssimulationen unter Nutzung von Aspen Plus® erarbeitet. Diese basieren auf Rechercheergebnisse aus aktuellen Veröffentlichungen, teils aus dem Abgleich mit realen Anlagenbetriebsdaten, und dem Wissenstransfer zwischen den Projektpartnern. Die technischen Analysen wurden durch eine anschließende ökonomische Analyse erweitert, um potenzielle Kostenstrukturen und Einflussgrößen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von erneuerbaren Kraftstoffen zu untersuchen. In projektinternen Besprechungen und Absprachen, sowie einem dezidierten Technologie-Workshop am KIT wurden folgende Herstellungsszenarien als relevant identifiziert:

- Zentrale Power-to-Liquid (PtL) Anlagen mit CO₂ aus Punktquellen (bspw. Zementwerken) über:
 - Fischer-Tropsch-Synthese (FTS), PtL-FTS-zentral
 - Methanol-to-Gasoline-Prozess (MtG), PtL-MtG-zentral
- Power-to-Liquid (PtL) Verfahren in internationalen Großanlagen mit CO₂-Luftabscheidung (DAC) über:
 - Fischer-Tropsch-Synthese, PtL-FTS-DAC
 - Methanol-to-Gasoline-Prozess, PtL-MtG-DAC
- Hybrides Verfahren durch Erweiterung von Biomassenutzung (BtL) durch erneuerbaren Wasserstoff in MtG-Prozessen (Power-and-Biomass-to-Liquid, PBtL), PBtL-MtG
- Dezentrale PtL Verfahren auf Basis von FTS in Mikrostrukturierten Reaktorkonzepten, PtL-mikroFTS

Ziel der technisch-ökonomischen Analysen der verschiedenen Prozesskonzepte ist vor allem die Analyse der Kostenstrukturen und des Einflusses der gewählten Parameter bzw. Randbedingungen.

Neben einer Vielzahl von grundlegenden technischen Aspekten und Parametern, die für die Erstellung einer ökonomischen Analyse auf Basis der Prozesssimulationen nötig sind, ist es allen voran die Energieeffizienz der untersuchten Prozesse, die als Ergebnis der Simulationen von Interesse ist. Je nach den zu Grunde liegenden Systemgrenzen, kann unterschieden werden zwischen der Gesamtenergieeffizienz η_{en} , sowie der Wasserstoffeffizienz η_{H_2} . Ebenfalls relevant ist die Kohlenstoffeffizienz η_C .

$$\eta_{H_2} = \frac{\dot{m}_{Produkt} \cdot LHV_{Produkt}}{\dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2} + \dot{m}_{Biomasse} \cdot LHV_{Biomasse} + P_{EL,BOP}} \quad \eta_{En} = \frac{\dot{m}_{Produkt} \cdot LHV_{Produkt}}{P_{EL,ges}} \quad \eta_C = \frac{\dot{n}_{C,Produkt}}{\dot{n}_{C,CO_2} + \dot{n}_{C,Biomasse}}$$

Bei der Wasserstoffeffizienz wird der Prozess der Wasserelektrolyse, bzw. deren Strombedarf, nicht berücksichtigt. In der Gesamtenergieeffizienz werden die Systemgrenzen erweitert. Der Vergleich dieser beiden Kenngrößen ermöglicht allen voran den Einfluss der Elektrolyseeffizienz auf die Gesamtenergieeffizienz





abzubilden. Die Kohlenstoffeffizienz spielt insbesondere bei einer limitierten oder kostenintensiven Verfügbarkeit von Kohlenstoff in Form von Biomasse oder CO₂ eine relevante Rolle.

Tabelle 1: Effizienzkennwerte der ausgewählten Prozesspfade basierend auf dem unteren Heizwert (LHV), aus den im Projekt erarbeiteten Prozesssimulationsdaten.

Prozesspfad		PtL-FTS-Zentral	PtL-FTS-DAC	PtL-MtG-Zentral	PtL-MtG-DAC	BtL-MtG	PBtL-MtG
Wasserstoffeffizienz η_{H_2}		62,5%	56,8%	64,9%	59,0%	46,1%	57,2%
Annahme Elektrolyse-effizienz	2022	61,1%					
	2030	62,1%					
	2050	68,2%					
Gesamtenergieeffizienz η_{en}	2022	38,6%	34,5%	40,7%	36,1%	43,0%	43,5%
	2030	39,2%	35,4%	42,9%	37,7%	43,0%	43,8%
	2050	42,9%	40,5%	47,1%	43,2%	43,0%	45,7%
Kohlenstoffeffizienz η_c		91,9%	91,9%	85,5%	85,5%	32,7%	66,7%

Prinzipiell ist aus dem Vergleich der simulierten Prozesse hinsichtlich der Energie- und Stoffeffizienzwerten allen voran ersichtlich, dass in rein strombasierten Verfahren keine relevanten Effizienzunterschiede zwischen MtG- und FTS-basierten Prozessrouten zu erwarten ist (siehe Tabelle 1). Das maßgebliche Unterscheidungsmerkmal dieser beiden Prozessrouten ist allerdings die Produktselektivität. So kann über die Fischer-Tropsch-Synthese in den erarbeiteten Prozesssimulationen Diesel (59%) und (Roh-)Benzin (41%) gewonnen werden, während es in MtG-basierten Verfahren Benzin (83%) und LPG (17%) sind. Bemerkenswert ist die potenzielle Steigerung der Kohlenstoffeffizienz bei der Erweiterung von reinen BtL-Verfahren um Wasserstoffzufuhr (PBtL). Hinsichtlich der angenommenen Effizienzwerte der Elektrolyse wurde Bezug genommen auf voraussichtlich industriell verfügbare und skalierbare Niedertemperaturtechnologien, maßgeblich PEM- und Alkalische Elektrolyse. Potenzielle Weiterentwicklungen dieser Technologien, die über die hier angenommene Effizienzsteigerung hinausgehen, sind prinzipiell jedoch noch möglich. Ebenso könnte die Anwendung von Hoch-Temperatur-Elektrolysetechnologien eine erhebliche Steigerung der Energieeffizienz bewirken, vorausgesetzt, dass eine wirtschaftliche und industrielle Hochskalierung erfolgt.

Entscheidend für die Fixkosten der Herstellung von erneuerbaren Kraftstoffen sind die Investitionsausgaben (CAPEX). Die Schätzung des Investitionsbedarfs für einzelne verfahrenstechnische Apparate erfolgte über Datenbanken in Prozesssimulationssoftware und Literaturkorrelationen. Neben der grundsätzlichen Schätzungsunsicherheit dieser Daten, weisen allen voran die Prozessschritte, die nicht Teil der detaillierteren Simulation sind (Elektrolyse und DAC), eine hohe Schwankungsbreite an publizierten Kostendaten und -prognosen auf. Um den Einfluss dieser Unsicherheiten abzubilden, wurden daher für jedes Verfahrenskonzept drei Szenarien (optimistisch, Basis, konservativ) angenommen, sowie für die Inbetriebnahme der Anlage (2022, 2030, 2050). Die Unterschiede hinsichtlich der Investitionsausgaben je nach Szenario sind deutlich sichtbar. In Abbildung 6 ist die Zusammensetzungen des CAPEX je nach Szenario und Jahr exemplarisch für die Prozesspfade PtL-FTS-Zentral und PtL-MtG-Zentral gegenübergestellt. Angenommen wurde eine Produktionskapazität von 100.000 Tonnen Kraftstoff pro Jahr (bei einer Auslastung von 91%). Dies entspricht der Nutzung des CO₂-Ausstoßes eines durchschnittlichen deutschen Zementwerks.

Eindeutig wird hierbei der hohe Anteil der Elektrolyse am gesamten Investitionsbedarf, der für den Bau einer PtL-Anlage benötigt wird. Ebenfalls gut zu sehen ist die hohe Abhängigkeit des Investitionsaufwands von den szenario- und zeitbedingten Annahmen bezüglich der Elektrolyseinvestition. Technologieübergreifend kann jedoch über die kommenden Dekaden eine signifikante Kostensenkung erwartet werden.



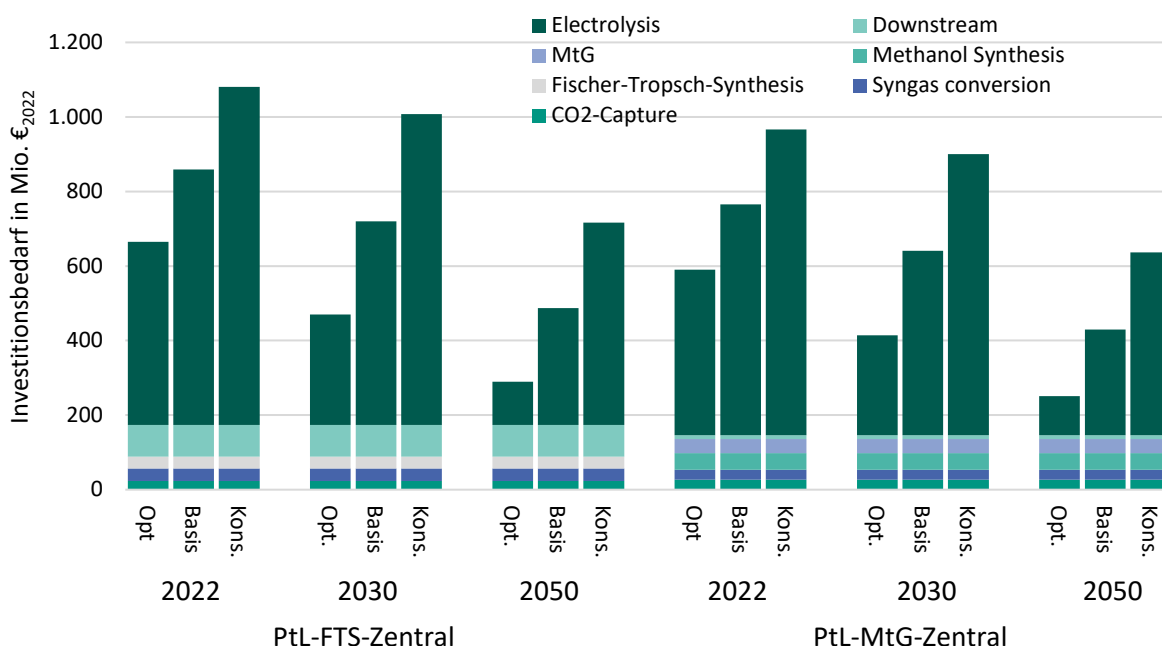


Abbildung 6: Vergleich Investitionsbedarfszusammensetzung von PtL-Anlagen mit 100.000 t/a Produktionskapazität, basierend auf FTS und MtG, je nach Szenario und Bezugszeitpunkt in Mio. €₂₀₂₂.

Ausgehend von den CAPEX-Werten der untersuchten Prozesspfade und Szenarien bestimmen die Betriebskosten (OPEX), welche auch die Umlage des Investitionsbedarfs in jährliche Zahlungen (Annuität) beinhalten, maßgeblich die spezifischen Gestehungskosten der Kraftstoffe. Wie bereits in der vorangegangenen Abbildung werden in Abbildung 7 die OPEX-Daten exemplarisch für die beiden Prozesse PtL-FTS-Zentral und PtL-MtG-Zentral dargestellt, unterschieden nach Szenario und Bezugszeitpunkt. Zur Berechnung dieser Daten wurden folgende Annahmen zu den Szenarien getroffen:

Tabelle 2: Ökonomische Randbedingungen.

Parameter		Szenario		
		Konservativ	Basis	Optimistisch
Lebensdauer Anlage		20 Jahre		
Gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten (WACC)		10%	7%	5%
Instandhaltungskosten Syntheseanlagen		8%	6%	4%
Instandhaltungskosten Elektrolyse	2022	3,5%		
	2030	3,3%		
	2050	3,9%		
Steuern und Versicherungen		2%	1,5%	1%
Werksgemeinkosten		2%	1,5%	1%
Strombezugskosten		51 €/MWh		
Jahresvolllaststunden		8000 h/a		

Aus den bestimmten Kostenstrukturen der reFuels-Produktion geht allem voran hervor, dass die Strombezugskosten (dunkelblau) eine herausragende Rolle spielen. Angesichts des hohen energetischen

Aufwands, der insbesondere für die Bereitstellung von Wasserstoff per Elektrolyse zu Stande kommt, und den damit verbundenen Kosten wird die Bedeutung der Energiebereitstellung und Energieeffizienz hervorgehoben.

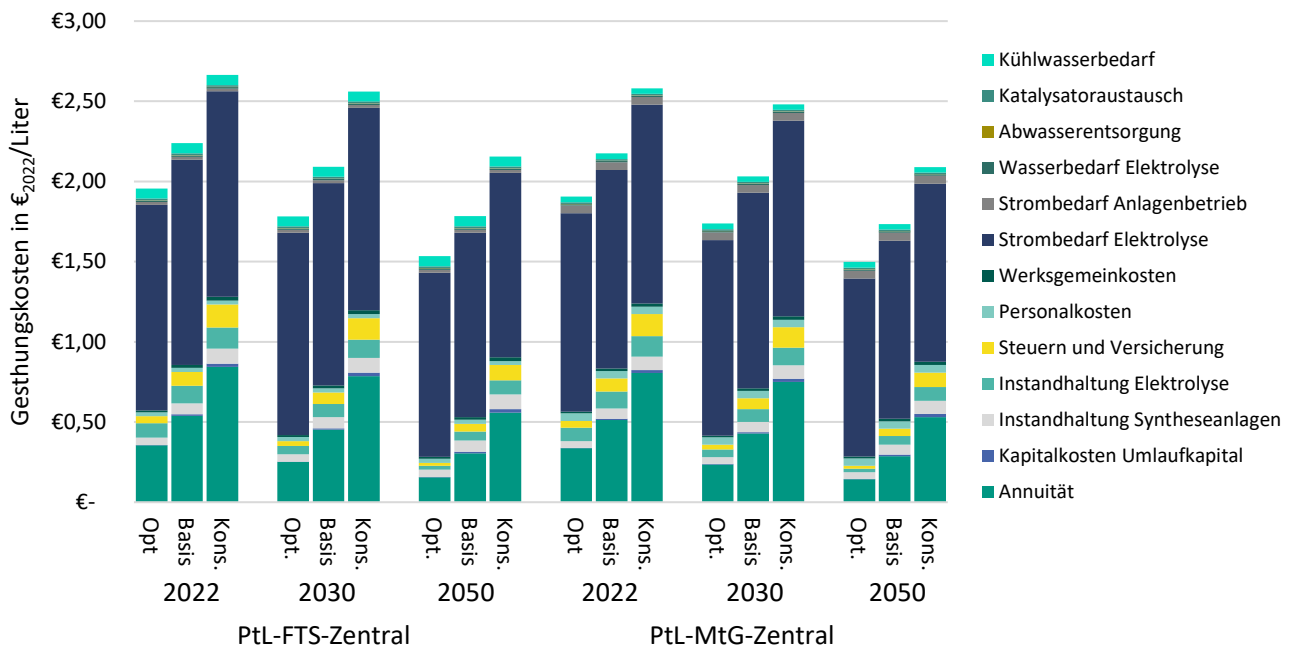


Abbildung 7: Vergleich Zusammensetzung Gesteuerungskosten PtL-Kraftstoffen, basierend auf FTS und MtG, je nach Szenario und Bezugszeitpunkt in €₂₀₂₂/Liter.

Insbesondere in den optimistischen Szenarien und mit fortschreitendem Bezugszeitpunkt, nimmt der relative Anteil der Strombezugskosten an den Herstellungskosten zu, während die absoluten Kosten abnehmen. Die Strombezugskosten bzw. der Strombezugspreis kann je nach (internationalem) Standort und regulatorischen Randbedingungen stark variieren. So könnten in begünstigten Regionen weltweit mit hohen Potenzialen zur erneuerbaren Energiegewinnung deutlich niedrigere Strombezugskosten als die hier angenommenen 51 €₂₀₂₂/MWh realisiert werden, was zu signifikant niedrigeren Kraftstoffgestehungskosten führen könnte. In den hier vorgenommenen Berechnungen wird jedoch von einer hohen Auslastung von 8000 Jahresvolllaststunden ausgegangen. Kann diese Auslastung der Nominalkapazität nicht erreicht werden, steigen die relativen kapitalabhängigen Fixkosten (Annuität, Instandhaltung etc.). Der ökonomische Zusammenhang von Strombezugskosten und Anlagenauslastung ist in *Abbildung 8* exemplarisch für die Prozesspfade Prozesse PtL-FTS-Zentral und PtL-MtG-Zentral je nach Szenario für den Bezugszeitpunkt 2030 verdeutlicht.

Um an einem energiebegünstigten Standort eine hohe Auslastung der Syntheseanlagen zu erreichen, kann zu einem gewissen Grad eine optimale Kombination von verschiedenen Technologien zur erneuerbare Energiegewinnung genutzt werden. Darüber hinaus müssen Speichermodule installiert und betrieben werden, um den Betrieb der Anlage zu gewährleisten und die Volatilität der erneuerbaren Stromerzeugung auszugleichen. Auch bei Anlagen, deren Strombezug aus einem Stromnetz eines Landes oder einer Region sichergestellt wird, muss die Interaktion der Anlagen mit eben diesem Netz berücksichtigt werden, sowohl aus ökonomischer Sicht des Anlagenbetreibers als auch hinsichtlich eines möglichst netzdienlichen Betriebs.

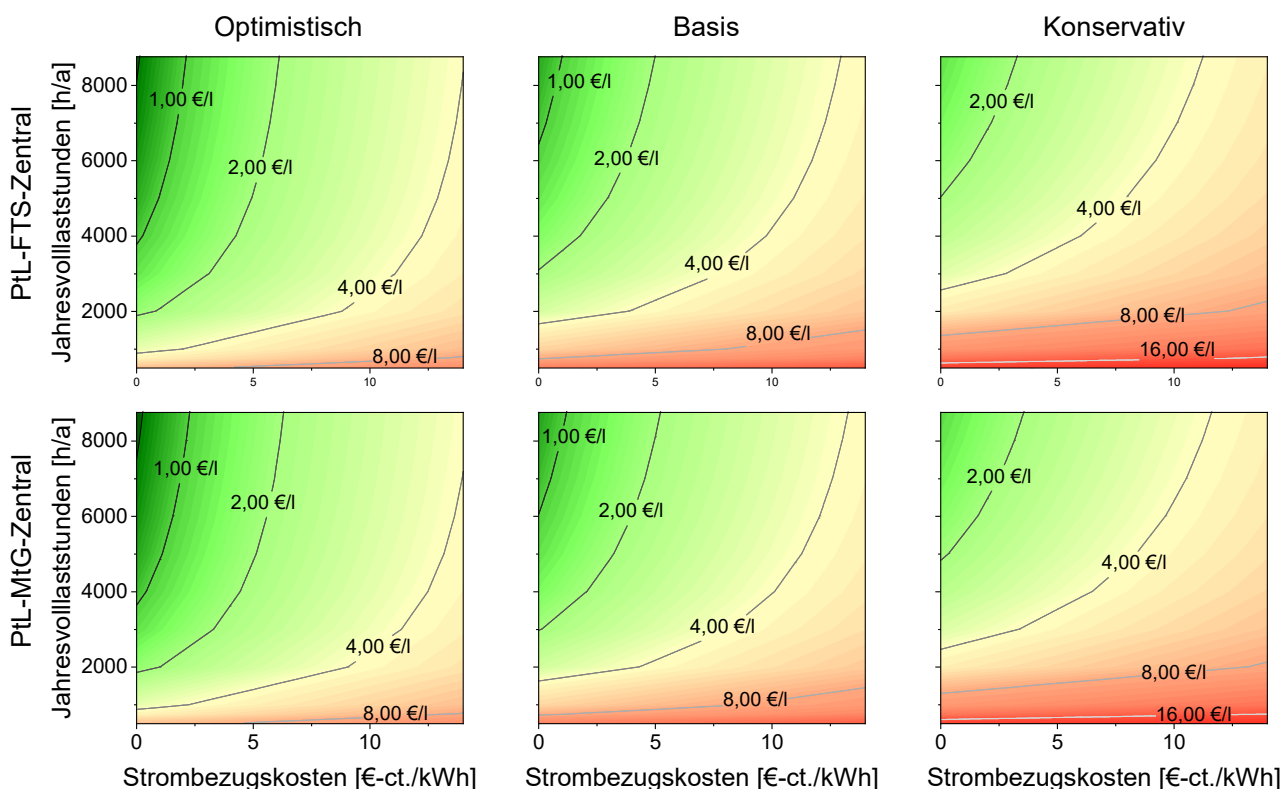


Abbildung 8: Abhängigkeit der Kraftstoffgestehungskosten in €_{2022} von Jahresvolllaststunden und Strombezugskosten für den Bezugszeitpunkt 2030 je nach angenommenem Szenario.

4.1.2 Innerdeutsche reFuels-Produktion

U. Langenmayr, M. Ruppert, W. Fichtner (IIP)

Im reFuels-Projekt wurde neben der techno-ökonomischen Analyse der reFuels-Produktion mit CO₂ aus einem Zementwerk aus dem Vorgängerkapitel eine Energiesystemanalyse des deutschen Stromsektors durchgeführt um die Gesamtproduktion in Deutschland zu analysieren. Das Ziel dieser Analyse war es, eine optimale Allokation der reFuels-Produktion zu berechnen und die Produktionsbedingungen zu ermitteln. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Energiesystemanalyse darauf ausgelegt ist, die Kosten des Gesamtsystems zu minimieren und nicht die Produktionskosten der reFuels-Produktion allein. Dadurch werden Verwerfungen im Energiesystem verhindert, welche entstehen würden, wenn das Ziel der Optimierung ausschließlich die reFuels-Produktion einbezieht, dabei aber trotzdem das ganze Energiesystem modelliert wird. Die Zielmenge an reFuels wurde auf 2% des Flugkerosinbedarfs in 2020 gesetzt und orientiert sich dabei an der vorgegebenen Quote der Europäischen Union für das Jahr 2030. Wie viel reFuels in Deutschland selbst tatsächlich produziert bzw. welche Teile der Wertschöpfungskette in Deutschland umgesetzt werden, kann nicht vollständig beantwortet werden. Selbst die oben genannte Quote zielt nicht auf eine vollständige innerdeutsche Produktion ab, sondern setzt die Quote, welche die Inverkehrbringer der synthetischen Kraftstoffe erfüllen müssen. Diese können dabei auch auf Importe der Fertigprodukte oder von Ausgangsprodukten bzw. Zwischenprodukten wie Wasserstoff, Fischer-Tropsch Crude oder Methanol zurückgreifen. Durch die Verlagerung der gesamten bzw. Teile der Produktion an andere Standorte kann gerade die energieintensive Produktion des Wasserstoffs an Standorten umgesetzt werden, welche bei der Strombereitstellung vorteilhaft sind. Die reine Synthese von Wasserstoff oder anderen Zwischenprodukten zum finalen Produkt wird in diesem Falle nicht in der oben beschriebenen Energiesystemanalyse abgebildet, da keine Kopplung zum Stromsektor notwendig ist.



Als Grundlage für die Energiesystemanalyse wurde das Open Source Energiesystemmodell PyPSA [1] und die Ansätze und Daten von PyPSA-EUR angewendet [2]. Hierdurch entsteht das Grundgerüst des Energiesystems, welches bereits sämtliche Stromleitungen des Übertragungsnetzes, die konventionellen Stromerzeugungsanlagen, Pumpspeicherkraftwerke und die erneuerbaren Energiepotentiale sowie Kapazitätsfaktoren der erneuerbaren Energie beinhaltet. Ergänzt wurde das System um die Kapazitäten der erneuerbaren Energien aus dem Marktstammdatenregister [3] und den CO₂-Punktquellen, sowie die Optionen zur Installation von reFuels-Anlagen. Wie oben beschrieben wurde hier sowohl die Kapazitäts- als auch die Betriebsplanung aller Anlagen gemeinsam optimiert um eine kostenminimale Lösung für das gesamte System zu erhalten.

Im ersten Schritt wurden die reFuels-Anlagen ohne betriebliche Einschränkungen, wie sie z.B. in RED II diskutiert werden, implementiert. Die Ergebnisse zeigen eine klare Konzentration der reFuels-Produktion in Nord- und Ostdeutschland. Abbildung 9 zeigt die installierten Elektrolysekapazitäten innerhalb Deutschlands. Zu sehen ist die Konzentration der Elektrolyse in Schleswig-Holstein, an der Ostseeküste, an der polnischen Grenze und in Sachsen-Anhalt. Die Konzentration dort kann vor allem mit der Verfügbarkeit der erneuerbaren Energien, insbesondere Windkraftherzeugung, begründet werden. Diese führen zu niedrigen Stromgestehungskosten und dadurch geeignete Standorte für die Wasserstoffproduktion dar. Darüber hinaus spielt auch die CO₂-Verfügbarkeit eine Rolle. Gerade die Elektrolyse an der polnischen Grenze und in Sachsen-Anhalt werden deshalb gewählt, da hier durch Bioethanol-Anlagen reines CO₂ bereitgestellt werden kann und keine weitere CO₂-Abscheidung notwendig ist. DAC spielt in dieser Betrachtung keine Rolle, da die CO₂-Bereitstellung aus Punktquellen ausreichend ist. **Sichtbar ist, dass in Süddeutschland keine Anlagen zur Produktion von reFuels stehen. Dies liegt vor allem an den geringeren Potentialen für erneuerbare Energien und der hohen Stromnachfrage durch die starke Industrialisierung.**



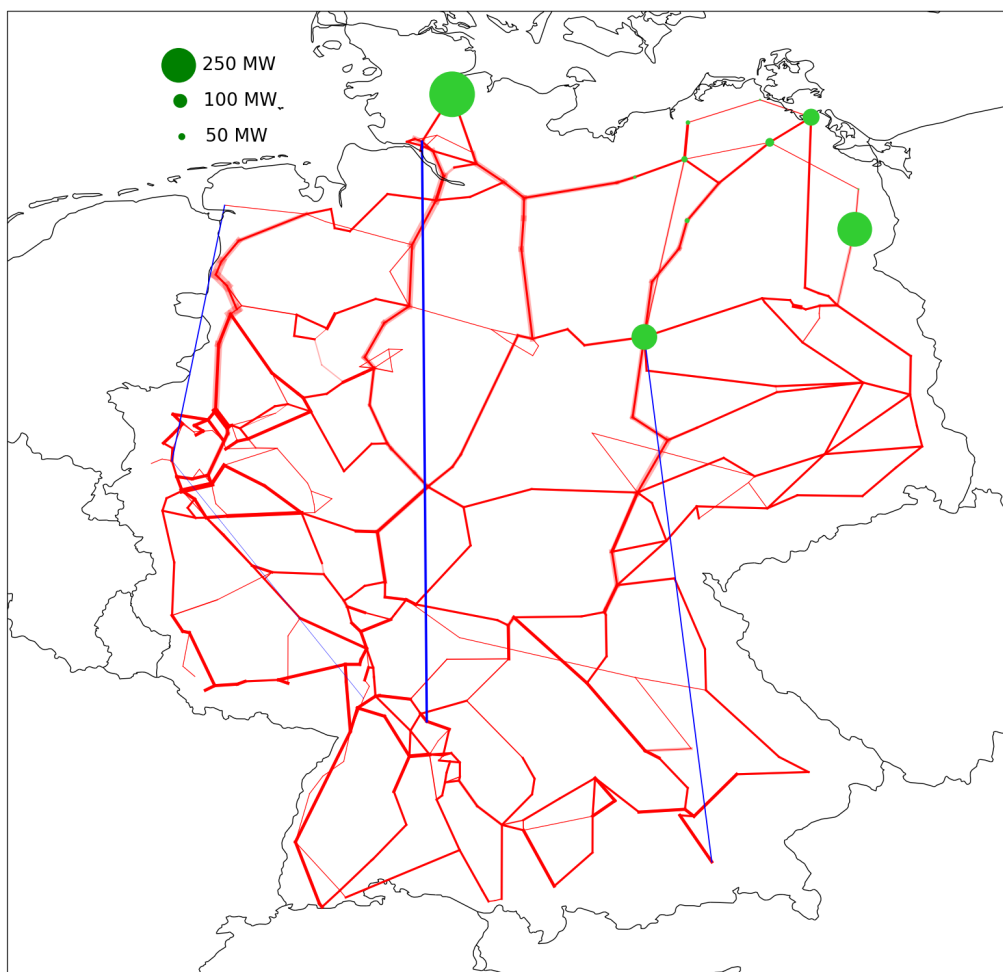


Abbildung 9: Optimale Allokation und Kapazitäten der Elektrolyse innerhalb des deutschen Energiesystems ohne Beschränkung des Strombezugs in 2030. (rot: Übertragungsnetzleitungen, blau: HGÜ-Verbindungen, grün: Elektrolyseure)

Die Elektrolyse-Anlagen erreichen im Durchschnitt eine Auslastung von 67% (5875 Stunden/Jahr) und eine Kapazität von 1,1 GW in 2030. Gerade bei der Auslastung muss angemerkt werden, dass die Elektrolyseanlagen stark auf die Stromgestehungskosten reagieren. Durch die Volatilität der erneuerbaren Energien und die sich verändernde Nachfrage sind die Stromgestehungskosten einer gewissen Schwankung ausgesetzt. Die Elektrolyseanlagen reagieren auf hohe Stromgestehungskosten mit der Drosselung der Wasserstoffproduktion. Durch dieses Verhalten sind Wasserstoffspeicher eine kosteneffiziente Lösung, um die Volatilität auszugleichen und eine konstantere Wasserstoffbereitstellung für die darauffolgende Synthese sicherzustellen. Es wird ersichtlich, dass das optimale System einen Kompromiss zwischen Kapazitäten von Elektrolyseanlagen und Wasserstoffspeichern auf der einen Seite, sowie flexiblem Elektrolysebetrieb als Reaktion auf Preissignale auf der anderen Seite darstellt. Die Produktion von reFuels im Energiesystem führen zu CO₂-Vermeidungskosten von 429,05 €/tCO₂.

Betrachtet man den eingeschränkten Strombezug durch RED II verschiebt sich die Elektrolyse verstärkt an die Nord- und Ostseeküste (siehe Abbildung 10). Das liegt vor allem daran, dass durch die Kombination des Gleichzeitigkeitskriteriums und der geografischen Korrelation die Relevanz der erneuerbaren Energien zunimmt und dadurch eine Verschiebung zu den Standorten mit dem höchsten Windpotential stattfindet. Die Auslastung der Elektrolyseure sinkt um 11,4% auf 5203 Stunden im Jahr (59%) und die Elektrolyseure erreichen eine Kapazität von 1,3 GW. Der Betrieb der Elektrolyseure wird an die erneuerbaren Energien gebunden, wodurch die Auslastung weiter sinkt. Trotzdem wird weiterhin eine hohe Auslastung erreicht, welche die

Volllaststunden der erneuerbaren Energien deutlich übersteigt. Dies liegt daran, dass die Elektrolysekapazität im Vergleich zu den Windturbinenkapazitäten deutlich geringer ist und deshalb bereits bei schwachem Wind eine hohe Auslastung erreicht. Dieses Verhalten könnte bei der Stromversorgung der Elektrolyseure eine wichtige Rolle spielen. Wird der Strom über Power Purchase Agreements bezogen, könnte der Elektrolyseur die Grundlast der Stromerzeugungsanlage abfahren und Residualmengen an Strom könnten im Anschluss am Strommarkt verkauft werden. Hierdurch werden trotz niedriger Auslastung der erneuerbaren Energien hohe Auslastung der Elektrolyseure erreicht. Darüber hinaus werden verstärkt Photovoltaikanlagen auch in Norddeutschland installiert, welche Lücken in der Stromversorgung schließen, welche bei der Stromerzeugung durch Windenergie durch Schwachwind und Flauten entstehen. Die Vermeidungskosten liegen bei 490,58 €/tCO₂ und damit höher als ohne RED II Bedingungen. Diese sind vor allem auf die höheren Kapazitäten an Elektrolyse und Wasserstoffspeicher zurückzuführen.

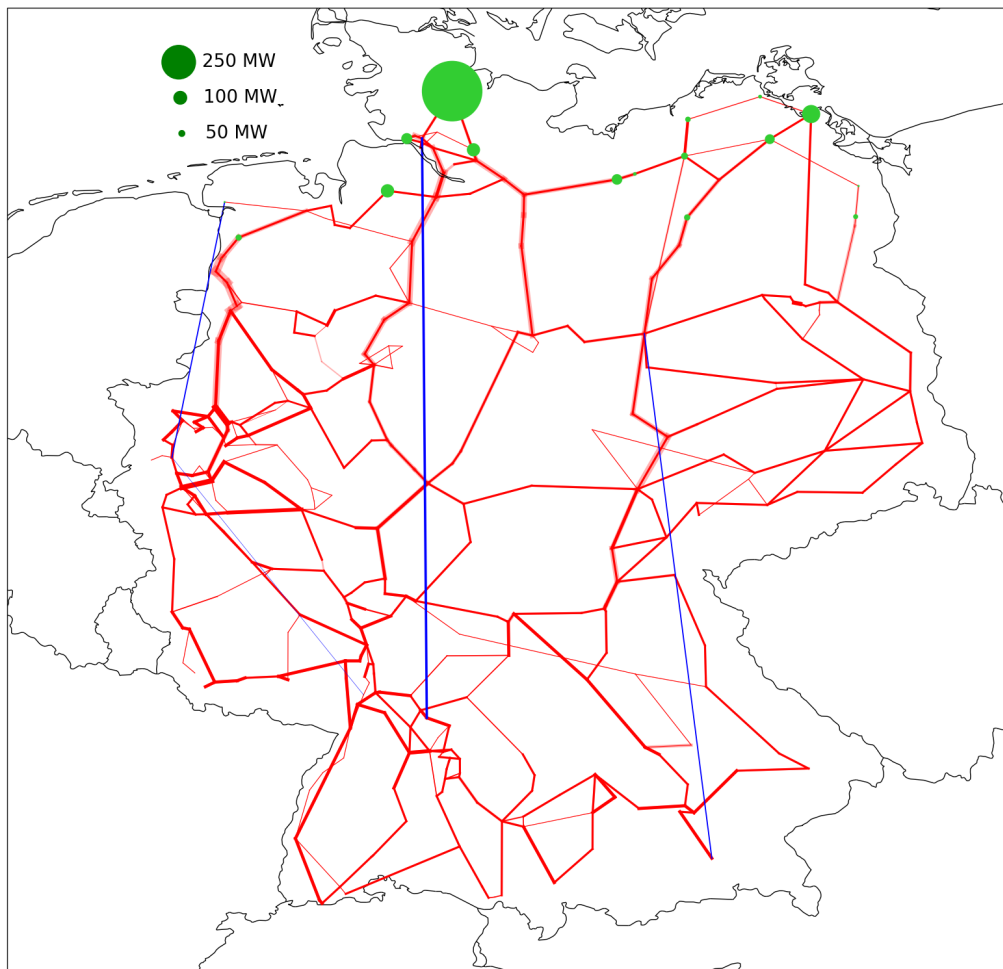


Abbildung 10: Optimale Allokation und Kapazitäten der Elektrolyse im deutschen Energiesystem mit Beschränkung des Strombezugs durch die RED II-Kriterien in 2030.

4.1.3 Betrachtung von Greenfield-Ansätzen bei der reFuels Produktion

U. Langenmayr, M. Ruppert, W. Fichtner (IIP)

Bei der Analyse der reFuels-Produktion innerhalb des deutschen Energiesystems wird davon ausgegangen, dass die Anlagen an das deutsche Stromnetz angeschlossen sind. Entsprechend würden zu den Aufwendungen im Rahmen der Investition und den marginalen Stromgestehungskosten weitere Aufwendungen durch Steuern und Umlagen hinzukommen, welche die Strombezugskosten weiter erhöhen. Bei einer reFuels-Produktion ohne die in RED II vorgeschlagenen Strombezugskriterien besteht darüber hinaus die



Herausforderung, dass ein vollständig erneuerbarer Strombezug nicht sichergestellt werden kann. Bei der Erzeugung des Stroms in Deutschland werden verschiedene Energieträger eingesetzt. Hinzukommt, dass erneuerbarer Strom immer noch ein knappes Gut in Deutschland ist und damit die Produktion von reFuels direkt in Konkurrenz zu der Deckung der konventionellen Stromnachfrage, Power-to-Heat-Prozessen, aber auch die Produktion von Wasserstoff und Basischemikalien für Industrieprozesse steht. Schlussendlich ist auch die Zertifizierung der reFuels deutlich schwieriger, wenn diese durch eine Anlage produziert wird, welche über das Stromnetz den notwendigen Strom bezieht.

Aus diesem Grund wurden innerhalb des reFuels-Projekts PtL- und PBtL-Anlagen modelliert und optimiert, welche vollständig unabhängig vom Stromnetz agieren. Diese Insellösungen können ausschließlich mit erneuerbaren Energien aus z.B. Wind und Solar betrieben werden und erfüllen auch strenge Kriterien des erneuerbaren Strombezugs. Insellösungen haben jedoch den Nachteil, dass sie in Zeiten niedriger erneuerbarer Stromerzeugung keinen Strom beziehen können und somit entweder flexibel betrieben oder in größerem Umfang Speicher (z.B. Batterie-, Wasserstoff- und CO₂-Speicher) nutzen müssen.

4.1.3.1 Vom stationären zum dynamischen Betrieb

Die Ergebnisse in Kapitel 4.1.1 zeigen, welche Bedingungen im stationären Betrieb erreicht werden müssen, um gewisse reFuels-Produktionskosten zu erreichen. Der Vorteil beim stationären Betrieb ist, dass die Anlagenkomponenten so ausgelegt werden können, dass diese eine möglichst hohe Auslastung erreichen, die den vorgegebenen Volllaststunden entspricht. Dabei unterliegt die Methodik der Annahme, dass die Stromversorgung über die Volllaststundenzahl hinweg konstant ist. Die Berücksichtigung der volatilen Stromerzeugung aus den erneuerbaren Energien birgt hier jedoch die Herausforderung, dass die Stromversorgung nicht konstant ist. Basierend darauf müssen Anpassungen der Anlagenauslegung vorgenommen werden, damit die Produktionskosten weiterhin kostenminimal ausfallen. Die Herausforderung ist dabei vielschichtig, da im System mehrere Maßnahmen existieren, die volatile Stromerzeugung zu integrieren. Zu diesen Maßnahmen gehören:

- Speicherlösungen für verschiedene Betriebsmittel, Edukte und Produkte
- Flexibler Betrieb der Anlagenkomponenten
- Überkapazitäten zur Steigerung der Verfügbarkeit
- Diversifizierung des Bezugs von Betriebsmitteln, Edukten und Produkten
- Parallelisierung von Betriebsprozessen

Die Maßnahmen haben vor allem auf die Auslastung und die Kapazitäten der Anlagenkomponenten Auswirkungen. Dabei ist zu beachten, dass dabei zusätzliche Kosten entstehen können. Deshalb muss abgewogen werden, inwiefern Maßnahmen umgesetzt werden, damit die zusätzlichen Kosten nicht die Kosteneinsparung der Maßnahme übertreffen.

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Maßnahmen zur Integration der volatilen Stromerzeugung.

Maßnahme	Vorteile	Nachteil
Installation von Speichern	Erhöht die Flexibilität des Systems	Bedarf an Speicherkapazitäten
Flexibler Betrieb	Erhöht die Flexibilität des Systems	Niedrigere Auslastung, erhöhte Kapazitäten
Überkapazitäten	Erhöht die Verfügbarkeit	Niedrigere Auslastung, erhöhte Kapazitäten
Diversifizierung des Bezugs	Erhöht der Verfügbarkeit	Evtl. erhöhte Kapazitäten



Welche Maßnahmen für die kostenminimale Produktion von reFuels am geeignetsten sind, hängt stark von den techno-ökonomischen Parametern und der volatilen Stromerzeugung am Standort ab, wodurch generische Lösungen für Anlagen ohne die Betrachtung der volatilen Stromerzeugung nicht zielführend sind. Vor- und Nachteile möglicher Maßnahmen dazu sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Zudem muss die Anlage als Gesamtsystem betrachtet werden, da die verschiedenen Komponenten zusammenhängen und nicht alleinstehend optimiert werden können. Generell gilt:

- Standorte mit gleichbleibender oder gering-volatiler Stromerzeugung benötigen weniger Maßnahmen zur Integration der volatilen erneuerbaren Energien. Entsprechend ist dies der umgekehrte Fall bei Standorten mit hoher Volatilität
- Auf technologischer Seite ist der entscheidende Faktor dabei die Flexibilität der unflexibelsten Anlagenkomponente. Ist eine Anlagenkomponente vollständig unflexibel, muss die Versorgung dieser Komponente konstant sein. Alle vorhergehenden Komponenten müssen so dimensioniert und betrieben werden, dass eine konstante Versorgung sichergestellt ist. Umgekehrt kann eine vollständig flexible Anlage mit deutlich weniger Maßnahmen zur Integration der volatilen Stromerzeugung auskommen, um kostenminimal reFuels zu produzieren
- Ökonomische Parameter zeigen, welchen Einfluss die verschiedenen Maßnahmen auf die Produktionskosten der reFuels haben und werden deshalb zur Bewertung der Maßnahmen herangezogen

4.1.3.2 Die Modellierung dynamischer Power-to-X-Prozesse

Innerhalb des reFuels-Projekt wurde ein Power-to-X Standortmodell entwickelt, mit dem entweder die vollständige Wertschöpfungskette von der Stromerzeugung bis zum Produkt oder nur Teile der Wertschöpfungskette (z.B. ausschließlich die Synthese) modelliert werden kann. Die modellierte Anlage wird dabei vor allem durch die techno-ökonomischen Parameter der Syntheseprozesse, der Speicher und der Erzeugungsanlagen sowie der standortabhängigen Parameter definiert und mittels gemischt-ganzzahliger Optimierung die minimalen Produktionskosten des Zielprodukts der Anlage berechnet. Wenn berücksichtigt, können standortabhängige Parameter wie z.B. das lokale Wetter, welches Einfluss auf die Stromerzeugung hat, oder Parameter wie Wasserverfügbarkeit, Kosten von Hilfsstoffen oder Preisschwankungen integriert werden. Alle Betriebsmittel können darüber hinaus bzgl. Bezugskosten und Verkaufspreise angepasst und somit der Kauf und Verkauf der Betriebsmittel und der Zwischenprodukte abgebildet werden. Das Modell hat eine Auflösung von 8760 Stunden und damit einem Jahr. Es werden die Kapazitäten aller Anlagenkomponenten und für sämtliche Stunden die Betriebszustände, Speicherstände, Stromerzeugung, An- und Verkauf von Betriebsmitteln, und die Produktion optimiert und schlussendlich dargestellt. So kann der Nutzer des Modells vollständig nachvollziehen, wie die berechneten Ergebnisse zustande kommen und darauf aufbauend analysieren, welche Verbesserungspotentiale sich ableiten lassen.

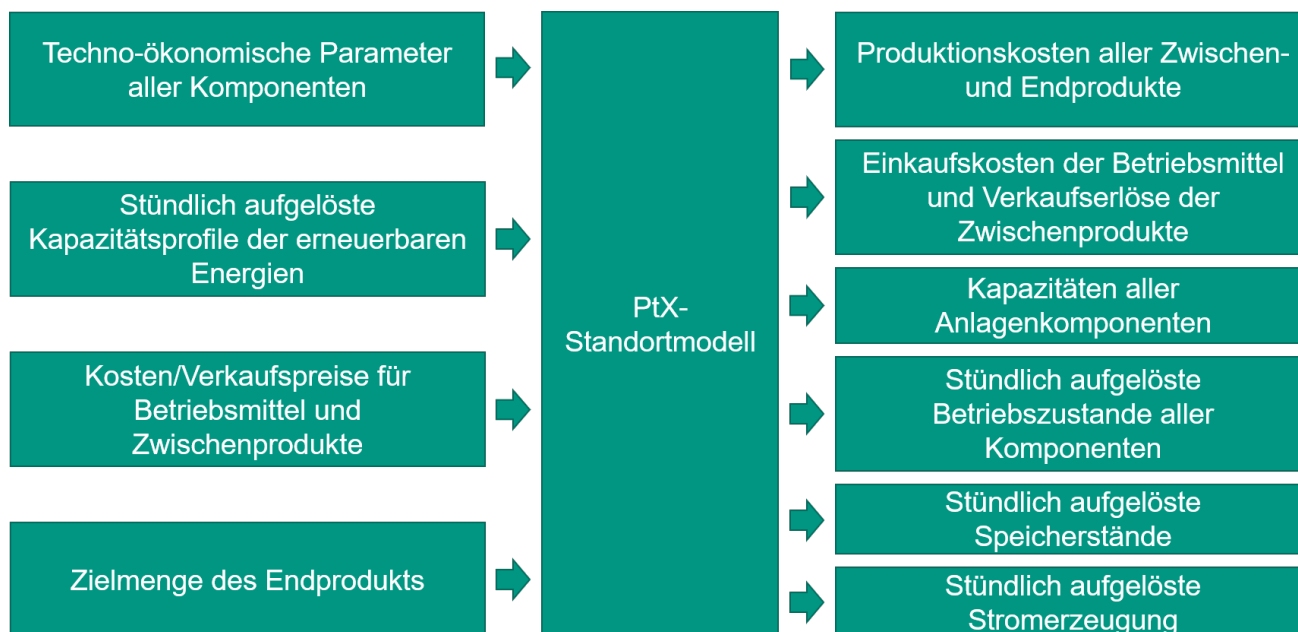


Abbildung 11: In- und Outputs des PtX-Standortmodells

Die generische Implementierung des PtX-Standortmodells ermöglicht es, eine Vielzahl an PtX-Prozessen zu implementieren, und anschließend mit standortspezifischen Daten auf den Standort anzupassen. Im Rahmen der Standortmodellierung wurden die oben beschriebenen Prozesse (ohne PtL-FTS-zentral und BTL-MtG) im PtX-Standortmodell abgebildet und die optimale Lösung berechnet. Als Zielmenge der Anlagen wird eine jährliche Produktionskapazität von 100.000 Tonnen Diesel/Benzin (FTS) bzw. Benzin (MtG) gesetzt. Es wird angenommen, dass die Anlage über das Jahr hinweg konstant betrieben wird und damit weder abgeschaltet, noch in einen Standby-Modus geschaltet werden kann. Jede Anlagenkomponente kann jedoch in gewissem Rahmen flexibel betrieben werden.

4.1.3.3 Datengrundlage Strombezug

Die Berechnung der Produktionskosten findet anhand von 41 Wetterjahren an ausgewählten Standorten statt. Die Standorte (Tabelle 4) wurden anhand geplanter PtL-Projekte festgelegt. Für jedes Jahr wird eine separate Berechnung durchgeführt um zu zeigen, wie sich das Wetterjahr auf die Produktionskosten, die Anlagendimensionierung und den Betrieb auswirkt. Die Erzeugungsprofile der erneuerbaren Energien werden mittels der ERA 5 Daten ermittelt [4]. Die ERA 5 Daten beinhalten Messungen verschiedener wetterabhängiger Parameter wie Windgeschwindigkeit, solare Einstrahlung etc. Diese Daten werden mit Hilfe des Open Source Tools atlite [5] in Erzeugungsprofile für Wind- und Solarenergie umgewandelt. Aufgrund der globalen Messungen der ERA 5 Daten können so Erzeugungsprofile für Standorte weltweit erstellt werden. Diese stehen dann repräsentativ für ein 30 km x 30 km Raster. Als globale Standorte werden jeweils ein Standort in Südpatagonien, in Westaustralien, den USA und Marokko gewählt. Diese wurden anhand bereits bestehender oder geplanter Projekte bzw. anhand des reFuels-Potentials ausgewählt.

Tabelle 4: Ausgewählte Standorte zur Berechnung der Wind- und Solarprofile, der Vollaststunden und der Stromgestehungskosten

Standort	Breitengrad	Längengrad
Puntas Arena, Chile	53° 9' 48.182" S	70° 54' 28.174" W
Tarfaya, Marokko	27° 56' 15.137" N	12° 55' 34.626" W



Matagorda County, USA	28° 44' 31.11" N	96° 17' 9.643" W
Telfer, Australien	21° 43' 51.157" S	122° 10' 26.771" E

Aus den Ergebnissen dieser Analysen leiten sich folgende Stromgestehungskosten und Volllaststunden ab.

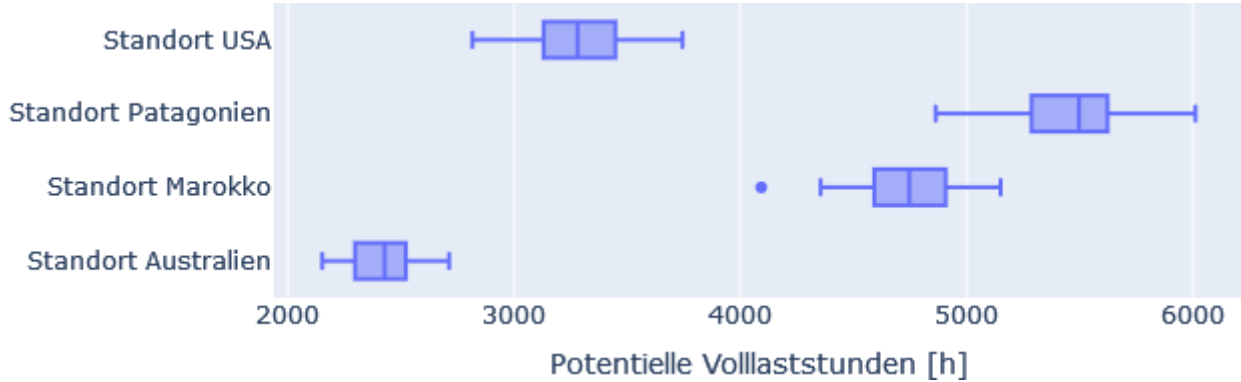


Abbildung 12: Potentielle Volllaststunden der Windkraftanlagen je Standort für alle Wetterjahre

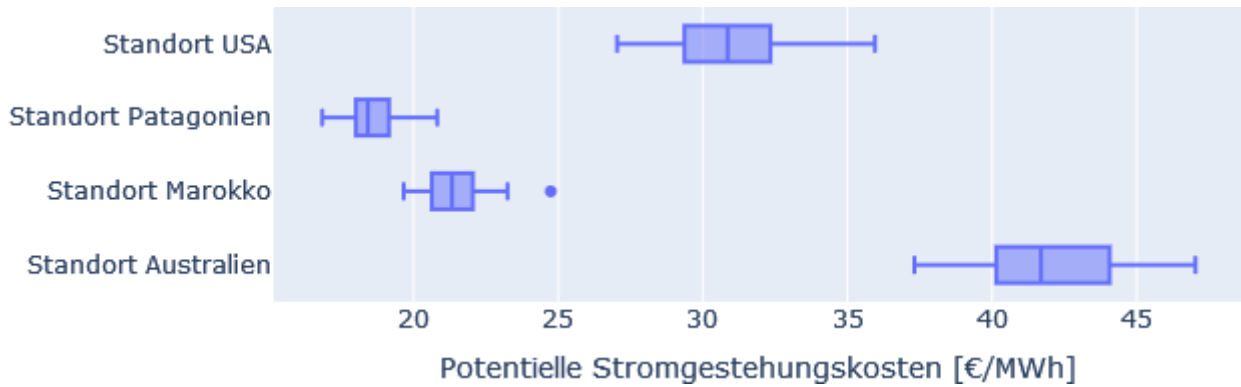


Abbildung 13: Potentielle Stromgestehungskosten der Windkraftanlagen je Standort für alle Wetterjahre

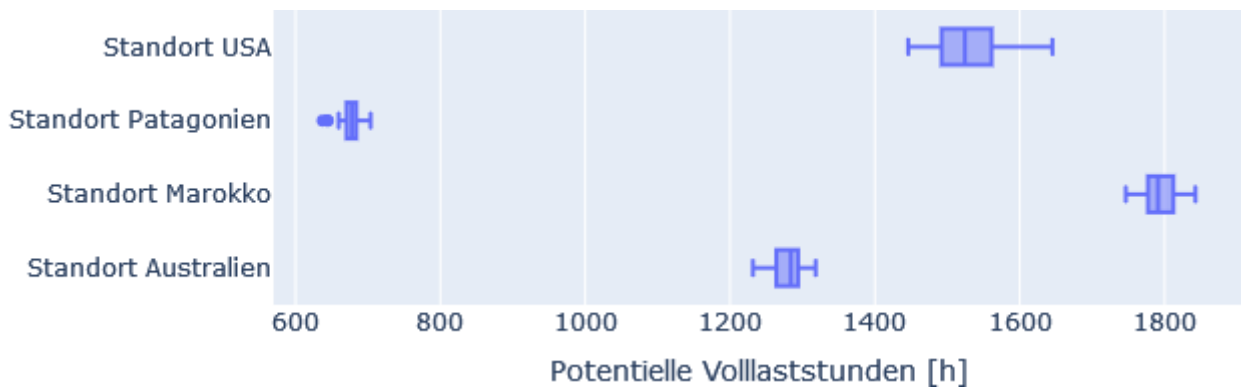


Abbildung 14: Potentielle Volllaststunden der Photovoltaikanlagen je Standort für alle Wetterjahre

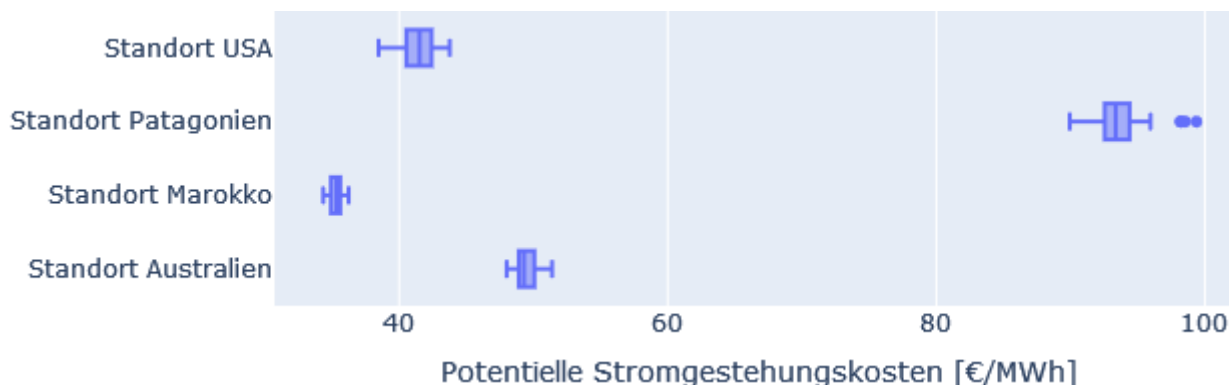


Abbildung 15: Potentielle Stromgestehungskosten der Photovoltaikanlagen je Standort für alle Wetterjahre

Exemplarisch ist unten ein Ausschnitt eines Solar- und Windprofils für Marokko abgebildet. Diese Profile haben eine Auflösung von 8760 Stunden und werden für die vergangenen 41 Wetterjahre (bis 1980) berechnet.

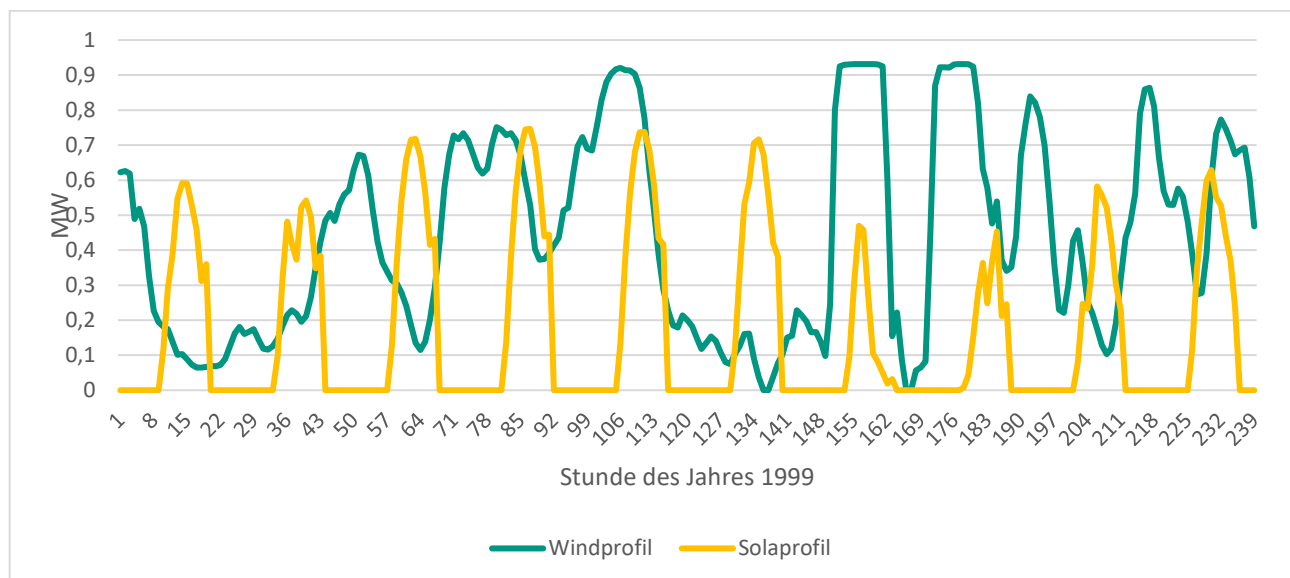


Abbildung 16: Normiertes Wind- und Solarprofil für den ausgewählten Standort in Marokko für einige Stunden des Jahres 1999

4.1.3.4 Vergleich der Produktionskosten zwischen den verschiedenen Routen und Standorten

Abbildung 17 zeigt die Produktionskosten der verschiedenen Prozessrouten und Standorte. Für die Berechnung der Fallbeispiele wurden die techno-ökonomischen Parameter für das Jahr 2030 gewählt. Diese stimmen mit den Parametern aus Kapitel 4.1.1 überein. Hierbei ist zu erwähnen, dass sich die Parameter auf Literaturdaten zum Zeitpunkt der Berechnung beziehen und deshalb von den eintreffenden Preisen abweichen können. Klar ersichtlich ist, dass diese sich ca. zwischen 1,8 €/kg und 5 €/kg bewegen. Der direkte Vergleich zwischen verschiedenen Prozessrouten ist jedoch nur begrenzt möglich. Dies liegt an den Bezugskosten von Biomasse und den möglichen Verkaufserlösen von LPG der MtG-Route. Die Daten hierzu basieren auf der Literatur und können dadurch stark von der Realität abweichen. Bei steigenden Biomassepreisen erhöhen sich direkt die Produktionskosten aller Biomasse-abhängiger Prozesse. Bei steigenden LPG-Preisen erhöhen sich die Verkaufserlöse der MtG-Routen und es werden niedrigere Produktionskosten erreicht. Entsprechend müssen diese Aspekte bei der Standortbetrachtung über die reine Betrachtung der Stromgestehungskosten hinaus berücksichtigt werden.

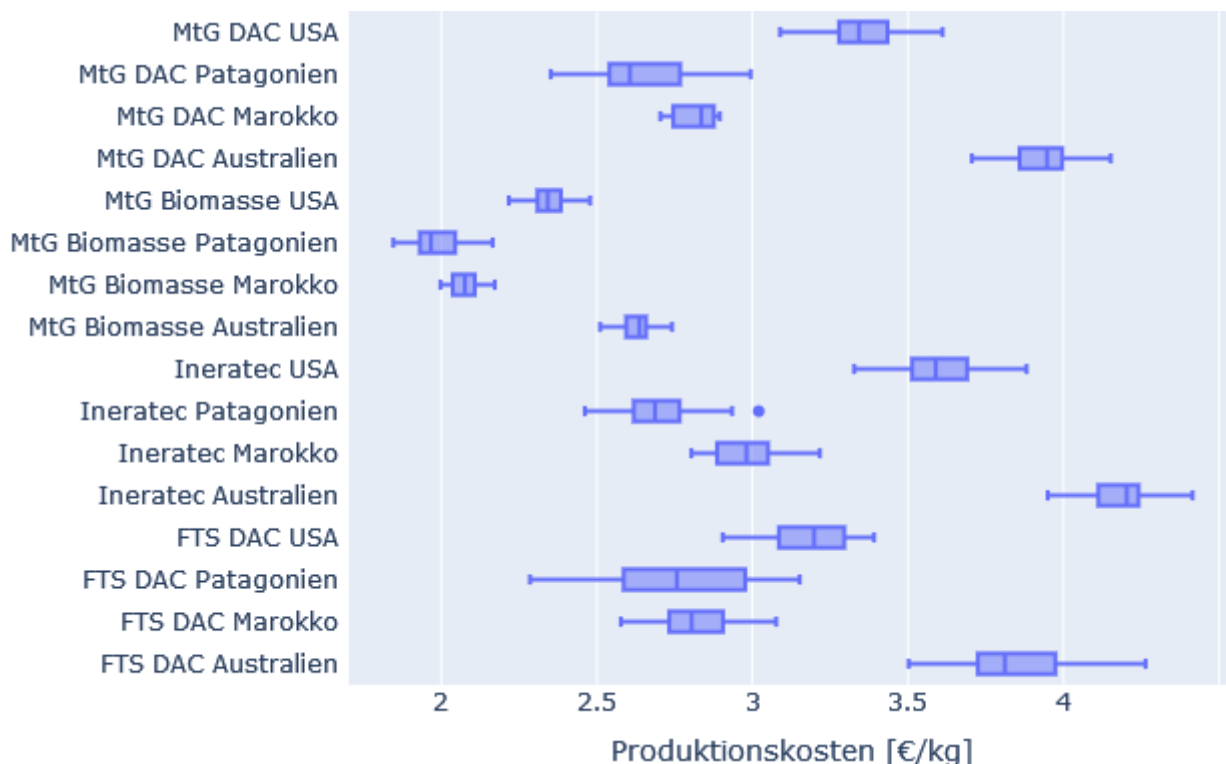


Abbildung 17: Produktionskosten der verschiedenen Prozessrouten und Standorte.

Aus der Abbildung sind neben den Produktionskosten weitere Aspekte ersichtlich. Zum einen, dass die Standorte bereits bei gleichen Prozessrouten zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Während Patagonien und Marokko die günstigsten Produktionskosten erreichen, werden in Australien die höchsten Produktionskosten erreicht. Dieser Effekt ist klar zurückzuführen auf die Stromgestehungskosten vor Ort, wo bereits Patagonien und Marokko die niedrigsten Stromgestehungskosten und Australien die höchsten aufweisen.

Es ist zudem sichtbar, dass Biomasse-basierte Prozessrouten eine deutlich geringere Streuung der Ergebnisse erreichen. Dies ist zurückzuführen auf die stärkere Unabhängigkeit von den erneuerbaren Energien. Da nur ein Teil des Wasserstoffs über die Elektrolyse produziert werden muss, fließen die volatilen Wasserstoff-Erzeugungskosten in geringerem Anteil in die Gesamtkosten ein, wodurch das Gesamtergebnis nur begrenzt von dieser Volatilität beeinflusst ist.

Im direkten Vergleich der FTS-DAC- und der MtG-DAC-Route ist sichtbar, dass die MtG-Route eine geringere Streuung bei den Produktionskosten erreicht. Dies ist damit erklärbar, dass die MtG-Route eine höhere Flexibilität aufweist und dadurch die erneuerbaren Energien besser integrieren kann. Dies führt schlussendlich zu höherer Sicherheit bezüglich der Produktionskosten. Dieser Effekt ist darüber hinaus sichtbar bei der Ineratec-Route. Die Mikroreaktionstechnik ist flexibler als die konventionelle FTS, wodurch die erneuerbaren Energien besser integriert werden können und dadurch eine geringere Streuung der Produktionskosten erreicht wird. Aufgrund der hohen Aufwendungen bei der Investition in die Synthesenanlagen sind die Produktionskosten jedoch höher.

Zuletzt sollte erwähnt werden, dass die Ergebnisse der Standorte nicht repräsentativ für das ganze Land stehen. Diese Betrachtung wäre durchaus möglich, ist jedoch aufgrund der notwendigen Daten zu umfangreich. Entsprechend wäre ein möglicher nächster Schritt die vollständige Betrachtung einzelner Regionen oder Länder.

4.1.3.4.1 Analyse der umgesetzten Maßnahmen zur Integration der erneuerbaren Energien

Speicherlösungen sind bei dynamischen Prozessen ein grundlegendes Hilfsmittel, Volatilität in Prozessen zu reduzieren. Bei Prozessen, welche eine Wasserstoffproduktion mittels volatilen Erneuerbaren und Elektrolyse durchführen, spielt vor allem der Wasserstoffspeicher eine wichtige Rolle. Er erlaubt es, dass die Elektrolyse flexibel betrieben wird und folgende Syntheseprozesse trotzdem ausreichend konstant mit Wasserstoff versorgt werden. Entsprechend werden in allen Wetterjahren und Standorten Wasserstoffspeicher verwendet. Soll die reFuels-Anlage konstant über das Jahr hinweg betrieben werden, müssen auch längere Flauten und Abschattung, welche die erneuerbare Stromerzeugung reduzieren oder gar verhindern, mittels Speicher abgedeckt werden. Bei der Dimensionierung der Speicher ist deshalb auf zwei Dinge zu achten: die Konstanz, mit der das gespeicherte Medium bereitgestellt werden soll, und die Lücken in der Bereitstellung des erneuerbaren Stroms. Da gerade der zweite Aspekt standortabhängig ist, ist eine generische Speichergröße für verschiedene Standorte nicht zielführend. Darüber hinaus muss ein Batteriespeicher bereitgestellt werden, da die Synthese-Anlagen einen Eigenbedarf an Strom besitzen.

Wie oben beschrieben ist die Notwendigkeit der Maßnahmen zur Integration der erneuerbaren Energien vor allem davon abhängig, wie flexibel das PtL-Gesamtsystem ist. Können Elektrolyse und Synthese flexibel betrieben werden, sind weniger Speicher notwendig. Dieser Umstand ist direkt sichtbar, wenn die Größe des Wasserstoffspeichers einer FTS-Anlage mit geringer Flexibilität mit dem Wasserstoffspeicher einer MtG-Anlage verglichen wird.

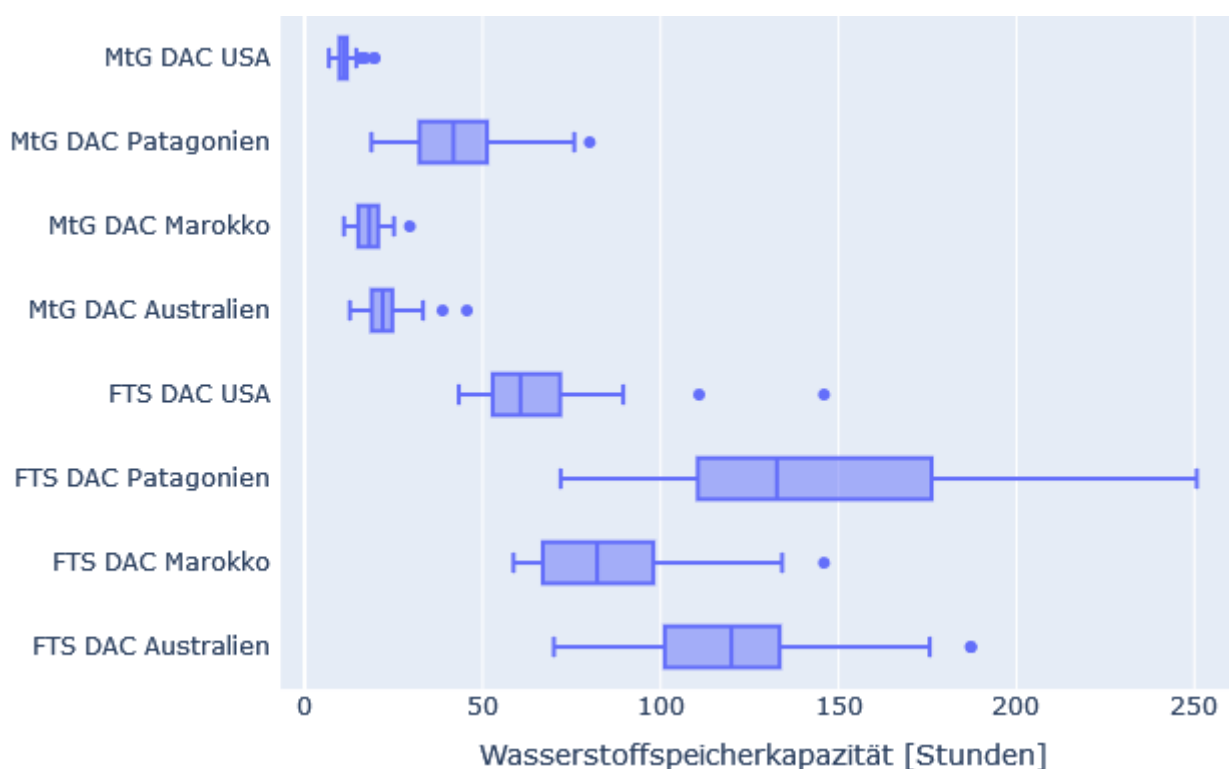


Abbildung 18: Wasserstoffspeicherkapazität der FTS-DAC und MtG-DAC-Route.

Speicher können nur genutzt werden, wenn die Kapazitäten der Stromerzeugung und der Elektrolyse so dimensioniert sind, dass diese in kurzer Zeit die Speicher ausreichend füllen. Um dies zu erreichen, müssen Überkapazitäten installiert werden, welche in Zeiten ausreichender Stromversorgung nicht nur für die Versorgung der Synthese verwendet werden, sondern auch zur Füllung der Speicher.

Die Elektrolyse orientiert sich beim Betrieb stark an die Verfügbarkeit der erneuerbaren Energien und erzeugt dadurch einen volatilen Strom an Wasserstoff, welcher dann direkt verwendet oder gespeichert wird. Dabei



ist es nicht zwangsweise notwendig, den Elektrolyseur so zu dimensionieren, dass der elektrische Strom vollständig aufgefangen werden kann. Es kann durchaus günstiger sein, die Elektrolyse kleiner zu dimensionieren umso die Auslastung zu erhöhen und dadurch die Fixkosten der Wasserstoffbereitstellung zu reduzieren. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 19 deutlich.

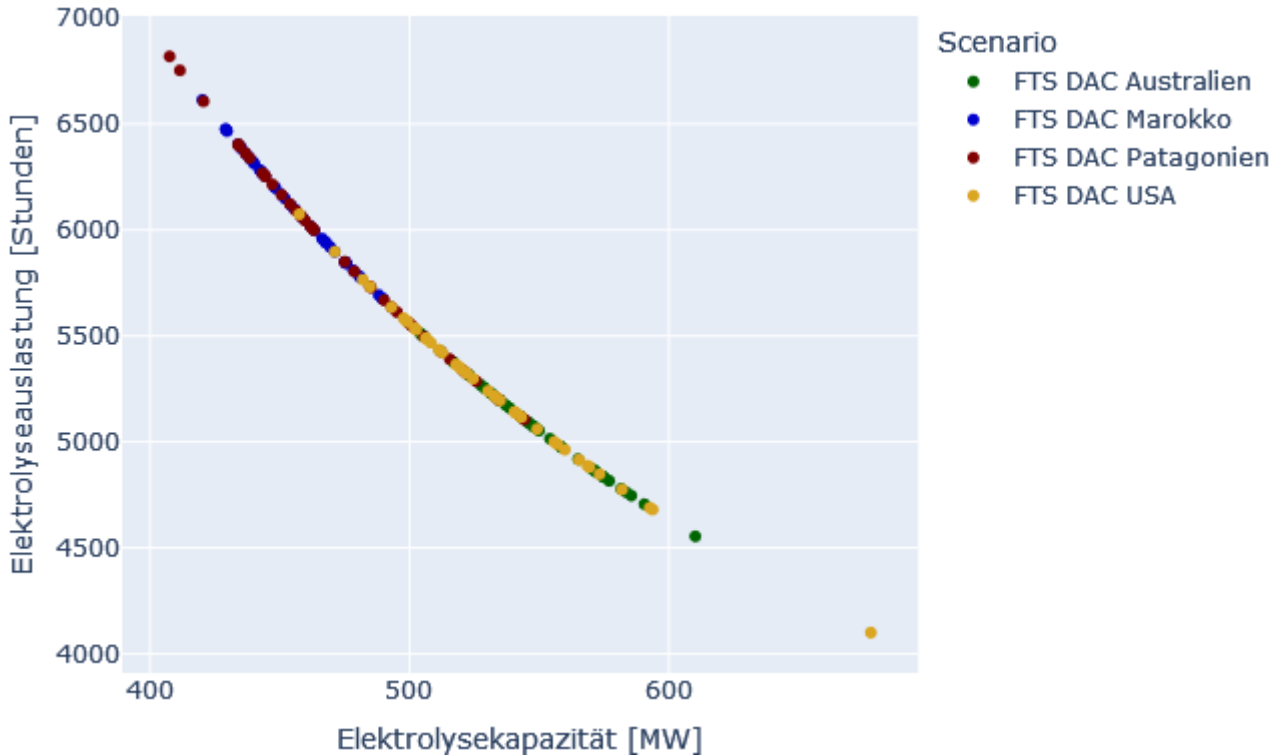


Abbildung 19: Verhältnis der Elektrolysekapazität zur Elektrolyseauslastung.

Diese Entscheidung hat jedoch direkt Auswirkung auf die nutzbare Energie der Stromerzeugung. Wenn die Elektrolyse deutlich kleiner dimensioniert wird als die Stromerzeugungskapazitäten muss verstärkt Strom abgeregelt werden. Abbildung 20 zeigt den stündlichen Betrieb der Elektrolyse und die potentielle Stromerzeugung. Hier wird die grüne Spitze der Stromerzeugung abgeregelt, da diese Leistung nicht von der Elektrolyse aufgenommen werden kann.

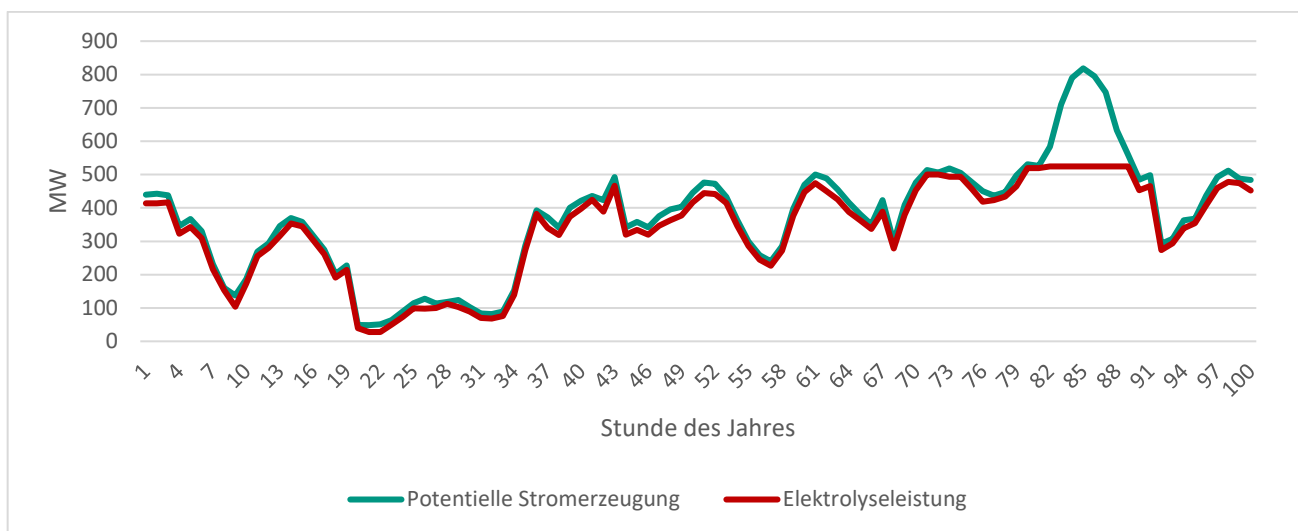


Abbildung 20: Potentielle Stromerzeugung und Elektrolyseleistung.

Schlussendlich gilt es, einen Mittelweg zwischen Dimensionierung und Abregelung zu treffen. Kleine Kapazitäten führen zu niedrigeren Fixkosten, jedoch zu höheren Stromgestehungskosten, da mehr Energie abgeregelt wird. Umgekehrt führen höhere Kapazitäten zu niedrigeren Stromgestehungskosten, jedoch gleichzeitig zu höheren Fixkosten.

Eine weitere Maßnahme kann die Diversifizierung der Anlage sein. Ein Beispiel ist hier die Kombination von PV- und Windenergie. Obwohl an den verschiedenen Standorten mittels Windkraft deutlich höhere Volllaststunden erreicht werden, werden vor allem in Marokko, Australien und USA höhere PV-Kapazitäten installiert. Die Stromerzeugung mittels Windkraft ist nicht konstant und Flauten können zu größeren Lücken in der Stromerzeugung führen. PV kann hier genutzt werden, um die Lücken zu schließen. Dieses Vorgehen ist sichtbar in Abbildung 21.

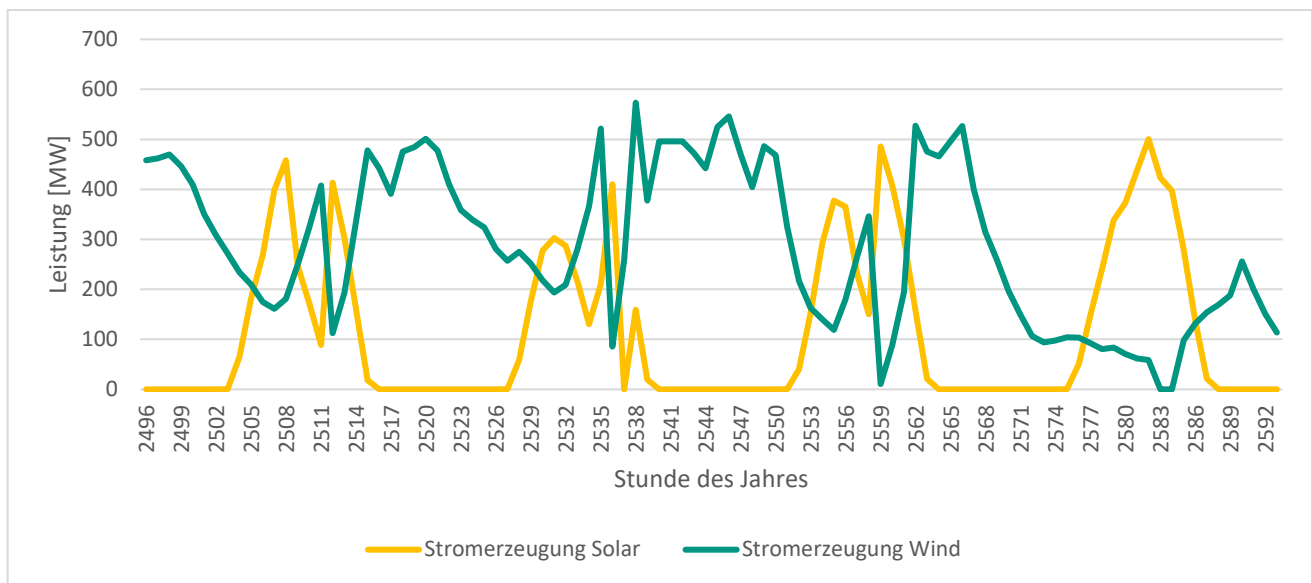


Abbildung 21: Zeitliche Stromerzeugung aus PV und Wind.

Die Diversifizierung der Stromerzeugung kann dazu führen, dass Speicherkapazitäten reduziert werden (Vergleich Standort Patagonien zu Marokko (Abbildung 18)), da die Dauer der reduzierten Stromerzeugung verringert wird. Durch die Kombination von PV und Wind liegen die umgesetzten Stromgestehungskosten zwischen den Stromgestehungskosten der einzelnen Technologien. Ist ein Standort besonders attraktiv durch eine günstige Stromversorgung mittels Windkraft, werden die Kosten durch das Hinzufügen von PV steigen, wenn die Stromgestehungskosten der PV höher liegen. Die Kombination von Wind und PV kann jedoch gleichzeitig zu niedrigeren Speicherkapazitäten oder höherer Auslastung der Stromabnehmer führen, und dadurch Kosten reduzieren.

Die Diversifizierung der Betriebsmittel hat darüber hinaus dann Vorteile, wenn dieses Betriebsmittel konstant zur Verfügung steht. Erkennbar ist dies bei den Prozessrouten, welche Biomasse als Ausgangsprodukt nutzen. Durch die konstante Verfügbarkeit der Biomasse entkoppelt sich der Prozess verstärkt von der volatilen Stromerzeugung, da nur ein Teil des Wasserstoffs mittels elektrischen Stroms produziert werden muss.

Die oben beschriebenen Maßnahmen greifen in vielerlei Hinsicht ineinander. Z.B. sinkt durch einen flexibleren Betrieb die Auslastung, wodurch Überkapazitäten notwendig sind um trotzdem die notwendige Menge des Betriebsmittels herzustellen. Auch die Anwendung von Speichern ist nur dann sinnvoll, wenn das gespeicherte Medium zeitgleich nicht vollständig in Folgeprozessen benötigt wird, was nur durch Überkapazitäten möglich ist. Ökonomisch gesehen haben alle Maßnahmen Vor- und Nachteile. Überkapazitäten der Stromabnehmer führt zur besseren Integration der erneuerbaren Energien, da die Leistung der Stromerzeugung besser



integriert werden kann, was zu niedrigeren Stromgestehungskosten führt. Gleichzeitig steigen die Fixkosten, da die Auslastung der Stromabnehmer sinkt. Dieses Zusammenspiel der Maßnahmen muss deshalb ganzheitlich bewertet und optimiert werden. Die Optimierung einzelner Anlagenkomponenten führt zwangsweise zu einem Ungleichgewicht der ökonomischen Auswirkungen und dadurch zu höheren Produktionskosten. Diese Herausforderung ist mit dem PtX-Standortmodell abbildbar und eine optimale Lösung, welche eine Kombination der verschiedenen Maßnahmen beinhaltet, berechenbar.

4.2 Cluster A2: Herstellung Methanol-basierter Ottokraftstoffe

4.2.1 Herstellung Methanol-basierter Ottokraftstoffe

Arnold, Ulrich; Dahmen, Nicolaus; Fuchs, Constantin; Lam, Herbert; Sauer, Jörg (IKFT)

4.2.1.1 Synthese von Ottokraftstoffen an der bioliq[®]-Anlage

Ottokraftstoffe wurden aus der bioliq[®]-Pilotanlage auf der Basis von Biomasse bereit gestellt [6]. Der bioliq[®]-Prozess wurde entwickelt, um aus trockenen Restbiomassen synthetische Kraftstoffe herzustellen. Bei diesem dezentral-zentralen Prozesskonzept wird aus der jeweiligen Biomasse zunächst ein energiedichtes, flüssiges Zwischenprodukt erzeugt, das in wirtschaftlichen Großanlagen weiter zu Synthesegas und Kraftstoffen umgesetzt werden kann. Der Prozess besteht aus den Stufen Pyrolyse, Synthesegaserzeugung durch Hochdruck-Flugstromvergasung, Gasreinigung und Synthese [7]. Zur Prozessdemonstration wurde am KIT nach entsprechenden Vorarbeiten ab 2006 stufenweise eine Pilotanlage errichtet und betrieben. Pyrolyseöl wurden aus Stroh und Miscanthus hergestellt, aber auch kommerziell verfügbare, biogene Pyrolyseöle werden zur Herstellung der Synthesekraftstoffe beschafft. Der hier beschriebene Syntheseprozess (Abbildung 22) umfasst die Synthesegas-Konditionierung, die direkte Synthese von Dimethylether (DME) aus Synthesegas und dessen weitere Reaktion zu Kohlenwasserstoffen.

Das Rohsynthesegas aus der vorhergehenden Synthesegaskonditionierung muss zunächst vom CO₂ befreit werden. Das Synthesegas wird dafür über mehrere Wärmetauscher auf die benötigte Einsatztemperatur abgekühlt, wobei auch der größte Teil des enthaltenen Wassers auskondensiert. Ein Teil des enthaltenen CO₂ wird im Kondensat gelöst. Weiterhin werden in einem Separator die Flüssig- und Gasphase getrennt. Das Synthesegas gelangt nun in den CO₂-Absorber, in dem der größte Teil des CO₂ durch ein flüssiges Waschmedium entfernt wird. Das so gereinigte Synthesegas wird zum Teil als Einsatzstoff für die DME-Synthese genutzt. Der andere Teil ist der Einsatzstoff der Wassergas-Shift-Reaktion (WGR), in dem das H₂/CO Verhältnis im Kreislaufgas so verändert werden kann ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}_2$), wie es die Synthesereaktion erfordert. Das Synthesegas wird über einzelne Wärmetauscher auf die nötige Prozesstemperatur gebracht und mit erhitztem Prozesswasser vermischt. Durch Erhöhung der Temperatur mittels Hochdruckdampf auf die Reaktionstemperatur verdampft das im Gemisch enthaltene Prozesswasser. Das heiße Einsatzgas wird im WGS-Reaktor katalytisch umgesetzt. Das heiße, mit Wasserstoff angereicherte Reaktionsprodukt wird über Wärmetauscher abgekühlt und gelangt zur „CO₂-Entfernung Kreislaufgas“, um das bei der WGS-Reaktion gebildete CO₂ abzutrennen. In einem Separator wird das Restwasser abgeschieden.

Das mit CO₂ beladene Waschmedium aus beiden CO₂ Absorptionskolonnen („CO₂-Entfernung Kreislaufgas“ und „CO₂-Entfernung Synthesegas“) fließt in den Desorber. Durch Druckreduzierung desorbiert das CO₂ aus dem Waschmedium und wird in die Fackel zur Verbrennung geleitet.

Das vereinigte Synthesegasgemisch wird durch Kondensation von Hochdruckdampf aufgeheizt, in den DME-Reaktor geleitet und dort katalytisch umgesetzt. Die exotherme Reaktion erzeugt Mitteldruckdampf für den Anlagenbetrieb. Das Reaktionsprodukt strömt nach einer weiteren Aufheizung direkt in den Benzinsynthesekonverter. Hier wird das gebildete DME zu Benzin umgesetzt. Die Benzinsynthese findet an



einem Zeolith Katalysator statt. Diese Reaktion ist wieder stark exotherm, so dass über einen Wärmeträger aus Kesselspeisewasser Hochdruckdampf erzeugt wird. Das Reaktionsprodukt der Benzinsynthese wird durch Abgabe seiner Wärme an die Einsatzstoffe der DME- und Benzinsynthese abgekühlt und tritt in die Produktseparation ein. Der abgekühlte Prozessstoff wird mit einem Teil des Produktbenzins aus der Stabilisierungskolonne vermischt. Dieses Benzin dient als Lösemittel für langkettige Kohlenwasserstoffe und weitere Schwerbenzinkomponenten (z.B. Durol). Anschließend wird das Gemisch weiter gekühlt und in den Dreiphasenseparator eingeleitet. In diesem trennt sich das Produktgemisch in eine flüssige Kohlenwasserstoffphase, eine wässrige Abwasserphase und eine Synthesegas-haltige Gasphase, die durch einen Kreislauf-Verdichter über die „CO₂-Absorption Kreislaufgas“ zurück zum DME-Reaktor geführt wird. Das erhaltene Rohbenzin wird in die Benzinstabilisierung geleitet, die im Kopfteil vorhandene nicht kondensierbare Kohlenwasserstoffe abtrennt und zur Fackel geführt. Im Sumpf verbleiben die Kohlenwasserstoffe mit mehr als 8 Kohlenstoffatomen. Ein Teil des stabilisierten Benzins wird im Kreislauf und der andere Teil in den Benzintank gefördert. Aus dem Sumpf der Kolonne wird das Schwerbenzin entnommen. Der in den Reaktoren erzeugte Dampf wird in der Anlage als Wärmequelle durch Kondensation genutzt. Der nicht verbrauchte Dampf wird über einen Kühler kondensiert und als Kesselspeisewasser genutzt.

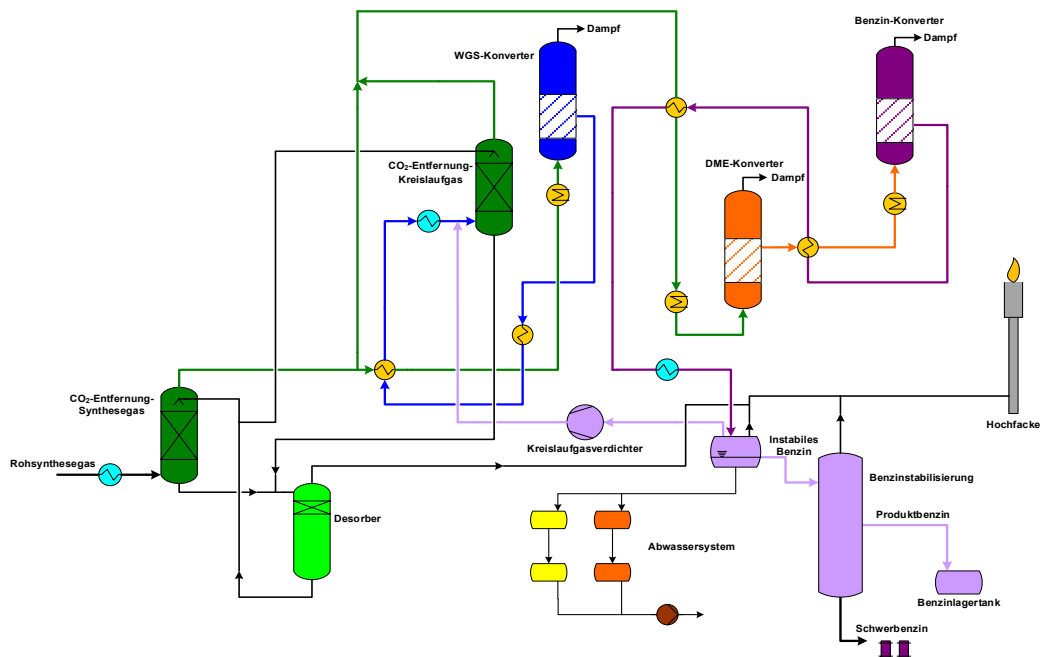


Abbildung 22: Blockfließbild der bioliq®-Syntheseanlage (grün: CO₂-Abtrennung, blau: WGS-Reaktor, orange: DME-Synthese, violett: Benzin-Synthese, flieder: Benzinstabilisierung durch Destillation).

4.2.1.2 Hergestellte Kraftstoffmengen und ihre Eigenschaften

Für das reFuels-Projekts wurden während der Durchführung von vier Betriebskampagnen an der bioliq®-Pilotanlage Biomasse-stämmige Ottokraftstoffe hergestellt. Die bei der Stabilisierung erhaltene Leichtfraktion wurde direkt zu Kraftstoff-Blends weiterverarbeitet. Die am Sumpf der Destillation abgezogene Schwerfraktion wurde hydrierend aufgearbeitet (vgl. Kapitel 4.2.2).



Folgende Produktmengen wurden für das reFuels-Projekt hergestellt:

- Mai 2019 720L
- Nov 2019 600L
- Okt 2020 750L
- Okt 2021 530L

Proben der bioliq[®]-Leichtfraktion wurden im 10 L Maßstab direkt an IKFM für Testzwecke abgegeben. Daraus wurde 10%- und 30%-Blends hergestellt und untersucht [8].

Rund 800 Liter der Leichtfraktion wurden von Fa. Haltermann im Auftrag zu normgerechten Blends mit einem Anteil an erneuerbaren Komponenten von rund 40% verarbeitet. Dieser Kraftstoff wurde als G40 bezeichnet und für Testzwecke zu gleichen Teilen an Porsche, Mahle, Bosch und KIT-IFKM geliefert und erfolgreich erprobt. Ein noch höherer erneuerbarer Anteil bis ca. 85% wurde nur durch Zumischen von hydrierter Schwerbenzinfraction und, perspektivisch, weiteren Komponenten erreicht.

4.2.1.3 Synthesepfade zu aromatenfreiem Benzin

In der Synthesestufe des bioliq[®]-Verfahrens wird aus Synthesegas hergestelltes DME zu Benzin umgesetzt. Dabei wird ein Kraftstoff erhalten, der reich an aromatischen Verbindungen ist. Diese tragen einerseits zu einer hohen motorischen Effizienz bei, z.B. durch hohe Oktanzahlen, befördern aber auch die Partikelbildung im Verbrennungsstadium, was zu erhöhten, unerwünschten Partikelemissionen führt. Darüber hinaus weisen einige Vertreter dieser Verbindungsklasse nachteilige physikalisch-chemische Eigenschaften auf, so dass sie abgetrennt und aufgearbeitet werden müssen. Im reFuels-Projekt wurde zu diesem Zweck die sog. Schwerbenzinfraction im bioliq[®]-Prozess abgetrennt, katalytisch aufgearbeitet (siehe Kapitel 4.2.2) und dem Kraftstoff wieder als Komponente zugeführt. Andererseits wurde im Rahmen einer Promotionsarbeit die Möglichkeit untersucht, aromatenarme oder -freie Kraftstoffe direkt zu synthetisieren. Dieser Weg verläuft über kurzkettige Zwischenprodukte, bei denen DME über einen DME-to-Olefins-Prozess (DtO) zunächst zu Olefinen umgesetzt wird. Die Kettenlänge der Olefine liegt bei kommerziellen Verfahren im Bereich von C₂-C₄. Diese Olefine können durch (Co-)Oligomerisierung mit anschließendem Hydrofinishing dann zu aromatenfreien Kohlenwasserstoffen im Siedebereich von Otto- und Flugkraftstoffen umgewandelt werden. Abhängig vom eingesetzten Katalysator kann dabei auch Diesel-Kraftstoff gewonnen werden.

Im Rahmen des reFuels-Projekts wurde die (Co-)Oligomerisierung von Olefinen, mit Fokus auf der Erzeugung von aromatenarmem Benzin, experimentell untersucht. Dabei wurde von Ethylen ausgegangen, d.h. es wurde zunächst nur Ethylen zur Erzeugung der Kraftstoffe eingesetzt. Danach wurde das Spektrum der Einsatzstoffe systematisch erweitert und es wurden auch Propylen (C₃) und Butylen (C₄) hinzugezogen. In diesem Kontext wurden auch Olefingemische co-oligomerisiert, wobei die eingesetzten Katalysatoren eine zentrale Rolle spielen. Die resultierenden Kohlenwasserstoffgemische wurden analysiert und weisen vielversprechende Kraftstoffeigenschaften auf. Sie sind praktisch frei von Aromaten und bieten somit den Vorteil reduzierter Partikelemissionen.

Allerdings muss im Fall von aromatenfreiem Benzin, wie oben erwähnt, der durch die fehlenden Aromaten bedingte Rückgang der Klopfestigkeit kompensiert werden, was durch stark verzweigte Paraffine oder Oktanzahl-Verbesserer erreicht werden kann. Diese Arbeiten stehen noch aus und sollen in einem Folgeprojekt durchgeführt werden. Dort soll auch ein modifizierter DtO-Prozess weiterentwickelt werden, der langkettige Olefine im Bereich bis C₉ liefert. Mittels (Co-)Oligomerisierung können daraus synthetisches Kerosin und synthetischer Diesel-Kraftstoff hergestellt werden.

Die Herstellung von Kraftstoffen aus Olefinen stellt somit eine sehr flexible Möglichkeit dar, die aktuellen Bestandsflotten im gesamten Verkehrssektor klimafreundlicher zu stellen, sowie die bestehende Verteilungs-





und Tankinfrastruktur weiterhin zu nutzen. Voraussetzung für eine nachhaltige und vor allem emissionsarme Produktion ist die Verfügbarkeit und der Einsatz erneuerbarer Energien und Ausgangsstoffe wie Methanol und DME.

4.2.2 Aufbereitung aromatenreicher Schwerbenzinfractionen

David Graf, Reinhard Rauch, Engler-Bunte-Institut (EBI-ceb)

4.2.2.1 Einführung

Der auf einer DtG-Synthese basierende bioliq®-Prozess bezieht sein Synthesegas aus der Pyrolyse und Vergasung von Restbiomasse wie z. B. Stroh. Neben Biomass-to-Liquid (BTL) besteht die Möglichkeit, das Synthesegas über die sogenannte Power-to-Liquid (PTL)-Route auf Basis von erneuerbarem Strom bereitzustellen. Der Vorteil der BTL-Route liegt in den geringeren Bezugskosten und der Möglichkeit, kurzfristig synthetische Kraftstoffe bereitzustellen. Allerdings ist Biomasse nur begrenzt verfügbar, weshalb für eine Skalierung strombasierte Prozesse unerlässlich sind. Berechnungen zeigten, dass PTL innerhalb Deutschlands wenig lukrativ ist. Als besonders aussichtsreich erachteten die Autoren die MENA-Regionen. Die Produktionskosten für strombasierte DTG-Kraftstoffe könnten um mehr als die Hälfte von 1,71 € L⁻¹ auf 0,80 € L⁻¹ gesenkt werden. Über Pipelines oder Frachtschiffe würden die vor Ort synthetisierten flüssigen Rohprodukte nach Europa transportiert und zu den Zielprodukten (z. B. Benzin, Diesel, Kerosin, Heizöl) raffiniert werden. [9]

Der synthetische bioliq®-Kraftstoff besteht aus linearen und verzweigten Alkanen, Cycloalkanen, Alkenen sowie mit >75 Vol.% zum größten Teil aus methylierten Aromaten. Diese hohe Konzentration an Aromaten ist auf den zugrunde liegenden Mechanismus zurückzuführen. Neben dem Leichtbenzin (C₅-C₈) fällt bei DTG-Prozessen immer ein Schwerbenzin (C₉₊) an. Die darin enthaltene C₁₀-Fraktion enthält mit 3–6 Gew.% den symmetrischen Aromaten 1,2,4,5-Tetramethylbenzol (Durol). Durol besitzt mit 79 °C eine hohe Schmelztemperatur, was zur Kristallisation und folglich zu Störungen im Betrieb führen kann [10]. Um die Qualität des Benzins einzustellen und die aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten wichtige Kraftstoffausbeute zu erhöhen, sind deshalb Konzepte zur Aufbereitung (engl. Upgrading) erforderlich.

Es kann auf verschiedene Prozessstrategien zurückgegriffen werden, um eine durolhaltige Schwerbenzinfraction aus einem DTG-Verfahren zu prozessieren. Dazu zählen a) Transalkylierung/Disproportionierung, b) Extraktion/Kristallisation, c) Verdünnung und d) chemisches Upgrading mittels Hydroprocessing. Prozesse für die Transalkylierung oder Disproportionierung von Aromaten wurden bereits kommerzialisiert, z. B. mit dem Mobil TransPlusSM Prozess, welcher schwere Aromaten in wertvolle BTX-Aromaten umwandelt [11]. Alternativ besteht mit der Kristallisation bzw. Extraktion von Durol die Möglichkeit, das im Schwerbenzin enthaltenen Durol direkt als Basischemikalie, z. B. für die Synthese von Polyimiden stofflich zu nutzen [12]. Beide Prozessvarianten sind allerdings eher auf lange Sicht von Interesse, da davon auszugehen ist, dass die erneuerbaren Ströme in den Raffinerien zunächst klein ausfallen werden. Ohne größere Investitionen besteht die Möglichkeit, das Schwerbenzin in einen geeigneten Raffineriestrom zu dosieren und das darin enthaltene Durol zu verdünnen. Dieses Vorgehen bringt allerdings den entscheidenden Nachteil mit sich, dass Aromaten mit mehr als neun Kohlenstoffatomen bei der Verbrennung zu erheblichen Partikelemissionen führen [13, 14]. In der Literatur wird die Rußbildungstendenz z. B. durch den Threshold Sooting Index [13] oder den Yield Sooting Index (YSI) [15] beschrieben. Neben den genannten Prozessvarianten besteht letztlich noch die Möglichkeit, das im Schwerbenzin enthaltene Durol chemisch umzuwandeln. Haldor Topsøe hat 2018 ein Patent zur Hydroisomerisierung des im synthetischen Kraftstoff enthaltenen Durols angemeldet [16]. Durch Umlagerungsreaktionen wird das Durol in andere Konfigurationen



umgewandelt, wodurch die Kristallisationsproblematik gelöst werden kann, nicht aber die hohe Rußbildungstendenz.

Im Rahmen von reFuels wurde ein alternativer Ansatz näher untersucht, bei welchem das Schwerbenzin zunächst durch eine Rektifikation abgetrennt und anschließend chemisch über ein selektives Hydrocracking angepasst wird. Der Vorteil besteht darin, dass die petrochemischen Parameter wie z. B. die Dichte oder das Siedeverhalten auf eine Weise angepasst werden können, dass sie etwaige Schwachstellen des synthetischen Kraftstoffes aufwiegen. Ebenso können die schweren Aromaten restlos in Paraffine und Naphthene umgewandelt werden. Im Rahmen von reFuels wurde zudem ein Bereitstellungskonzept für einen normgerechten Kraftstoff vorgestellt, um die Rußbildungstendenz und damit die Umwelteinwirkungen des Kraftstoffes zu minimieren. Die Rußbildungstendenz wurde in einem abschließenden Arbeitspaket in Form des YSI näher betrachtet und ein anwenderfreundliches Modell entwickelt.

4.2.2.2 Upgrading des bioliq®-Kraftstoffes

Anforderungen an einen erneuerbaren Kraftstoff

Sowohl fossile als auch erneuerbare Kraftstoffe müssen in Deutschland der Norm DIN EN 228 genügen. Tabelle 5 listet die wichtigsten petrochemischen Parameter des bioliq®-Rohbenzins im Vergleich zur DIN EN 228 auf.

Tabelle 5. Petrochemische Parameter des bioliq®-Rohbenzins im Vergleich zur DIN EN 228.

Parameter	Einheit	DIN EN 228	bioliq® Rohbenzin
ROZ	–	min. 95	101,7
MOZ	–	min. 85	93,7
ρ	kg m ⁻³	720,0–775,0	845,76±0,05
p_v (Klasse A)	kPa	45–60	45±4
E70	Vol.-%	22,0–50,0	1,2±0,7
E100	Vol.-%	46,0–72,0	5,7±0,7
E150	Vol.-%	75,0	46,4±0,7
FBP	°C	210	245±4
Φ_{Aromaten}	Vol.-%	max. 35,0	82,3±0,7

Aus Gründen des Umweltschutzes ist die Aromaten-Konzentration durch die Norm auf 35 Vol.-% beschränkt. Mit 82,3 Vol.-% fällt diese im bioliq®-Rohbenzin deutlich zu hoch aus. Besonders auffällig sind außerdem die Siedekennwerte E70, E100 sowie E150. Der Wert E70 beschreibt z. B. den bei 70 °C verdampften Anteil des Kraftstoffes in Prozent. Demnach fallen alle Siedekennwerte deutlich zu niedrig aus und verdeutlichen den Mangel an Leicht siedern mit Siedetemperaturen bis 150 °C im synthetischen bioliq®-Kraftstoff. Der geringe Gehalt an Leicht siedern drückt sich entsprechend in einem Überschuss an Schwersiedern und einem damit verbundenen zu hohen finalen Siedepunkt (FBP) von 245 °C aus. Die DIN schreibt ein erheblich niedrigeres Siedeende von 210 °C vor. Automobilhersteller versuchen diesen Wert allerdings zu unterschreiten, da ein hoch liegendes Siedeende mit großen Molekülen zusammenhängt, welche erhebliche Partikelemissionen verursachen. Die Dichte des bioliq®-Rohbenzins ist verglichen mit der Norm zu hoch, was auf die hohe Aromatenkonzentration zurückzuführen ist. Neben den genannten Parametern ist die Oktanzahl als Maß für die Klopfestigkeit ein für Ottokraftstoffe wichtiger Parameter. In der DIN EN 228 wird diese in Form der Research Oktanzahl (ROZ) und Motor Oktanzahl (MOZ) aufgeführt und darf die Mindestwerte 95 und 85 jeweils nicht unterschreiten.

Die Abweichungen zur Norm verdeutlichen die Notwendigkeit, das bioliq[®]-Rohbenzin entsprechend aufzubereiten. Besonders kritisch sind die Siedekennwerte E70, E100 und E150, welche insgesamt deutlich zu niedrig ausfallen. Folglich muss eine Upgrading-Strategie darauf abzielen, diese soweit möglich zu steigern und gleichzeitig den Aromatengehalt zu senken.

Hydroprocessing einer aromatenreichen Schwerbenzinfraction

Zunächst wird das bioliq[®]-Rohbenzin über eine Rektifikation in ein Leicht- sowie Schwerbenzin aufgetrennt (siehe Abbildung 23 a). Das Schwerbenzin wird im Folgenden einem Hydroprocessing zugeführt und anschließend dem Leichtbenzin wieder beigemischt. Ebenso können weitere Stoffströme zugemischt werden. Eine Diskussion hierzu erfolgt im Blending-Kapitel.

Beim Hydroprocessing werden die Aromaten im Schwerbenzin zu Naphthenen hydriert und teilweise zu Paraffinen umgewandelt. Beide Stoffgruppen erzeugen weniger Emissionen bei der motorischen Verbrennung, weisen aber im Mittel eine niedrigere Oktanzahl auf. Die Oktanzahl als kritischer Parameter sollte aber für eine korrekte Motorfunktion möglichst hoch ausfallen. Des Weiteren ist sie ein Maß für die Qualität und direkt mit dem Verkaufspreis verbunden (vergl. Super 95 und Super 98). Im etablierten Raffineriebetrieb wird dies durch das Beimischen von Aromaten erreicht. Um einer Abnahme der Oktanzahl entgegenzuwirken, wird das Hydroprocessing bei gesteigerten Temperaturen durchgeführt, sodass sich der Reaktionsbereich vom reinen Hydrieren ins Hydrocracking verschiebt. Beim Hydrocracking kommt es zu strukturellen Umlagerungen (Isomerisierung) der Moleküle und speziell bei Naphthenen zur sogenannten Ringschrumpfung. Diese ist stark abhängig von der Selektivität des Katalysators und führt zu einer Schrumpfung der C₆- zu C₅-Ringstrukturen. Die Ringschrumpfung sowie das teilweise Aufbrechen von zyklischen Molekülen hin zu verzweigten Paraffinen versprechen hohe Oktanzahlen [17]. Die Selektivität der Katalysatoren beim Hydroprocessing des Schwerbenzins ist folglich ein wichtiges Auswahlkriterium. Bifunktionelle Edelmetall-Katalysatoren sind hierfür besonders interessant. Sie weisen bereits bei niedrigen Temperaturen eine hohe Hydrieraktivität auf [18] und eignen sich aufgrund ihrer hohen Säurestärke und Formselektivität zum simultanen Isomerisieren der Reaktionsprodukte [19]. Eine Auswahl vielversprechender Katalysatoren wurde deshalb im Rahmen von reFuels näher untersucht.

4.2.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Hydroprocessing des bioliq[®]-Schwerbenzins

Erste Resultate zum Hydroprocessing wurden im Rahmen der International Conference on Energy & Power präsentiert [20]. Die Ergebnisse wurden zudem als Paper veröffentlicht, von welchem nachfolgend einige Punkte diskutiert werden ([21]).

Die Versuche zum Hydroprocessing wurden in einem Festbettreaktor (siehe Abbildung 23 b) am Engler-Bunte-Institut durchgeführt. Ergänzende Experimente erfolgten am Institut für Katalyseforschung und -technologie.

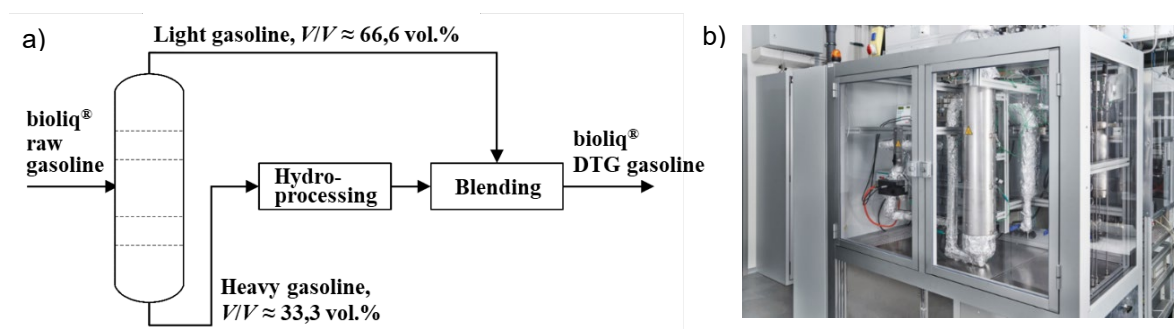


Abbildung 23: a) Grundfließbild für das Upgrading des bioliq[®]-Kraftstoffs im Rahmen von reFuels
b) Festbettreaktor am Engler-Bunte-Institut für das Hydroprocessing des Schwerbenzins.

Alle Proben wurden gemäß DIN EN 228 analysiert. Für das Hydroprocessing wurden von der Clariant Produkte (Deutschland) GmbH fünf Katalysatoren zur Verfügung gestellt, von welchen nach Vorversuchen drei in Festbettexperimenten näher betrachtet wurden.

Die Hydroprocessing-Versuche wurden unter Variation der gängigen Prozessgrößen durchgeführt und deren Einfluss auf die petrochemischen Parameter untersucht. Die Siedekennwerte E70, E100 und E150 waren wie erwähnt von besonderem Interesse. Deren Verlauf ist in Abbildung 24 in Abhängigkeit der Benzinausbeute dargestellt. Die Benzinausbeute ist als der flüssige Produktmassenstrom bezogen auf den Feed-Massenstrom definiert.

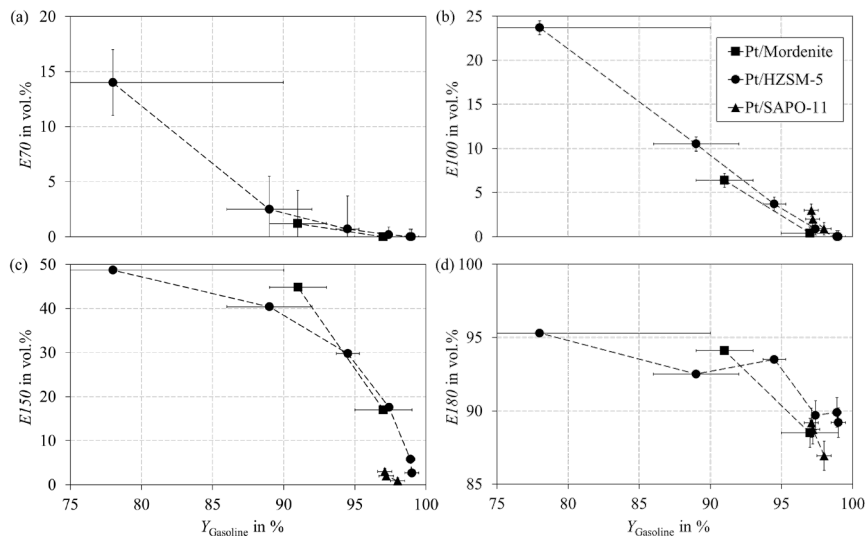


Abbildung 24: Siedekennwerte in Abhängigkeit der Benzinausbeute unter Variation der Temperatur. [21]

Für die vorgestellten Versuche wurde dieser durch die Variation der Reaktionstemperatur eingestellt. Besonders auffällig ist der sprunghafte Anstieg des E150 sowie die schnelle Zunahme des E100 für Pt/Mordenit und Pt/HZSM-5. Die Verläufe lassen sich anhand von Dealkylierungsreaktionen, wie über den besonders schnellen Paring-Mechanismus, erklären. Diese Reaktion kann für Aromaten ab zehn Kohlenstoffatomen (z. B. Duro) auftreten [22]. Die aus den C_9 und C_{10} Aromaten gebildeten Naphthene liegen durch die Dealkylierung nur teilweise unter einem Siedepunkt von $100\text{ }^\circ\text{C}$. Der verzögerte Anstieg des E70 kann auf sekundäre Ringöffnungsreaktionen der gebildeten Naphthene zurückgeführt werden. Für Pt/SAPO-11 wurden in den Versuchen kaum Cracking-Aktivitäten festgestellt. Das liegt an den deutlich engeren Poren, was ein Hineindiffundieren der großen C_9 und C_{10} Aromaten deutlich einschränkt.

Neben den Leicht siedern lag ein Hauptaugenmerk auf dem Aufrechterhalten der Oktanzahlen ROZ und MOZ. Abbildung 25 a) zeigt die Oktanzahlen in Abhängigkeit der Benzinausbeute, wobei diese wie für Abbildung 24 durch die Variation der Temperatur eingestellt wurde.

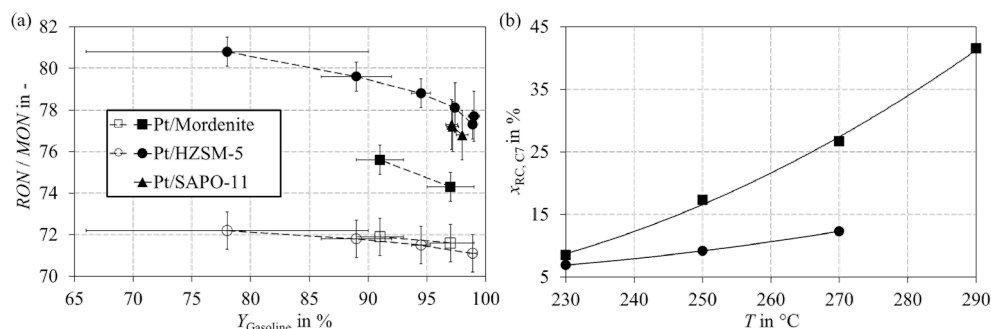


Abbildung 25: a) MOZ (schwarze Symbole) und ROZ (weiße Symbole) in Abhängigkeit der Benzinausbeute unter Variation der Temperatur und b) Ringschrumpfung der C7-Fraktion in Abhängigkeit der Reaktionstemperatur. [21]

Es ist eine deutliche Abhängigkeit der MOZ (schwarze Symbole) vom verwendeten Katalysator festzustellen. Da bei Benzinausbeuten >95% praktisch nur Naphthene vorliegen, können die beobachteten Abweichungen zwischen den Katalysatoren auf die selektive Isomerisierung von Naphthenen zurückgeführt werden. Die ROZ (weiße Symbole) zeigt eine deutlich weniger ausgeprägte Abhängigkeit. Im untersuchten Bereich sind die ROZ für die Katalysatoren praktisch deckungsgleich. Dies kann vermutlich auf die milderen Testbedingungen bei der ROZ-Messung zurückgeführt werden, bei welcher die Konfiguration und damit thermische Stabilität der Isomere weniger entscheidend ist. Für alle drei Katalysatoren ist eine Zunahme der ROZ und MOZ mit abnehmender Benzinausbeute (steigender Temperatur) zu erkennen. Um hier die Rolle der Ringschrumpfung weiter zu untersuchen, wurden in einem Batch-Reaktor ergänzende Versuche durchgeführt. Dafür wurden für die C₇-Naphthene alle Isomere auf einem Gaschromatographen identifiziert und kalibriert. Über Gleichung 1 lässt sich der Anteil der Isomere berechnen, bei welchen eine Ringschrumpfung von einem C₆ auf einen C₅-Ring stattgefunden hat.

$$x_{RC,C7} = \frac{\sum x_{\text{Dimethylcyclopentan-Isomere}} + x_{\text{Ethylcyclopentan}}}{\sum x_{C_7\text{-Naphthene}}} \quad (1)$$

Abbildung 25 b) zeigt, dass sowohl über Pt/Mordenit als auch Pt/HZSM-5 die Ringschrumpfung mit steigender Temperatur zunimmt. Ein Zusammenhang der MOZ mit der Ringschrumpfung ist aus diesem Grund naheliegend. Für Pt/SAPO-11 wurde im betrachteten Bereich keine Ringschrumpfung festgestellt, was auf Diffusionslimitierungen zurückzuführen ist.

Auf Basis der Resultate konnte der Pt/HZSM-5 als geeigneter Katalysator für das Upgrading identifiziert werden. Im Rahmen von reFuels wurde bei einem Dienstleister eine Technikumsanlage mit Pt/HZSM-5 beladen und etwa 100 L Schwerbenzin aufbereitet. Dieses wurde im Weiteren genutzt, um einen Blend für Motorversuche bei Partnern im Projektkonsortium bereitzustellen.

Blending zu normgerechten Kraftstoffen

Um einen geeigneten Blend zu ermitteln, wurden entsprechende Versuche durchgeführt. Dabei war entscheidend, die Vorgaben der DIN EN 228 zu erfüllen. Gleichzeitig war es wichtig, die Komponenten so zu wählen, dass die zu erwarteten Rußbildungstendenzen so weit wie möglich reduziert werden. Die Ergebnisse zum Blending wurden 2022 auf dem 43. Internationalen Wiener Motorensymposium 2022 vom Projektpartner Porsche vorgestellt [23]. Ergänzend sind in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) Motorenversuche und eine darauf basierende Veröffentlichung geplant.

Bei Blend-Versuchen des Leichtbenzins mit dem aufbereiteten Schwerbenzin stellte sich heraus, dass weitere Stoffströme erforderlich sind, um einen normgerechten Kraftstoff bereitzustellen (vergl. bioliq®-Blend in Abbildung 26).

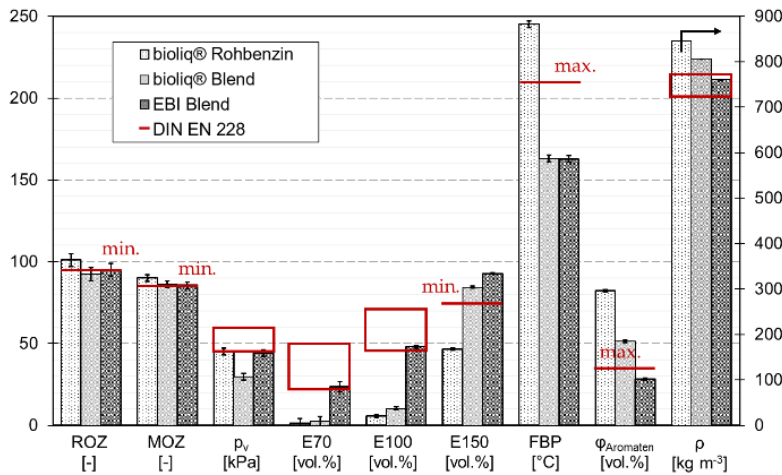


Abbildung 26: bioliq® Rohbenzin (weiß gepunktet), bioliq®-Blend (grau gepunktet) und EBI-Blend (schwarz gepunktet) im Vergleich zur DIN EN 228

Die Siedekennwerte fallen verglichen mit der Norm DIN EN 228 weiterhin deutlich zu niedrig aus. Ein großer Fortschritt zeigte sich beim niedrigeren Aromatengehalt, wodurch die Eignung des bioliq®-Produkts als Drop-in Kraftstoff steigt. Um die petrochemischen Eigenschaften weiter zu verbessern, bieten sich Oxygenate an, welche heutzutage hauptsächlich in Form von Ethanol beigemischt werden. Ethanol hat den Nachteil, dass es nur bis maximal 10 Vol.% beigegeben werden darf, zudem ist die Siedetemperatur mit etwa 79 °C relativ hoch. Besser geeignet sind Ether wie Methyl-tert.-Butylether (MTBE) oder Ethyl-tert-Butylether (ETBE) mit Siedepunkten unter 70 °C und deutlich höheren Beimischquoten von bis zu 22 Vol.% nach DIN EN 228. Ein großer Vorteil von Ethern besteht zudem in dem sehr sauberen Verbrennungsverhalten [24]. Neben Oxygenaten können die Ströme des FT-Prozesses betrachtet werden. Dort fällt neben Diesel und Kerosin auch Wachs als Nebenprodukt an. Dieses kann wie das Schwerbenzin einem Hydrocracking zugeführt werden. Der Vorteil ist, dass durch die simultane Isomerisierung beim Hydrocracking eine hohe Ausbeute an iso-Paraffinen erhalten wird, welche zufriedenstellende Oktanzahlen aufweisen. Besonders hervorzuheben ist das Paraffine bei der motorischen Verbrennung deutlich weniger Partikelemissionen als Aromaten oder andere ungesättigte Kohlenwasserstoffe erzeugen [25]. Unter Berücksichtigung aller Stoffströme wurden weitere Blending-Versuche durchgeführt. Abbildung 26 (EBI-Blend) zeigt, dass es unter Berücksichtigung der genannten Stoffströme möglich war, einen Kraftstoff mit potenziell über 85% erneuerbarem Anteil herzustellen. Der darin enthaltene fossile Anteil stammt aus dem für die Synthese von MTBE bzw. ETBE benötigten iso-Buten. Dieses könnte allerdings durch einen methanol-to-olefins Prozess ebenfalls erneuerbar über die Methanol-Route synthetisiert werden. So zeigte z. B. der NaH-Y Zeolith in der Studie von Langner eine sehr hohe iso-C₄ Selektivität [26]. Im Rahmen von reFuels wurden etwa 450 L dieses Kraftstoffs unter der Bezeichnung POSYN-LF-11 an den Projektpartner Porsche bereitgestellt. In umfangreichen Motortests zeigte sich, dass mit dem ersten Blend bereits die Leistungskennwerte von konventionellem Super-Benzin erreicht werden konnten.

Modellentwicklung zum YSI

Bei Motorversuchen bei Porsche und ExxonMobil zeigte der YSI eine gute Korrelation mit den vom Motor emittierten Partikeln, was den YSI ideal für die Entwicklung umweltfreundlicher Kraftstoffen mit geringer Rußbildungstendenz macht [27]. Die Standardmessmethode für den YSI ist ein aufwendiger experimenteller Aufbau mit einem für diesen Zweck konstruierten Yale Co-Flow Brenner sowie der zugehörigen optischen Messtechnik [28]. Im Rahmen von reFuels wurde nach einer Methode gesucht, den YSI mit weniger Aufwand und dennoch präzise zu messen. Zunächst wurden deshalb die Haupteinflussfaktoren auf den YSI ermittelt. Einen entscheidenden Einfluss hat die Stoffgruppe, z. B. erzeugen Aromaten deutlich mehr Partikelemissionen als Paraffine [13]. Die Rußbildungstendenz hängt außerdem besonders stark von der Molekülgröße, aber in ähnlichem Maße auch der -konfiguration ab [29, 15]. Erwartungsgemäß spielt die Konzentration der einzelnen Stoffe eine wichtige Rolle. Komplexer wird es bei der Zumischung von Oxygenaten. Diese weisen verhältnismäßig niedrigere Rußbildungstendenzen als vergleichbare Kohlenwasserstoffe auf. Beim Blending entstehen somit gewisse Verdünnungseffekte, welche die Rußbildungstendenzen verringern. Neben einer Verdünnung (welche grundsätzlich auf alle Stoffe zutrifft) kommt es bei Oxygenaten allerdings auch zu sogenannten chemischen Effekten. Der in den Molekülen gebundene Sauerstoff nimmt je nach funktioneller Gruppe an der Reaktion teil und mindert die Rußbildung [24]. Dieser Effekt ist nicht linear. Ein Modell muss somit in der Lage sein, diese Nichtlinearitäten abzubilden. Für diese Aufgabe wurde im Rahmen von reFuels ein künstliches neuronales Netz (KNN) trainiert. Die Datengrundlage bestand aus Infrarotspektren, welche die oben beschriebenen Effekte als Information enthalten. Das KNN ist in der Lage, diese Muster zu erkennen und mit entsprechenden YSI zu verknüpfen. Um das KNN zu trainieren, wurden etwa 360 Proben unterschiedlicher Zusammensetzung hergestellt und die gemessenen Spektren in das KNN eingespeist. Abbildung 27 zeigt den erhaltenen Paritätsplot, in welchem die Referenz- gegen die Modelldaten aufgetragen sind.

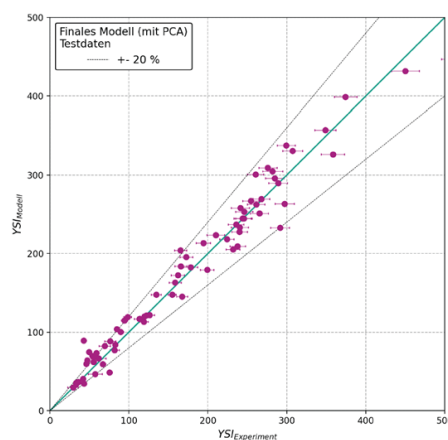


Abbildung 27: Durch das Modell vorhergesagte YSI aufgetragen über den Erwartungswerten für das Testdatenset.

Mit dem KNN war es möglich, den YSI mit geringem messtechnischem Aufwand mit einem Fehler von 11% vorherzusagen. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde unter dem Aktenzeichen 102022206362.7 ein Patent angemeldet. Der Patentschrift können weitere Informationen entnommen werden.

4.2.2.4 Ausblick

Zukünftig soll vor allem die Rußbildungstendenz des Kraftstoffs weiter optimiert werden. Die genauere Betrachtung von Oxygenaten mit ihrem rußmindernden Potenzial ist hier vielversprechend. In diesem Zusammenhang wird das YSI-Modell weiterentwickelt, um einen noch breiteren Gültigkeitsbereich bei gesteigerter Präzision zu erreichen. Des Weiteren wird als Teil des Hydroprocessings die Ringöffnungsreaktion weiter untersucht. Im aufbereiteten Schwerbenzin enthaltene Naphthene sollen so in Paraffine umgewandelt werden.

4.2.3 Herstellung von Dieselmotorkraftstoffen

Haas-Santo, Katja; Dittmeyer, Roland (IMVT)

Dieselmotorkraftstoff wurde im Rahmen des reFuels-Projektes in Form von e-Fuels betrachtet und hergestellt. Eines der vielversprechendsten Verfahren für diese Power-to-Liquid (PtL)-Prozessen zur Herstellung von normkonformen Kraftstoffen wie Diesel oder Kerosin ist die Fischer-Tropsch (FT)-Synthese. Die FT-Synthese mit Kohle oder Erdgas als Ausgangsstoffen ist seit langem für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe bekannt und entsprechen der EN15940 im Falle von paraffinischem Diesel; in Beimischung von bis zu 50 % sind sie nach ASTM D 7566 4 als synthetisches Kerosin zugelassen.

Die Abwesenheit von aromatischen Verbindungen in den FT-Produkten, die derzeit den Grenzwert für die Beimischung zur Substitution von fossilem Flugturbinenkraftstoff vorgibt, ermöglicht eine erhebliche Verringerung der Partikelemissionen bei der Verbrennung und damit eine Verringerung des durch die Verbrennung von Partikeln verursachten Klimaaeffekts. Auch Schwefelverbindungen sind nicht im FT-Produkt enthalten.

4.2.3.1 Synthese von Dieselmotorkraftstoffen im EnergyLab2.0

Die Bereitstellung des erneuerbaren Dieselmotorkraftstoffs baut auf der am KIT existierenden Prozesskette zu Umsetzung von Synthesegas zu länger-kettigen Kohlenwasserstoffen nach dem FT-Verfahren auf. Dabei wird Wasserstoff aus erneuerbaren Energien über eine Wasserelektrolyse zusammen mit Kohlendioxid zur Herstellung langkettiger Kohlenwasserstoffe verwendet, die mit bekannter Raffinerietechnik in spezifikationsgerechten, synthetischen Kraftstoff umgewandelt werden können.

Die Prozesskette ist in Abbildung 35 dargestellt: Wasserstoff wird durch Elektrolyse aus Wasser gewonnen, der notwendige Kohlenstoff mittels Direct AirCapture (DAC) aus der Luft entnommen, beide Edukte werden mittels der umgekehrten Wasser-Gas-Shift Reaktion (RWGS) in Synthesegas umgewandelt, welches das Ausgangsprodukt für die anschließende FT Synthese ist.

Bei der FT-Synthese wird eine Mischung aus verschiedenen langkettigen Kohlenwasserstoffen erhalten, diese liegen in flüssiger Form (Ölfraction, FT-Crude) und als festes Wachs vor. Das FT-Crude muss anschließend in einem weiteren Prozessschritt zu der gewünschten Produktqualität aufgearbeitet werden, im Falle des reFuels-Projektes zu Dieselmotorkraftstoff. Die Integration der einzelnen Prozessschritte mit der Verknüpfung der verschiedenen Energie- und Stoffströme ist im Projekt „reFuels – Kraftstoffe neu denken“ erfolgt.

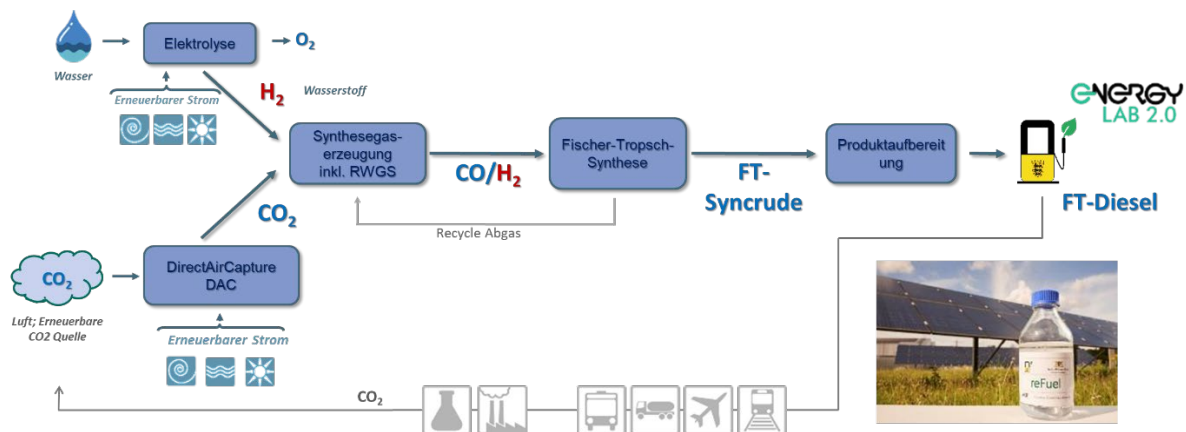


Abbildung 28: Prozesskette zur Herstellung von Dieselmotorkraftstoffen mittels der Fischer-Tropsch-Synthese.

Die Prozesskette zur FT-Synthese im Pilotmaßstab ist Teil des Anlagenverbundes im Energy Lab 2.0 des KIT, einem Großprojekt der Helmholtz Gemeinschaft, integriert (Abbildung 36). Der benötigte Wasserstoff wird

mittels einer PEM Elektrolyse (Siemens AG) erzeugt, Kohlendioxid kann durch eine DAC (Climeworks) aus der Umgebungsluft entnommen werden. Zusätzlich können beide Eduktgase auch aus Tanks in die Prozesskette eingespeist werden.

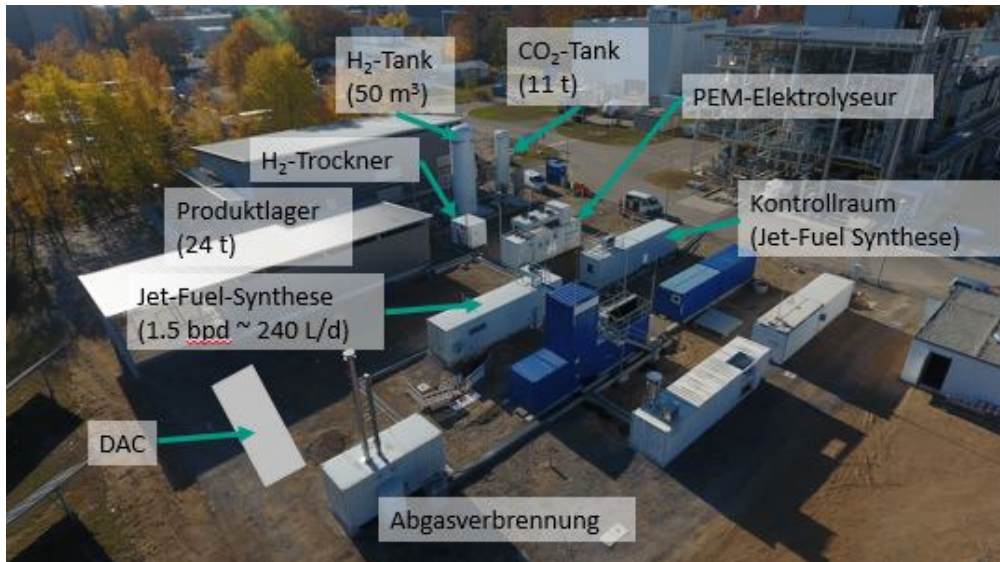


Abbildung 29: Aufbau des Anlagenverbundes für die Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung von Diesel (Bild: KIT-PPQ)

In Abbildung 30 ist der Container, welche RWGS-Reaktion und die FT-Synthese enthält gezeigt, dieser wurde von der Firma Ineratec GmbH gebaut. Der Aufbau des Synthesereaktors besteht aus dünnen Metallplatten, in die kleine Strukturen im Millimeterbereich eingelassen sind. Diese haben einerseits die Funktion den Katalysator in Form eines Festbetts mit dem Synthesegas unter optimierten Strömungsbedingungen in Kontakt zu bringen und andererseits die Reaktionswärme in eine Wärmeträgermedium abzuleiten. Diese Reaktoren wurden am KIT-IMVT entwickelt und von Ineratec GmbH zur Marktreife geführt.



Abbildung 30: Synthese-Container zur Herstellung von Fischer-Tropsch-Kraftstoffen aus CO₂ und Wasserstoff am EnergyLab 2.0 (Bild: Ineratec GmbH)

Im Rahmen des reFuels-Projekts wurde eine Versuchskampagne durchgeführt, bei der Kohlenmonoxid aus einem Tank zudosiert wurde, da der RWGS-Reaktor zu diesem Zeitpunkt noch nicht verfügbar war. Aus dieser Kampagne wurden ca. 70 Liter FT-Crude sowie Wachs erhalten. Die Aufarbeitung dieses FT-Crudes zu Diesel-

Kraftstoff wird im Folgenden dargestellt, zudem wurde das Produktspektrum in Hinsicht auf die Herstellung von Kerosin erweitert.

4.2.3.2 Aufarbeitung der Ölfraction aus der Fischer-Tropsch-Synthese zum Mitteldestillat (Diesel/Kerosin) und Bewertung der Kraftstoffqualität

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass einer Dieselmotorenqualität im Betrieb der FTS nicht unmittelbar erreichbar ist; eine Aufarbeitung des FT-Produkts durch Hydrotreatment ist notwendig. Zum einen wird die Ausbeute der flüssigen Fraktion aus der FT-Synthese erhöht, indem produziertes Wachs, bestehend aus langkettigen KW-Ketten, im Hydrocracker zu kurzkettigen KW gespalten wird. Des Weiteren werden die Eigenschaften des Kraftstoffes durch Hydrieren der gebildeten Alkene und Isomerisieren (Verzweigen) der unverzweigten n-Kohlenwasserstoffe in verzweigte iso-KW verbessert. Beide Prozesse sind in der Petrochemie großtechnisch eingesetzte Prozesse, deren Prozessbedingungen auf die Aufarbeitung des FT-Crudes aus der dezentralen Herstellung angepasst wurden.

Ausgehend vom FT-Crude-Zwischenprodukt wurden die wichtigen Verfahrensschritte Hydrocracking, Hydrierung und Isomerisierung, die für die erfolgreiche Herstellung eines Dieselmotorenkraftstoffes wichtig sind, im Technikum des IMVT aufgebaut. Die anschließend notwendige Destillation zur Auftrennung der Produktfraktionen wurden durch größere Vorversuche im Maßstab 10 – 50 Liter bei ASG Analytik-Service Gesellschaft und der Firma Coryton Advanced Fuels Ltd vorgenommen. Diese Arbeiten dienen zum einen der Bereitstellung von Mitteldestillat (Diesel und Kerosin), für weitere Qualitätsprüfungen und Performancetests am IKFM, zum anderen bilden diese Arbeiten zur Destillation eine wertvolle Grundlage für die Planung einer eigenen Destillationsanlage im Pilotmaßstab.

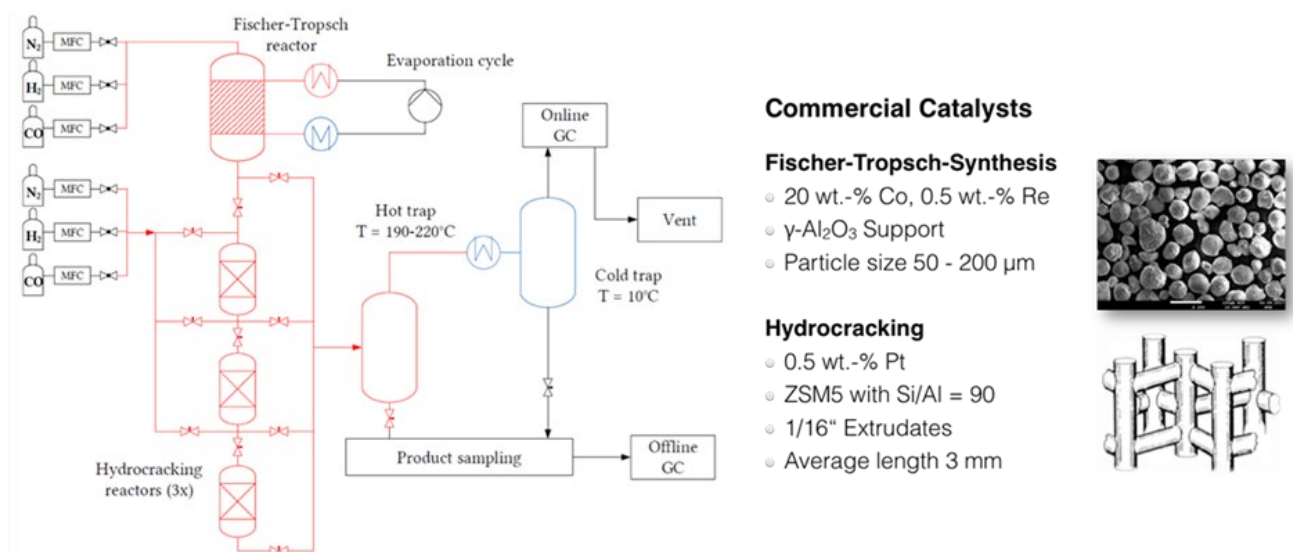


Abbildung 31: Technikumsanlage für die Fischer-Tropsch-Synthese in Kombination mit Hydrocracking-Reaktoren.

In Abbildung 32 sind beispielhaft Ergebnisse des Hydrocrackens der Wachsfraktion mit einem kommerziellen Katalysator dargestellt: die Selektivitäten zu den flüssigen Kohlenwasserstofffraktionen C₁₀₋₁₄ und C₁₅₋₂₂ steigen mit zunehmendem Wachsumsatz C₂₂₊ und tragen zu Erhöhung der Ausbeute der flüssigen Fraktionen bei.

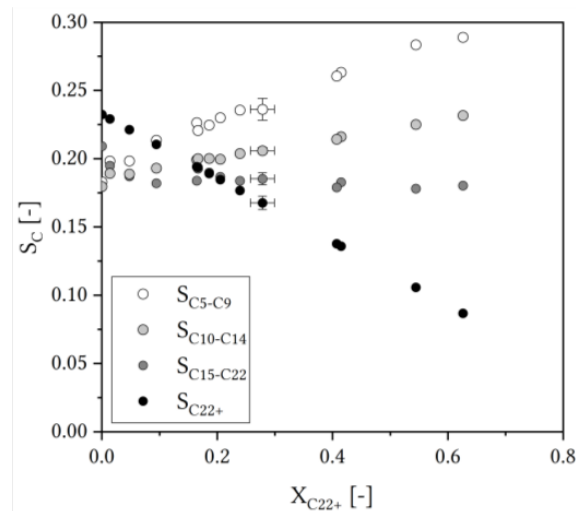


Abbildung 32: Integrale kohlenstoffnormierte Produktselektivitäten der flüssigen bzw. festen Produktfraktionen des Gesamtprozesses für verschiedene Wachsumsätze X_{C22+} im Hydrocracker bei konstantem FT-Zulauf.

Im Technikum des IMVT wurde zudem eine Hydrieranlage zur Hydrier- und Isomerisierung von Alkenen und n-Alkanen erfolgreich in Betrieb genommen. Die Versuche wurden primär mit dem Ziel durchgeführt, vor der abschließenden Destillation aussichtsreiche Diesel- und Kerosin-komponenten zu erzeugen. Das Verfahren und die gewählten Prozessparameter sorgten von Beginn an für eine gute Hydrieraktivität; es wurde eine ausreichende Reduzierung der Alkene und Alkohole im Produktgemisch erreicht. Der Isomerisierungsgrad war bei dem derzeit ausgewählten Katalysator im verwendeten Temperaturbereich von 220 – 260 °C zunächst zu tief; der angestrebte Anteil iso-Alkane von > 30 % zur Erfüllung der Tieftemperaturanforderungen wurde nicht erreicht. Erst durch Verfahrensoptimierung, speziell einer Erhöhung der Verfahrenstemperatur auf 290 – 300 °C, konnte der anvisierte iso-Alkananteil erreicht werden (Abbildung 33).

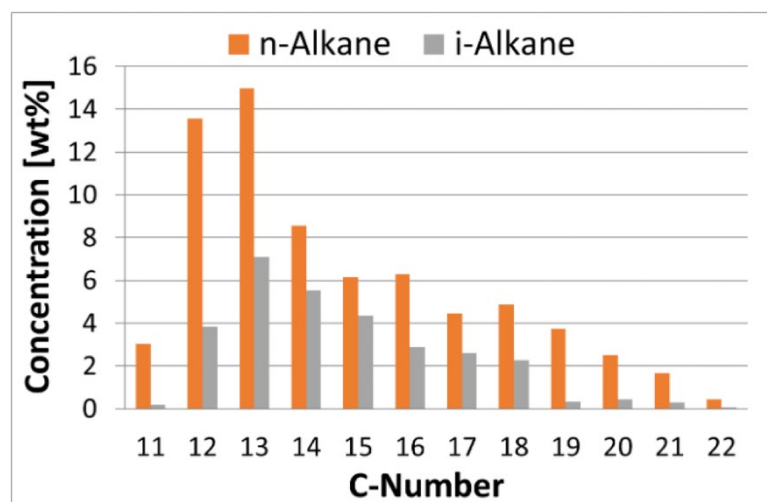


Abbildung 33: Verteilung der n- und iso-Alkane nach der hydrierenden Aufarbeitung.

Die Destillation stellt einen wichtigen finalen Schritt im Produktionsablauf zur Herstellung einer der gewünschten Diesel oder Kerosin-Kraftstoffkomponente dar. Dazu wurden die bei ASG Analytik-Service Gesellschaft initiierten Labor- und Technikumsarbeiten fortgeführt. Nach Aufarbeitung des FT-Crudes aus der Produktionskampagne im EnergyLab 2.0 durch Hydrocracken/Isomerisierung und Hydrierung wurde eine Destillation zur Fraktionierung des flüssigen Produkts durchgeführt. Es konnte im Destillationsbereich von 205–360 °C eine für die Dieselfraktion typische Kettenlänge erzielt werden; in der Probe sind n-iso and n-Alkane, aber keine Cycloalkane vorhanden. In der vorliegenden Form erfüllt die Probe die Norm DIN EN 15940



basierend auf Zündfähigkeit und Dichte (Class A Fuel). Mit dem relativ hohen Flammpunkt und einem engen Siedebereich entspricht die Probe aktuell einem Sommerdiesel. Die Dieselfraktion wurde am IFKM des KIT in Cluster B getestet.

Es wurden auch Destillationsversuche zur Herstellung von Kerosin durchgeführt. Der zunächst festgelegte Destillationsbereich von 150 – 285 °C erwies sich als zu breit: der Gefrierpunkt gemäß Kraftstoffspezifikation lag zu hoch, obwohl der Anteil der iso-Alkane bereits ca. 40 % betrug. Engere Destillationsgrenzen von 150 – 220 °C führten dann zu einem deutlich verbesserten Gefrierpunkt von unter -40 °C. Nach weiterer Optimierung wurde ein Bereich von 165 – 205 °C für die destillative Aufarbeitung einer größeren Menge herangezogen und erfolgreich umgesetzt. Die Ergebnisse der ersten kompletten Analyse einer destillierten Kerosinkomponente wurden gemäß ASTM D7566 bewertet. Es wurden alle geforderten Spezifikationswerte erreicht, mit Ausnahme des sog. T90 – T10 der Destillationskurve. Der nach ASTM D7566 geforderte Wert für T90 – T10 von mindestens 22 °C wurde mit 17,3 °C verfehlt. Das heißt, dass die Destillationskurve für die fertige FT-Komponente etwas zu flach verläuft. Für die zukünftige Produktaufarbeitung wurde daher leicht erweiterte Destillationsgrenzen festgelegt. Eine weitere Steigerung des Isomerisierungsgrades hin zu einem noch höheren Anteil verzweigter Komponenten würde die Flexibilität bei der abschließenden Destillation zusätzlich erhöhen.

Um die Produktdestillation in Zukunft weiter optimieren zu können, wird eine Vakuumdestillation mit Kapazität von ca. 1 l/h, für kleine Chargen von synthetischen Ölen am IMVT im Technikumsmaßstab aufgebaut (Abbildung 34). Dies geschieht insbesondere für die Charakterisierung mit Blick auf Drop-in-Kraftstoffqualitäten und Anwendungstests.



Abbildung 34: Vakuumdestillationsanlage für kleine Chargen im Technikum des IMVT.

4.2.3.3 Zusammenfassung

Die Hydrotreatment-Anlage des Energy Lab 2.0, wird durch Hydrocracken, Isomerisieren und Hydrieren die Kraftstoffqualität aller FT-Fraktionen im Hinblick auf die Herstellung von Dieselmotorkraftstoff und Kerosin verbessern und zu normgerechten Produkten führen. Dazu musste ein Re-Engineering des FT-Produktaufarbeitungsmoduls wegen einer Kapazitätserhöhung der PtL-Anlage im Energy Lab 2.0 durchgeführt werden. Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus diesem Projekt sowie unter Einbeziehung der Ergebnisse aus den Projekten ‚Kopernikus P2X‘ und ‚PowerFuel‘ konnte die Strategie zur Herstellung von Dieselmotorkraftstoffen nach EN 15490 und drop-in Kerosin gemäß ASTM D 7566 anhand von Labormustern von einigen zehn Litern im Wesentlichen ausgearbeitet werden. Die im Technikum durchgeführte Parameterstudie wird als erster Ansatz auch auf die hochskalierte Anlage übertragen. Für den Aufbau der gesamten Prozesskette aus Synthese im vorhanden FT-Container und dem Aufbau der Aufarbeitung im Pilotmaßstab ist es notwendig auf den bisherigen FT-Synthese-Container einen zweiten 40-Fuß-Container aufzusetzen. Die Konfiguration der Anlage musste durch eine Überprüfung der Dimensionierung der Wärmetauscher vor den Produktabscheidern angepasst werden. Zusätzliche wurde eine Option für die Gas-Rückführung in die Synthesegaserzeugung durch Co-Elektrolyse eingeplant. Die Container-Anlage für die hydrierende Aufarbeitung des FT-Crude ist derzeit im Aufbau.



Mit der erweiterten, neu konfigurierten Anlage sowie der integrierten Prozessaufarbeitung durch das Hydrotreatment können unterschiedliche Prozessbedingungen zur Herstellung unterschiedlicher Produktqualitäten untersucht und optimiert werden.

4.3 Cluster A3: Konzeptstudie für eine Demoanlage zur Raffinerie-integrierten Herstellung von reFuels

Dahmen, Nicolaus (IKFT)

4.3.1 Entwicklung des Anlagenkonzeptes

In diesem Arbeitspaket wurde das technische Konzept einer Raffinerie-integrierten Demonstrationsanlage entwickelt und bewertet. In enger Abstimmung mit MiRO wurden die dafür relevanten Rahmenbedingungen festgelegt, die in Form eines Teilnehmerwettbewerbs vom KIT ausgeschrieben wurden. Die wesentlichen Eckpunkte waren:

- Die Betrachtung eines kompletten Power-to-Liquid-Prozesses inklusive der Wasserstoffherstellung am Standort der MiRO.
- Die Nutzung des am Fluid Catalyzed Cracker anfallenden CO₂, das zu diesem Zweck abzutrennen und aufzubereiten war. Einsatz einer PEM-Elektrolyse für die Wasserstoffherzeugung
- Eine Produktionskapazität von rund 50.000 t Flüssigprodukt pro Jahr.
- Zielprodukte waren im Hauptauftrag vorrangig normgerechte Dieselmotorkraftstoffe (DIN EN 15940) über einen Fischer-Tropsch-Prozess. In einem Nachauftrag wurde das Konzept unter Einführung eines iso-Crackers auf die Herstellung von normgerechtem Kerosin (ASTM 7566) als Hauptprodukt umgestellt.
- Nebenprodukte, stofflich und energetisch, waren in der Raffinerie zu nutzen.

Aufgabenstellung des Auftrags war jeweils die Erstellung eines technischen Anlagenkonzeptes, auf dessen Basis die Energie- und Massenbilanzen verschiedener Prozessvarianten ermittelt werden sollten. Der Auftrag wurde an EDL Pörner vergeben, die in der weiteren Bearbeitung Linde AG als Lizenzgeber mit eingebunden haben. Zur Regelung der Zusammenarbeit zwischen KIT und MiRO wurde für die Laufzeit des Auftrags ein entsprechender Kooperationsvertrag vereinbart. Die auf der technischen Studie basierende Schätzung der Herstellungskosten und Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit wurden von MiRO in Zusammenarbeit mit KIT-IIP vorgenommen.

Im Rahmen des Auftrags und in sehr guter Zusammenarbeit erfolgte die weitere Präzisierung des technischen Konzepts, seiner zu betrachtenden Varianten und Optimierungsparameter, die im Basis-of-Design (BoD) fixiert wurden. Als „robuste“, derzeit durch entsprechende Lizenzen verfügbare Technologie wurde der Weg über die Methanisierung des CO₂ mit Wasserstoff und eine anschließende Reformierung des Methans im DryReforming-Prozess zu Synthesegas gewählt. Hierfür war eine entsprechende gute Detailtiefe für das Prozessdesign verfügbar. Für die Wasserstoffherzeugung sollte eine PEM-Elektrolyse mit einer Leistung von max. 100 MW zum Einsatz kommen. Die beiden Prozesskonzepte zu Diesel bzw. Kerosin als Hauptprodukt sind in Abbildung 35 und Abbildung 36 gezeigt. Mit Technology Readiness Level < 6 wurden auch fortschrittliche Konzepte mit „innovativer“ Technologie bzgl. der Massen- und Energiebilanzen untersucht. Dies war einerseits die Einführung des RWGS-Reaktors zur direkten Umsetzung von CO₂ und H₂ zu CO sowie eine Co-Elektrolyse von CO₂ und H₂O (Co-SOEC). Die Optimierung der Anlagenkonzepte hatte die Maximierung der FTS-Zielproduktausbeute sowie die Optimierung des Energie- und Stoffstrommanagement im Anlagenverbund mit der Raffinerie zum Ziel.

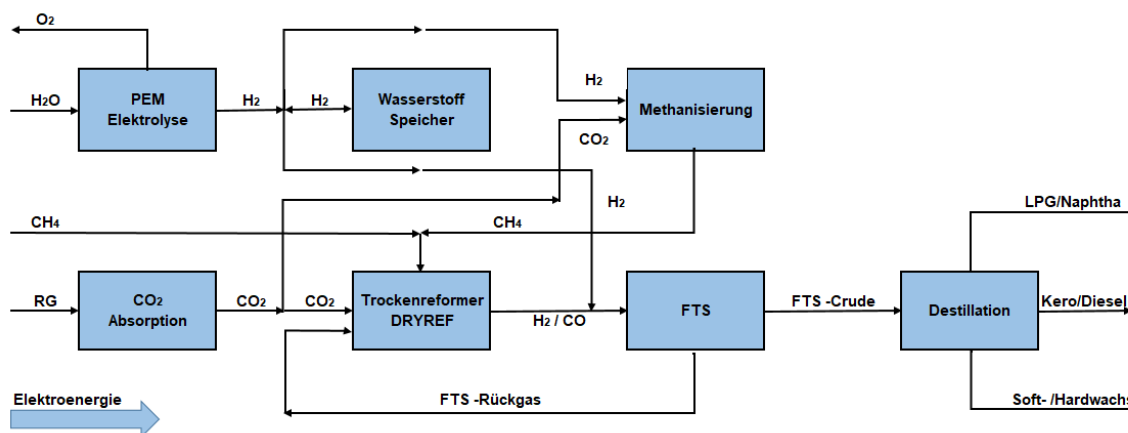


Abbildung 35: Schema des Konzepts zur Diesel-Herstellung

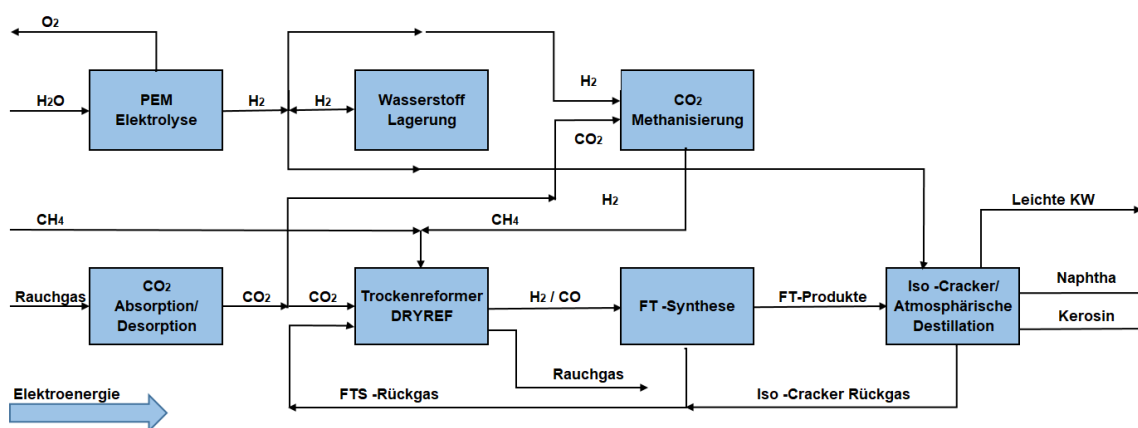


Abbildung 36: Schema des Konzepts zur Kerosin-Herstellung

4.3.2 Variantenvergleich der Massen- und Energiebilanzen

Bei der Erstellung der Massen- und Energiebilanzen wurden vier Varianten mit vergleichsweise hoher Detailtiefe betrachtet:

- Basisfall mit 45.000 t/a FT-Produkt und voller Elektrolyse-Leistung mit ca. 50% externer Methaneinspeisung
- Variante 2: Turndown auf 20.400 t/a ohne externe Methaneinspeisung
- Variante 3: 50.000 t/a mit max. Methaneinspeisung, ca. 80% Elektrolyse-Leistung
- Variante 4: Turndown auf 20.400 t/a mit 100 h Wasserstoffspeicherung,

Ergänzend wurde die technischen Varianten mit RWGS und Co-SOEC als Variante 5 und 6 mit geringerer technischer Detailtiefe hinzugenommen. In der folgenden Abbildung 37a)-d) werden diese verschiedenen Varianten bezüglich einiger wichtiger Parameter jeweils für die Herstellung von Dieselkraftstoff und Flugkraftstoff miteinander verglichen. Der Technologievergleich mit Variante 5 und 6 wurde nur für die Dieselherstellung vorgenommen; sie sind ohne Verwendung von zusätzlichem Methan und ohne H₂-Speicherung direkt nur mit Variante 2 vergleichbar.

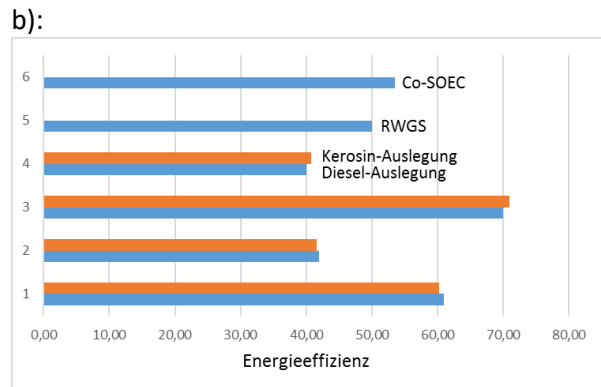
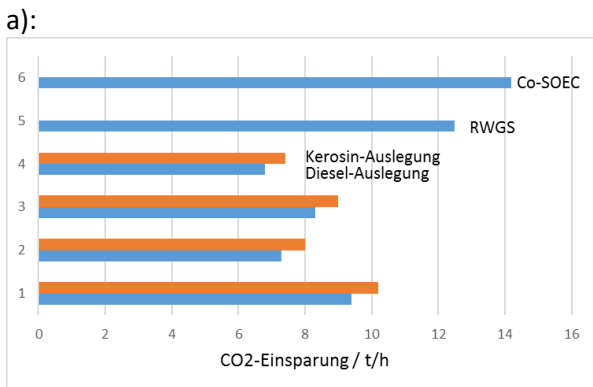
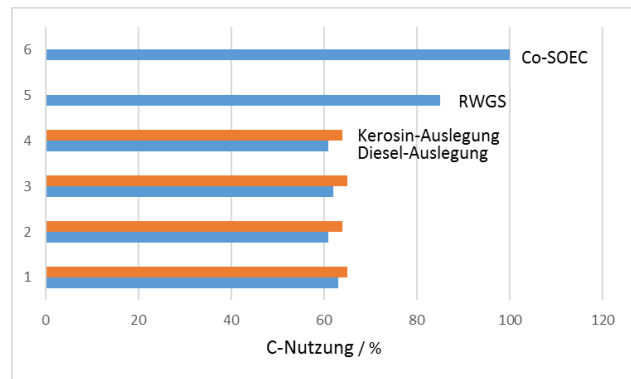
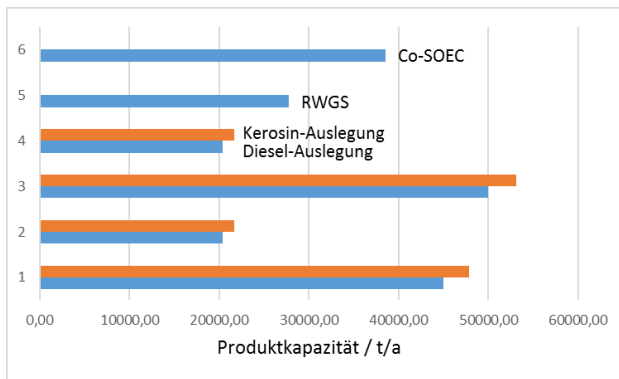


Abbildung 37: Variantenvergleich zur Produktionskapazität (a), Kohlenstoffausnutzung (b), CO₂-Einsparungspotenzial (c) und Energieeffizienz (d). Von unten nach oben: Basisfall 1, Varianten 2-4 jeweils für Diesel und Kerosin (blau bzw. orange) sowie die technische Variante 5 und 6 mit RWGS bzw. Co-SOEC für Diesel (blau).

Aus dem Variantenvergleich lassen sich einige grundsätzliche und interessante Resultate ableiten.

Die Kerosin-Auslegung führt bis auf die Energieeffizienz jeweils zu einer um einige Prozentpunkte höheren Werten der Produktkapazität, C-Ausbeute und der CO₂-Einsparung.

Die Produktionskapazität ist für den Fall einer zusätzlichen Einspeisung von bevorzugt erneuerbarem Methan etwa doppelt so hoch (für den Fall einer H₂-Speicherung entsprechend ca. 10 %-Punkte niedriger) als für die Turndown-Fälle auf 60% Kapazität, die ohne eine solche Einspeisung auskommt. Variante 2 dient daher als Vergleichsfall für die ebenfalls ohne Methaneinspeisung laufenden Varianten 5 und 6 mit RWGS bzw. Co-SOEC.

Bzgl. der Kohlenstoff-Nutzungsgrades finden sich mit 62% und 64% für Diesel bzw. Kerosin praktisch keine Unterschiede in den Varianten 1-4. Weiterer Kohlenstoff wird als Nebenprodukten stofflich oder energetisch in der Raffinerie verwendet. Im Technologievergleich zeigt sich deutlich das Innovationspotenzial der innovativen Technologien. Für alle ausgewählten Punkte sind Verbesserungen zu erwarten. Nach der Abschätzung hier würde sich die C-Nutzung durch RWGS und Co-SOEC auf 85% bzw. praktisch 100% erhöhen.

Im Hinblick auf die potenzielle CO₂-Einsparung finden sich mehr Unterschiede mit Werten zwischen knapp 7 und 10 t/h. Der verwendete Strom wurde als erneuerbar gezählt, zusätzlich eingespeistes Methan jedoch als fossiler Rohstoff angenommen. Für den Weg über die Methanisierung stellt der Basisfall mit reduzierter Produktionskapazität und vermindertem Methaneinsatz bei gleichzeitig voller PEM-Kapazität den besten Wert von 10,2 t/h. Bei der Verwendung etwa von Biogas würde sich die Bilanz entsprechend verbessern lassen.



RWGS und Co-SOEC versprechen wiederum verbesserte Werte von 12,5 bzw. 14,2 t/h. Diese sind mit der Variante 2 ohne Methaneinspeisung direkt vergleichbar, der 7,3 t/h CO₂-Reduktionspotenzial aufweist.

Bei der Betrachtung der Energieeffizienz ist erkennbar, dass diese bei Verwendung eines chemischen Energieträgers am höchsten ist. So zeigen die Fälle mit Methaneinspeisung Werte von rund 70%, während die Turndown-Varianten bei etwa 40% liegen. Im Vergleich dazu verbessern RWGS und Co-SOEC die Werte auf 50-55%.

Bereits die Variabilität dieser Parameter zeigt, wie empfindlich die Massen- und Energiebilanzen vom gewählten Prozesskonzept und seiner Betriebsweise abhängen. Dies gilt umso mehr, wenn ein flexibler Anlagenbetrieb vorgesehen ist, bei dem in Turndown-Phasen mit ungünstigeren Werten diverser Parameter zu rechnen ist. Es ist aber eindeutig auch das technische Potenzial erkennbar, dass mit der Entwicklung neuer Technologien verbunden ist.

Für den Basis- und den Turndown-Fall auf 60% der Produktionskapazität wurden in Zusammenarbeit von EDL und MiRO die Apparate-, Investitions- und Betriebskosten abgeschätzt und mit KIT-IIP die Wirtschaftlichkeit des Prozesses untersucht. In Abbildung 38 findet sich die Skalierung der Herstellkosten in EUR je Liter Kraftstoff mit der Produktionskapazität. Erwartungsgemäß liegen die Kosten für den Turndown-Fall um etwa den Faktor der Kapazitätsverringerung höher. Interessant ist zu sehen, dass der Auslegungsfall der Basisvariante (graues Kreuz) gerade am Beginn des abflachenden Teils der Kostenkurve liegt. Zumindest für die hier gewählte Technologie kann also gesagt werden, dass eine Demonstrationsanlage bei noch kleineren Produktionskapazitäten unverhältnismäßig hohe Herstellungskosten zur Folge hätte. Eine Demoanlage ist bereits in einem kommerziellen Umfeld aktiv, daher spielen Produktnutzung und -Gestehungskosten bereits eine große Rolle.

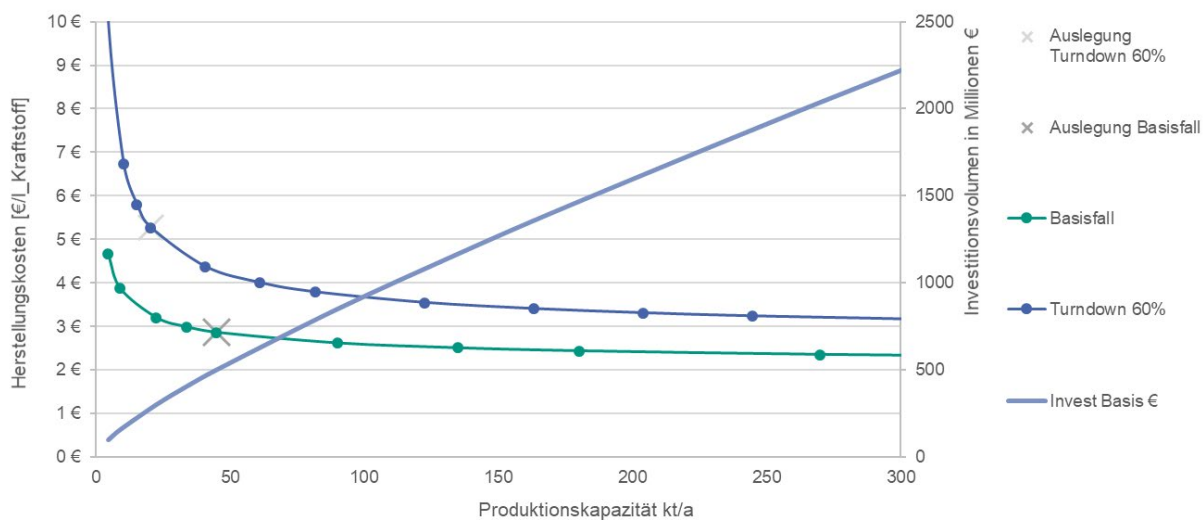


Abbildung 38: Degression der Herstellkosten mit der Produktionskapazität der Demoanlage

4.3.3 Ansätze zur Entwicklung von Raffinerien zur Erzeugung von reFuels

Kraftstoffe sind aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzt, die in der Mischung den gesetzten Normen, Verbrennungs- und Emissionseigenschaften genügen und zukünftig mit einem zunehmenden Grad als erneuerbare Kraftstoffe hergestellt werden müssen. Trotz intensiver Anstrengungen in Forschung und Entwicklung gelingt es bei der Anwendung der bekannten Prozessrouten zur Herstellung synthetischer



erneuerbarer Kraftstoffe bis heute nicht, die Kraftstoffe Benzin, Diesel, Kerosin, Schiffsdiesel selektiv über einen einzigen Prozessweg herzustellen. Es entstehen Nebenprodukte verschiedener Art, die in anderer Weise zu verarbeiten oder zu vermarkten sind. Ein Beispiel ist der im reFuels-Projekt hergestellte und erfolgreich getestete Blend mit >85% erneuerbaren Anteilen, die sich aus Leichtfraktion und hydrierter Schwerfraktion der MtG-Route, Kohlenwasserstoffen aus der Fischer-Tropsch-Synthese sowie MTBE und ETBE zusammensetzt. Die im letzten Kapitel vorgestellte Konzeptstudie für eine Raffinerie-integrierte Demoanlage zur Herstellung nachhaltiger Kraftstoffe zeigt exemplarisch, wie die verschiedenen Stoffströme in einer Raffinerie verschaltet werden können.

Raffinerien sind großchemische Anlagen, die auf einen kontinuierlichen Betrieb mit ebenso kontinuierlichen Stoffströmen ausgelegt sind. Die Einsatzstoffmenge und das Mengenverhältnis der draus erzeugten Produkte könne nur in bestimmten Grenzen variiert werden, die mit dem Design der Anlagen festgelegt wurden. Änderungen müssen deswegen diese Mengenauslegungen und mögliche Schnittstellen zwischen den verschiedenen Anlagen berücksichtigen.

Über den Mobilitätssektor hinaus beliefern Raffinerien weitere Sektoren mit Energieträgern (Haushalte und Gewerbe, Handel, Industrie) und Rohstoffen (Industrie, insbesondere die chemische Industrie). Auf dem Weg zu einer klimaneutralen Gesellschaft werden sich die Mengen für Raffinerieprodukte jedoch drastisch ändern. Die Studie Klimapfade für Deutschland [BDI2018] geht von einem Rückgang der Mineralölimporte nach Deutschland von 1250 TWh (104 Mio t/a) in 2015 auf 305 TWh (25 Mio t/a) in 2050 aus. Dies unter der Voraussetzung, dass die chemische Produktion weiterhin in Zukunft zu großen Teilen auf der Verarbeitung von Rohöl basiert [BDI2018]. Der Absatz von flüssigen Kraftstoffen in Deutschland geht nach dieser Studie von 586 TWh auf 244 TWh zurück, wobei diese in dem Szenario „95% Klimapfad“ vollständig auf Basis erneuerbarer Quellen erzeugt werden. Auch die Verteilung der Kraftstoffe wird sich deutlich verändern: während heute Kraftstoffe für den landgebundenen Verkehr 51 % des Mineralölabsatzes ausmachen, soll dieser Anteil in 2050 nur noch ca. 30 % betragen und damit genauso groß sein wie der Anteil an Kerosin und der Rohstoffe für die chemische Industrie. Diese Prognosen für das Jahr 2050 sind mit großen Unsicherheiten behaftet, was dazu führt, dass sowohl die absoluten Produktionsmengen der zukünftigen grünen Raffinerien als auch ihr Produktmix sehr stark von heutigen Prognosen abweichen können. Technische Konzepte für grüne Raffinerien müssen deshalb die Produzenten klimaneutraler Kraftstoffe in die Lage versetzen, vergleichsweise kurzfristig auf Veränderungen der Marktanforderungen reagieren zu können

Raffinerien mit ihren großen Verarbeitungskapazitäten werden in der Zukunft weiterhin einen wesentlichen Beitrag zur Versorgung des Energiesektors, der Wirtschaft und Konsumenten mit Energieträgern und chemischen Grundstoffen leisten können. Allerdings wird sich die chemische Grundlage zu nachhaltig erzeugbaren Molekül-Plattformen hin verändern. Dies können Methanol, Fischer-Tropsch-Flüssigprodukte, Pyrolyseöle und andere Stoffe sein. Während Methanol heute bereits in großen Mengen hergestellt, gehandelt und verarbeitet wird, sind FT-Produkte und Pyrolyseöle national bzw. regional erzeugte Produkte, für die eine Welthandelsstruktur noch nicht existiert. Neben der zuvor beschriebenen Konzeptstudie zur Herstellung von PtL-Kraftstoffen an einer Raffinerie wurde in einem separaten Auftrag des Verkehrsministeriums an die Firma CAC ein technisches Konzept entwickelt, in dem importiertes Methanol am Standort der MiRO zu Benzin bzw. zu Kerosin weiterverarbeitet wird.

Ein solches Szenario für eine modulare Demonstrationsanlage unter Import von Zwischenprodukten könnte aussehen wie in Abbildung 39 gezeigt. Bei deren Aufbau ist die Reihenfolge der Errichtung der Teilanlagen von Bedeutung. Die FT-Route ist zwar mit hohem TRL etabliert, aber weder erneuerbare Rohstoffe noch daraus hergestellte Zwischenprodukte sind am Markt verfügbar. Generell werden FT-Kohlenwasserstoffe heute nicht als Zwischenenergieträger erzeugt und gehandelt. Daher favorisiert der derzeitige regulatorische Rahmen die Herstellung Methanol-basierter Produkte. Stand-der-Technik ist hier die Herstellung von Benzin (MtG), die um

eine Herstellung von Mitteldestillaten (Diesel und Kerosin) über den Weg der Olefinsynthese (MtO) ergänzt werden muss. Letzte ist aber ebenfalls noch in der Entwicklung. Aus Gründen der Verfügbarkeit von FT-Produkten und des TRL bei der Olefin-to-Jet-Synthese (OtJ) stellt sich also die Frage nach der sinnvollen Abfolge des Aufbaus der geplanten Prozessmodule. Weitere, gezielte Synthese zu einzelnen Kraftstoffarten werden in Forschung und Entwicklung intensiv untersucht, bedürfen jedoch noch längerer Entwicklungszeiten.

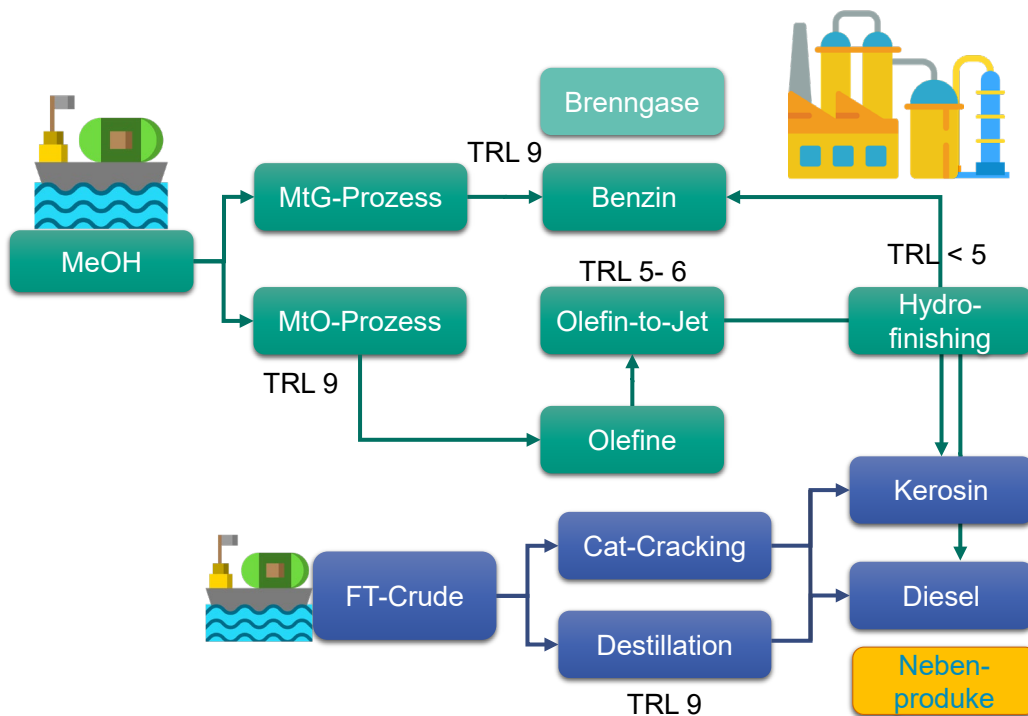


Abbildung 39: Modulares Demonstrationsanlagenkonzept für grüne Raffinerien zur Herstellung erneuerbarer Kraft- und Brennstoffe.



5 Cluster B: Motorische Anwendung der Kraftstoffe

Koch, Thomas; Wagner, Uwe; Weyhing, Thomas; Zabihigivi, Mitra (IFKM) mit Unterstützung der Firmen Audi (5.8.2); Bosch (5.3); Freudenberg (5.6.2); Ford (5.7.2+5.8.3), Mahle und Porsche(5.7.2).

Wie verhält sich der Kraftstoff im Motor? Gibt es Probleme bei der Anwendung für das Abgasnachbehandlungssystem? Müssen Motorparameter angepasst werden, um Vorteile dieser Kraftstoffe ausnutzen zu können oder eventuelle Nachteile auszugleichen? Dies sind einige der Fragenstellungen, die in diesem Cluster untersucht wurden. Dabei wurde die durchgängige Palette an verbrennungsmotorischen Untersuchungsmöglichkeiten ausgenutzt. Neben den thermodynamischen Grundlagen am Einzylinderforschungsaggregat wurden Vollmotorenuntersuchungen im Kälteprüfstand bis -20°C durchgeführt, um die Alltagstauglichkeit zu testen. Das Versuchsprogramm wurde durch RDE-Fahrten, also mit realen Fahrten auf der Straße mit einem portablen Abgasmesssystem zur Emissionsmessung abgerundet. Zum Einsatz kamen unterschiedlichste Motoren von verschiedenen Projektpartnern, um möglichst repräsentative Aussagen für die Bestandsfahrzeugflotte treffen zu können.

5.1 Kraftstoffanalyse

Verschiedene Benzin- und Dieselmotoren wurden im Rahmen des Projekts an Motoren, im Fahrzeug oder an Komponentenprüfständen untersucht. Folgend eine kurze Übersicht wesentlicher Eigenschaften der eingesetzten Kraftstoffe. Im Anhang befinden sich die dazugehörigen Kraftstoffanalysen, die von den diversen Kraftstoffen von Projektpartnern erstellt wurden.

5.1.1 Benzinkraftstoff

Für die Versuche am Motorenprüfstand und auch für die Messungen beim realen Betrieb auf der Straße wurde G40, G85 sowie das normale fossile Benzin E5 als Referenzbasis verwendet. E5, G40 und G85 erfüllen die Norm EN 228 (s.a. 4.2.1.2). Zusätzlich wurden verschiedene Produktionschargen aus der bioliq®-Anlage in Voruntersuchungen als Blend untersucht.

Tabelle 6 Eigenschaften untersuchter Benzinkraftstoffe

Kraftstoff	Siedende [°C]	Dichte [kg/m ³]	Verhältnis [% (V/V)]	RON
E5	197,1	747,4	4,8 % Ethanol	95,0
G40	180,1	751,8	10 % EtOH + 30 % bioliq® 2020 +60% fossiles Benzin	100,8
G85	173,7	762,9	85% regenerativ	95,2
bioliq®/10 2018	196,9	-	90 % E5 + 10 % bioliq® 2018	96,4
bioliq®/10 2019	197,1	-	90 % E5 + 10 % bioliq® 2019	96,0
bioliq®/30 2019	190,2	-	90 % E5 + 30 % bioliq® 2019	97,4





5.1.2 Dieselkraftstoff

Sowohl für die Untersuchungen an den Motorenprüfständen als auch für die RDE-Messungen wurden unterschiedliche Dieselkraftstoffe verwendet. B7 als handelsüblicher Referenzkraftstoff sowie die Blends R33 und S33 erfüllen die Norm EN 590, HVO erfüllt die Norm EN 15940.

Tabelle 7 Eigenschaften untersuchter Dieselkraftstoffe

Kraftstoff	Dichte ₃ [kg/m ³]	Verhältnis [% (V/V)]	Cetanzahl
B0	833,1	100% fossiler Diesel	53,5
B7	837,6	93% fossiler Diesel + 7 % FAME	52,7
R33 ¹	821,0	7 % FAME + 26% BtL + 67% foss. Diesel B0	62,6
S33	821,0	7% FAME + 24% PtL + 69% foss. Diesel B0	59,9
R33 ²	821,9	7 % FAME + 26% BtL + 67% foss. Diesel B0	56,7
HVO	780,1	100% BtL	74,8

¹ selbst geblendeter R33. ² bereitgestellter R33 von Projektpartner.

5.2 Materialverträglichkeit

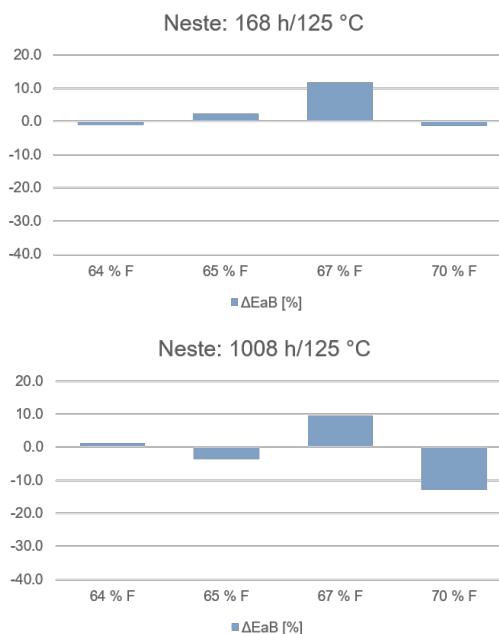
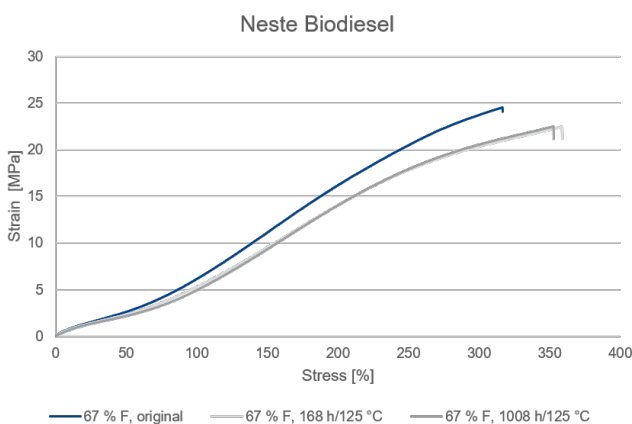
Die Einführung alternativer Kraftstoffe geht immer mit dem Risiko einher, dass die Materialien Kraftstoff-führender Elemente nicht mit den Kraftstoffen harmonieren. In der Vergangenheit bei der Analyse des Einsatzes konventioneller Biokraftstoffe wurden z.B. ein Anschwellen von einfach flourierten Elastomeren bei spezifischen Ethanol-Gehalten zwischen 20 und 25% beobachtet. Bei Methanol als Kraftstoffbeimengung wiederum steigt das Risiko des Anschwellens des Elastomers mit zunehmendem Methanolgehalt [30].

In der Übertragung auf die im Projekt reFuels – Kraftstoffe neu denken eingesetzten Kraftstoffe wurden deswegen zwei Arten von Tests durchgeführt:

- a) Komponenten- und Material-Tests mit diesen Kraftstoffen
- b) Motorische Untersuchungen

Letztere beziehen alle Kraftstoff-führenden und auch alle Gas-führenden Pfade mit ein, sind aber während der Skalierung der Synthesenanlagen nur begrenzt durchführbar. Im Falle paraffinischen Diesels wurde zu diesem Zweck auf den chemisch vergleichbaren aber über die Hydrierung erzeugten HVO-Diesel (HVO = Hydrogenated Vegetable Oil = hydrierte Pflanzenöle/Reststoffe) zurückgegriffen, einen längeren Dauerlauf durchführen zu können. Parallel hierzu hat der reFuels-Partner Freudenberg Sealing Technologies Komponententests durchgeführt, die in Übereinstimmung mit den Flottentests keine signifikanten Beeinträchtigungen des Elastomers.

Neste Renewable Diesel



FREUDENBERG SEALING TECHNOLOGIES

FREUDENBERG INNOVATING TOGETHER

© Freudenberg Sealing Technologies

Abbildung 40: Analysen zum Einfluss paraffinischen Diesels auf Elastomerdichtungen

Mit Blick auf über den Methanol-Pfad synthetisierte Benzin-Kraftstoffe (Methanol-to-Gasoline s.a. Abschnitt 4.2) wurde die Quell-Neigung durch sogenannte Einlagerungstests bestimmt.

LM-Nummer	254551	254553	254453	254550	143603
Flourgehalt FKM	64 % F	65 % F	67 % F	70 % F	66 % F
ΔV [%] / Fuel C [168h / 100 °C]	21,1	23,0	19,5	16,3	22,7
ΔWt [%] / Fuel C [168h / 100 °C]	8	9	7	6	10,0
ΔV [%] / G40 Gasoline Bioliq 30 [94h / 60 °C]	22,8	17,8	19,1	13,4	19,1
ΔWt [%] / G40 Gasoline Bioliq 30 [94h / 60 °C]	8,0	6,9	6,7	4,9	7,7
ΔV [%] / G85 POSYN LF11 [94h / 60 °C]	20,2	16,0	17,2	11,4	17,6
ΔWt [%] / G85 POSYN LF11 [94h / 60 °C]	7,2	6,1	6,0	4,6	6,9
ΔV [%] / FAM B [168h / 100 °C]	50,4	35,8	45,2	25,3	54,3
ΔWt [%] / FAM B [168h / 100 °C]	21	15	19	10	23,0

ΔV [%] = Volumenquellung

ΔWt [%] = Gewichtsquellung

Zu sehen sind in die Quellwerte nach Einlagerung in Gasoline Bioliq 30 und Posyn LF 30 im Vergleich zu Fuel C, einen Referenzkraftstoff für Ottomotoren (Toluol : Isooktan = 1:1) und im Vergleich zu FAM B (84,5% FAM A + 15% Methanol. + 0,5% Water. FAM A 50% Toluene + 30% Iso Octane. + 15% Dilsobutylene + 5% Ethanol),



einem Referenzkraftstoff, der Methanol und Ethanol enthält. Die Quell-Neigung der reFuels-Blends G40 und G85 unterscheidet sich dabei nicht signifikant von der Quellneigung des Referenzkraftstoffes.

5.3 Bewertung der Kraftstoffe beim reFuels Partner Bosch

5.3.1 Übersicht Projektaktivitäten - Diesel

Die Schwerpunktaktivitäten der Firma Robert Bosch GmbH bezüglich klimafreundlicher Dieselmotoren sind die Bewertung der Einspritzsystemverträglichkeit und Systemwechselwirkung von Blendkraftstoffen innerhalb der EN590 wie z.B. dem R33 Blue Diesel, sowie mit paraffinischen Reinkraftstoffen der EN15940.

Das Bosch Kraftstoffbewertungsprogramm beinhaltet neben dem Test auf funktionaler Ebene im Vergleich zu einem Referenzkraftstoff auch die Ermittlung kraftstoffspezifischer Kenngrößen, die wichtig sind für eine gleichbleibende Funktion und Mengenzumessung des Common Rail Injektors in der Interaktion mit Systemfunktionen, bei ähnlichem Verschleißverhalten über Lebensdauer.

Darüber hinaus wird an typischen Fahrzeugvertretern in Rollenversuchen auch die Emissionsneutralität nachgewiesen (für R33 Blue Diesel und C.A.R.E. Diesel erfolgreich durchgeführt). Diese Ergebnisse sind aber nicht Bestandteil dieses Projektbeitrags.

Das Programm unterteilt sich daher in folgende Punkte hinsichtlich Einspritzhydraulik:

Programm	Details der Untersuchung
Kraftstoffcharakterisierung	Ermittlung von Dichte, Viskosität, Cetanzahl, CP, CFPP und Verschleißparametern
Mengenbewertung	Einspritzmengenabweichung und Einspritzratenverlauf
Closed Loop Systemverträglichkeit	Merkmalerkennung Needle Closing Control (NCC) und Regelgüte

Tabelle 8 Prüfprogramm Komponentenuntersuchung CRI Hydraulikprüfbank

5.3.1.1 Ergebnisse der Kraftstoffcharakterisierung

Für das Common Rail Einspritzsystem CRS2-2x (Magnetventilinjektoren) spielt vor allem die kinematische Viskosität eine wichtige Rolle, denn diese ist maßgeblich verantwortlich für die eingespritzte Menge. Da dieser Wert bisher nur bei +40°C in der EN590 und EN15940 spezifiziert ist und bekanntlich je nach Kraftstoffsorte bei sinkender Temperatur stark ansteigen kann Abbildung 41, wird für jeden neuen Kraftstoff zuerst der Verlauf der kinematischen Viskosität im Bereich zwischen +40°C und -30°C ermittelt. Hieraus können bereits sehr genaue Aussagen über die Kaltstartfähigkeiten und die Güte der Kraftstoffzumessungen im Kaltbetrieb erfolgen.

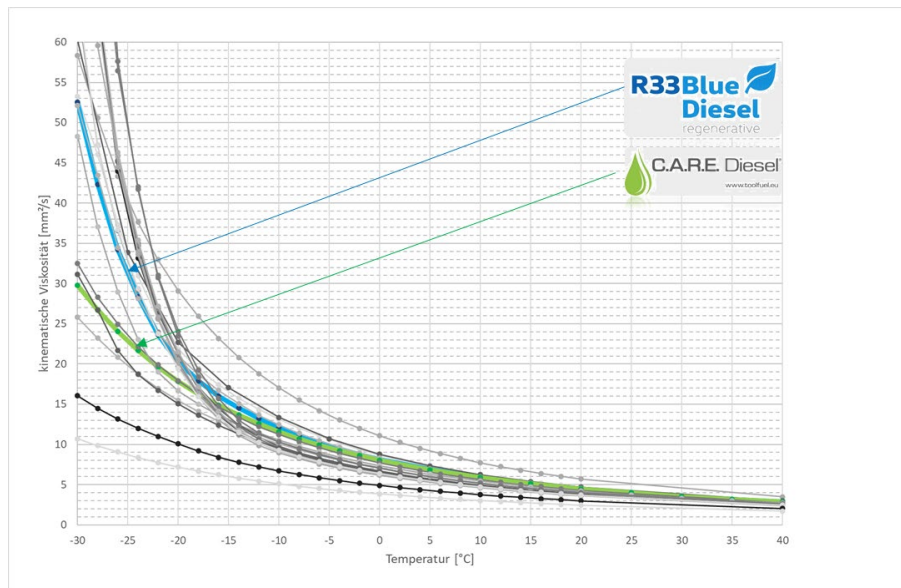


Abbildung 41 kinematische Viskosität verschiedener Dieselkraftstoffe

Beide Kraftstoffe zeigen sich über den kompletten Temperaturbereich im Mittelfeld aller untersuchten Kraftstoffe und liegen auch bei -25°C unter dem Bosch interne Anforderungswert von $35\text{ mm}^2/\text{s}$ und sind bezüglich des Kaltstarts und Kaltlaufverhaltens als unkritisch einzustufen.

Neben der kinematischen Kraftstoffviskosität ist eine weitere wichtige Kenngröße für das Einspritzsystem die Dichte, da Dichteänderungen Einfluss auf die Drosseldurchflüsse im Injektor haben und die gravimetrische Einspritzrate in Höhe und Spritzdauer beeinflussen, was wiederum Auswirkung auf die Closed Loop Regelfunktion Needle Closing Control (NCC) und ihre Subfunktionen hat.

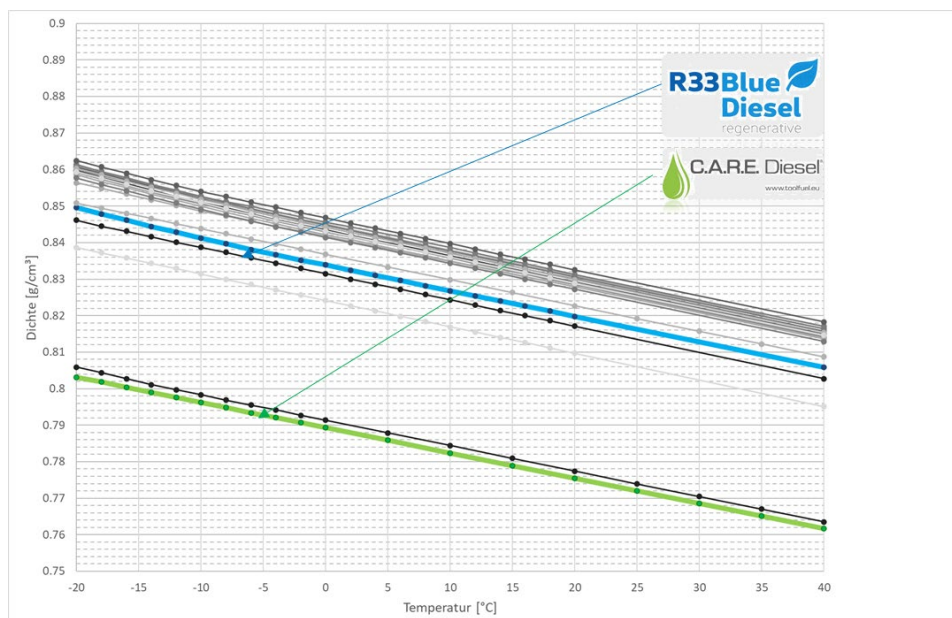


Abbildung 42 Dichtekennlinien verschiedener Dieselkraftstoffe

Die Dichte ist in der EN590 begrenzt auf $0,82\text{ g}/\text{cm}^3$ bei $+15^{\circ}\text{C}$, weshalb Blendkraftstoffe innerhalb der EN590 derzeit aus technischer Sicht nur einen Anteil des paraffinischen Dieselkraftstoffs von ca. 30% aufweisen können, um nicht aus der Norm herauszufallen. Der paraffinische C.A.R.E. Diesel, sowie andere HVO-



Kraftstoffe mit einer deutlich niedrigen Dichte sind daher in der EN15940 geführt. Ihre stark abweichende Dichte muss daher besonders auf die Einspritzsystemverträglichkeit untersucht werden.

Weitere wichtige Eigenschaften, die weniger die hydraulische Funktion beeinflussen, sind in Tabelle 9 dargestellt. Diese sind relevant für die Dauerhaltbarkeit bezüglich des Verschleißes (SL-Bohle und HFRR) oder in Form des Cetanindex festigkeitsrelevant für die Düsenkuppe, da sich große Unterschiede im Cetanindex in unterschiedlicher Düsenkappentemperatur widerspiegeln. Je höher der Index, desto höher die Temperatur, da die Verbrennung näher an der Düsenkuppe stattfindet. Bis auf den SL-Bohle Wert sind alle Größen in der EN590 und EN15940 beschrieben mit Grenzwerten, wobei die Werte in Tabelle 8 des paraffinischen C.A.R.E. Diesels auch mit der EN590 erfüllt würden.

Für den Kaltbetrieb und die Fahrbarkeit sind die Parameter Cloud Point (CP) und Cold Filter Plugging Point (CFPP) relevant, je tiefer die Werte, desto besser ist der Kraftstoffe im Winterbetrieb. Der R33 Blue Diesel ist nahezu identisch zum B7 und B0 Dieselmotorkraftstoff, wobei der C.A.R.E. Diesel sich durch seinen sehr niedrigen CFPP auszeichnet, der vergleichbar zu Werten Arktischer Dieselmotorkraftstoffe der Klasse 4 ist, bei gleichzeitig sehr hohem Cetanindex, was die Brennbedingungen und die Laufruhe im Kaltbetrieb positiv beeinflusst.

Bezeichnung	Cetanindex	CP	CFPP	SL-Bohle	HFRR
R33 Blue Diesel	51,1	-9 °C	-27 °C	3750 g	300 µm
C.A.R.E. Diesel	74,1	-35 °C	-41 °C	4700 g	410 µm
EN590 B0 Winterdiesel	53	-9 °C	-29 °C	4600 g	440 µm
EN590 Arctic Diesel C14	47.4	-39 °C	-46 °C	4700 g	320 µm
EN590 B7 Applikations DK	51.6	-9 °C	-22 °C	4700 g	190 µm

Tabelle 9 Weitere wichtige Eigenschaften der untersuchten Kraftstoffe

5.3.1.2 Ergebnisse Mengenbewertung

Die Mengenbewertung auf der Hydraulikprüfbank ist gleichermaßen eine Überprüfung der Applikationsneutralität. Hierzu wurden verschiedene randlagige Kraftstoffe bezüglich kinematischer Viskosität und Dichte vermessen und ihre gravimetrische Einspritzmassenabweichung zu dem Referenzkraftstoff Prüföl bei konstanter Ansteuerdauer des Magnetventils bewertet. Diese erste Ebene der Mengenbewertung ist wichtig für das Verständnis der Wirkzusammenhänge, sagt aber noch nichts über die Systemverträglichkeit aus, da die eingespritzte Menge sich ergibt als Fläche unter der Einspritzrate Abbildung 44, wobei Einspritzbeginn, -höhe und Einspritzdauer je nach Dichte und Viskosität variieren und trotzdem im ungeregelten System neutral sein können.

So wirkt die kinematische Viskosität vor allem am sogenannten Zulaufspalt des Injektors und führt bei sinkender Viskosität zu einem geringeren Druckverlust und damit zu einer Spritzdauerverlängerung, was sich in Mehrmenge ggü. dem Referenzkraftstoff darstellt. Gleichermäßen bewirkt steigende Viskosität eine Mindermenge.

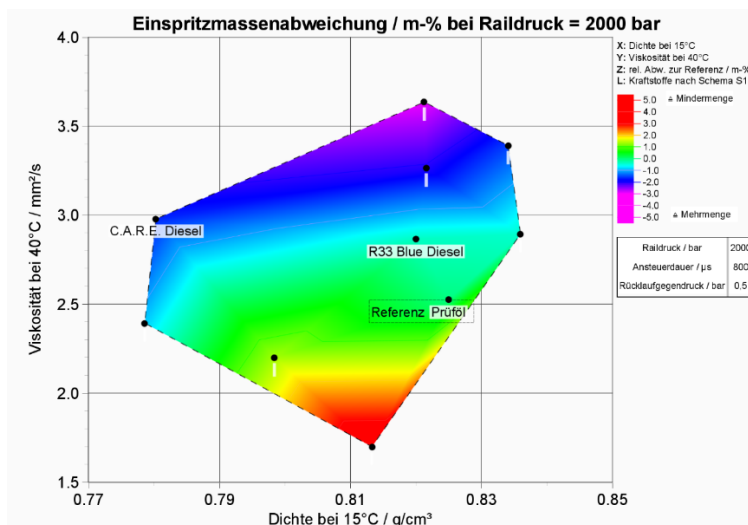


Abbildung 43 Mengenabweichung 2000bar und 800µs Ansteuerdauer (VL PP)

Dichte hingegen wirkt auf Einspritzratenhöhe (Durchfluss) und Einspritzdauer, so dass eine reine Dichteänderung aufgrund von Selbstkompensationseffekten im CRI2-2x Injektor nahezu mengenneutral ausfällt und die Isolinien gleicher Menge in Abbildung 43 waagrecht verlaufen.

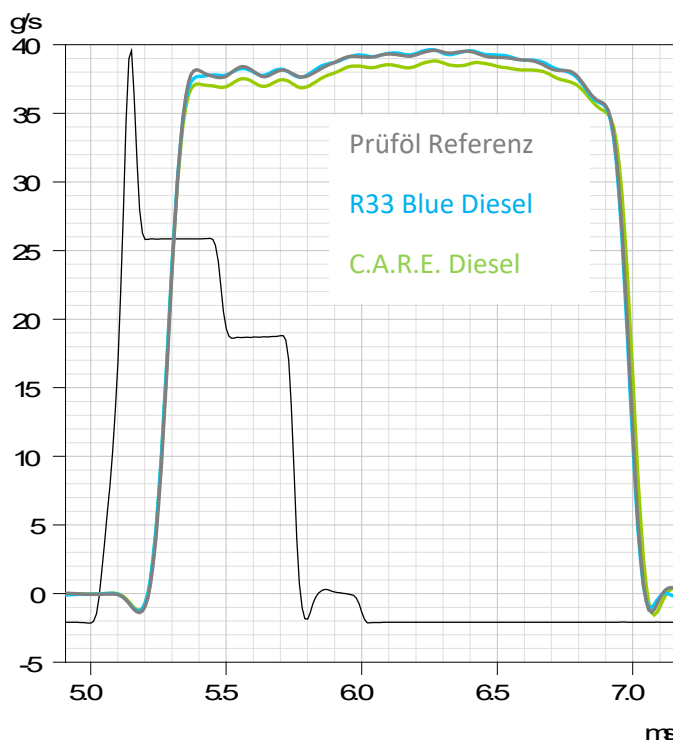


Abbildung 44 Einspritzrate gravimetrisch 2000bar, 800µs Ansteuerdauer

Die beiden Kraftstoffe R33 Blue Diesel und C.A.R.E. Diesel sind in Abbildung 44 vergleichend zu Prüföl in der gravimetrischen Einspritzrate dargestellt. Der R33 Blue Diesel mit nahezu gleicher Dichte wie Prüföl liegt fast deckungsgleich auf der Einspritzrate des Prüföls, lediglich das Spritzende ist minimal früher aufgrund der etwas höheren kinematischen Viskosität. Der C.A.R.E. Diesel hingegen zeigt den Dichteunterschied in Form einer reduzierten Einspritzratenhöhe (~2%) und etwas längerer Spritzdauer. Da auch die kinematische Viskosität ggü. Prüföl erhöht ist, kann die Spritzdauererlängerung nur etwa die Hälfte der Ratenreduktion ausgleichen, so dass gravimetrisch eine Mindermenge von ~1% übrigbleibt.

Für ein klassisches Einspritzsystem ohne Regelung der Spritzdauer, gibt es bezogen auf die gravimetrische Einspritzmenge keine Unterschiede zwischen EN590 und EN15940 Kraftstoffen, einzig und allein sind Dichte und Viskosität entscheidend, ob sich zum Auslegungskraftstoff Mehrmenge oder Mindermenge einstellt.

5.3.1.3 Closed Loop Systemverträglichkeit

Da bei Servoinjektoren mit ballistischer Düsennadelflugkurve eine sehr gute Korrelation zwischen Einspritzmenge und hydraulischer Spritzdauer besteht, wurde für Needle Closing Control (NCC) Systeme mit integriertem Needle Closing Sensor im Injektor die Führungsgröße von der elektrischen Ansteuerdauer auf die hydraulische Spritzdauer umgestellt [31], so dass deterministische Effekte wie Verkokung, Zylinderdruck oder auch die Dichte, die bisher dem Selbstkompensationseffekt unterlagen, berücksichtigt werden müssen in der Regelung der Spritzdauer, zur Richtigstellung der Einspritzmenge.

Abbildung 45 zeigt die Darstellung von Einspritzrate und NCS-Signal. Die Merkmale Ventilöffnen (VÖ), Nadelumkehrpunkt (TNT) und Einspritzdauer (EOI) zeigen, dass in der Erkennungsgüte der Merkmale als Basis für die Regelung keine Unterschiede bestehen, jedoch die Spritzdauer 20µs länger ist bei geringerer Dichte bei leichter Untermenge. Eine Regelung auf gleiche Spritzdauer wie bei der Dichte von 825 kg/m³ wäre hier nicht zielführend, sondern im Zusammenspiel mit weiteren Systemfunktion muss diese Einspritzratenänderung als Verkokung (Durchflussminderung der Düse) erkannt und behandelt werden, damit die Auswirkung wie im gesteuerten Fall mengenneutral bleibt.



Abbildung 45 Wirkung des Dichteeffekts auf Einspritzrate und Merkmalerkennung NCC

5.3.1.4 Einsatz bei Bosch

Seit Ende 2018 nutzt die Firma Bosch R33 Blue Diesel an den Betriebstankstellen Feuerbach, Schwieberdingen und Hildesheim.

Alle Diesel-Fahrzeuge aus Fahrzeugpools, Vielfahrer-Fahrzeuge, sowie betriebsinterne Fahrzeuge tanken vorzugsweisen diesen CO₂-reduzierten Kraftstoff.



Mittlerweile wurden über 1 Million Liter Kraftstoff vertankt, wodurch eine CO₂-Minderung von rund 580 Tonnen CO₂¹ realisiert wurde. Diese Ersparnis kann direkt in der CO₂-Bilanz des Unternehmens angerechnet werden.

Neben der CO₂-Ersparnis kann mit dieser Maßnahme auch sehr eindrücklich die Praxistauglichkeit solcher Kraftstoffe gezeigt werden. Es kommen hier unterschiedlichste Marken und Fahrzeugtypen ganzjährig zum Einsatz. Seit Einführung dieses Kraftstoffs gab es keinerlei Beanstandungen, was aufgrund der Vorbewertungen und der Normung nach EN590 auch zu erwarten war.

Um der Bosch-Flotte diesen Kraftstoff auch außerhalb der 3 Betriebstankstellen verfügbar zu machen, können seit 2022- nach Rollout von R33-Blue Diesel an öffentlichen Tankstellen - die Bosch-Fahrzeuge auch ergänzend an rund 25 weiteren Tankstellen betankt werden [32].

HVO100-Kraftstoff CARE-Diesel nach EN15940 wird zudem seit Ende 2018 in allen Diesel-Fahrzeugen der Geschäftsleitung eingesetzt [33]]. Geplant und entsprechend der gewährten Freiräume in der Bundesimmissionsschutzverordnung in der Umsetzung ist zudem der verstärkte Einsatz von HVO100-Kraftstoffen zur Erprobung in Logistikausschreibungen bei Bosch.



Abbildung 46 Betriebstankstelle Bosch Schwieberdingen

5.3.1.5 Zusammenfassung der Diesel- Kraftstofftests bei Bosch

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass auf hydraulischer Ebene dominant nur die Parameter Dichte und Viskosität wirken. Bei Regelung der Spritzdauer in einem Closed-Loop-System muss die Wirkung der Dichte jedoch berücksichtigt werden, damit die Korrelation von Spritzdauer und Menge weiterhin gegeben ist.

¹ 580 Tonnen CO₂-Ersparnis wird durch den erneuerbaren Anteil von 33% in R33-Blue Diesel realisiert. Die fossilen Anteile von 78%, die über Zertifikate kompensiert sind, werden darin nicht berücksichtigt.





Motorisch gesehen können die paraffinischen Blend- und Reinkraftstoffe helfen einen noch besseren Kaltstart und Kaltlauf zu ermöglichen, denn die Werte CP, CFPP und Cetanindex sind gleich zu Standard-Dieselmotoren oder übertreffen sogar die Mindestanforderungen.

Durch die umfangreichen Untersuchungen mit verschiedenen fossilen und erneuerbaren Kraftstoffen zur Einspritzsystemverträglichkeit und deren Wechselwirkungen im System, können mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen zukünftig klimafreundliche Dieselmotoren anhand weniger Kennzahlen eingeordnet, bewertet und ein schneller ihre Freigabe ermöglicht werden.

Mit dem Flottenversuch konnte die Praxistauglichkeit nachgewiesen werden und neben dem Einsatz an den Bosch Betriebstankstellen, dem Rollout von R33-Blue Diesel an öffentlichen Tankstellen, folgt in Kürze neben der Nutzung in Geschäftsführerfahrzeugen auch der Einsatz von Reinkraftstoffen der EN15940 in der Bosch Logistik zur weiteren Reduktion von CO₂ Emissionen im Unternehmen.

5.3.2 Übersicht Projektaktivitäten - Benzin

Die Aktivitäten der Firma Robert Bosch GmbH bezüglich Benzinkraftstoff beschränken sich auf das Cluster B: Motorische Anwendung der Kraftstoffe. Der im Projekt entwickelte EN228 Kraftstoffkandidat G40 (10% Ethanol + 30% bioliq[®] 2020 + 60% fossiles Benzin) wurde der Firma für die Kraftstoffbewertung im motorischen Betrieb zur Verfügung gestellt. Die Robert Bosch GmbH erhielt für die Versuche in Summe 600 Liter geblendeten G40 Kraftstoff.

Das Bosch Kraftstoffbewertungsprogramm beinhaltet den Test des Kraftstoffs auf funktionale Eignung an einem Motorenprüfstand und einer Einspritzkammer. Die Messungen am Motorenprüfstand liefern Aussagen zur Bewertung der Applikationsneutralität, motorischer Emissionen und dem allgemeinen Verbrennungsverhalten des Kraftstoffs. Dem Projekt stand ein seriennaher 4-Zylinder Turbomotor mit Benzindirekteinspritzung zur Verfügung. Der Hubraum ist 2 Liter und der Motor ist ausgestattet mit Bosch Hochdruckeinspritzventilen (HDEV 6) in zentraler Einbaulage. In Tabelle 10 ist eine Übersicht über das Bosch Kraftstoffbewertungsprogramm dargestellt. Detaillierte Informationen zum Vorgehen im Messprogramm können der Referenz [34] entnommen werden.

Tabelle 10 Bosch Kraftstoffbewertungsprogramm am Motoren- und Sprayprüfstand

Program	Details and Conditions
PN drift of injector / engine	2000 rpm / bmep 10bar for 14h at 20MPa and 4h at 35MPa @warm engine
Engine map with focus on Engine out emissions, BSFC, combustion parameters (Load sweep)	1000/2000/4000/6000 rpm, Idle...full load @warm and cold engine
Calibration robustness (SOI-sweep)	1500/2e, 10e and full load @warm engine
Engine knocking	1500/2000/3000/4000/5000/6000 rpm, full load, ignition angle sweep @warm engine
Transient operation	Load step at 1500/2e → full load incl. SOI variation @cold engine
Catalyst heating	Catalyst heating operating point incl. ignition angle sweep @cold engine
Internal EGR variation	1500/2e and 4e, variation of exhaust valve timing @cold engine
Oil dilution	1500/10e, engine coolant temperature 50°C
Spray evaluation	Detailed evaluation of injection behavior in an optical accessible spray chamber test bench, for ambient and heated fuel (20°C and 85°C), different chamber back pressures (400 mbar, 1100 mbar, 5000 mbar) and rail pressures (200 bar and 350 bar) at ambient temperature



Das Ziel der Sprayanalysen ist es, das Verhalten der Kraftstoffeigenschaften auf die motorischen Wirkkette von Einspritzung, Gemischbildung, Verbrennung und Emissionsentstehung detailliert zu untersuchen. Die Untersuchungen werden unter verschiedenen motornahen Randbedingungen durchgeführt. Die getestet Spraykammerbetriebspunkte sind in Tabelle 10 dargestellt.

Alle Versuche wurden mit einem normgerechten Referenzkraftstoff (Bosch EU5 Cert) verglichen. Bosch EU5 Cert kann dabei als Schlechtkraftstoff hinsichtlich Partikelbildung für den Europäischen Markt betrachtet werden (vgl. hohes Siedeende Tabelle 11). Zusätzlich dazu wurde ein potenzieller erneuerbarer Benchmarkkraftstoff (POSYN - POrsche SYNthetic Fuel [35]) getestet und für den Vergleich herangezogen. Beim POSYN handelt es sich um einen Beispielkraftstoff, der auf Basis von erneuerbaren Komponenten hergestellt werden kann und zusätzlich optimierte Kraftstoffeigenschaften innerhalb EN228 (vgl. deutlich reduziertes Siedeende, hohe Oktanzahl in Tabelle 11) besitzt. Die wichtigsten Kraftstoffeigenschaften der untersuchten Kraftstoffe sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11 Wichtige Eigenschaften der untersuchten Kraftstoffe

Fuel	Final Boiling Point [°C]	Density [kg/m ³]	RON [-]
Bosch EU5 Cert	204	746	97
G40	180	751	101
POSYN	155	725	102

5.3.2.1 Ergebnisse Sprayprüfstand

Die Spraymessungen wurden unter verschiedenen motornahen Bedingungen durchgeführt. Im Folgenden sollen beispielhaft die Ergebnisse einer besonders herausfordernde motorischen Betriebsart bei Einspritzung im Ansaughub beschrieben werden. Es herrscht ein Kammerunterdruck von 400 mbar (absolut) und der eingespritzte Kraftstoff ist auf 85°C erhitzt (vgl. Referenz [36]). Unter diesen Bedingungen (Dampfdruck des Kraftstoffs > Umgebungsdruck) können Kraftstoffeigenschaften zum schlagartigen Verdampfen des Kraftstoffs führen, dem sogenannten Flash Boiling. Dieser Effekt kann dazu führen, dass sich das Spray kollabiert und die Sprayeindringtiefe signifikant zunimmt, welches erhöhte Wandbenetzung mit flüssigem Kraftstoff und Partikelemissionen zur Folge haben kann. Die Versuche wurden in kalter und heißer Umgebung (20°C und 200°C) durchgeführt. Als optische Messtechnik kommt das High-Speed-Schattenbildverfahren zum Einsatz. Beim Injektor handelt es sich um ein HDEV6 Einspritzventil (identisch zu Motorversuchen) mit 6 achsensymmetrischen Spraykeulen. Der Injektor ist seitlich in der Spraykammer verbaut, sodass aufgrund der Symmetrie nur 3 Spraykeulen sichtbar sind. Der Kraftstoffdruck liegt bei typischem Systemdruck von 350 bar. In Abbildung 47 sind die Spraybilder, oben und dazugehörige Eindringtiefen und Spraywinkel, unten dargestellt.



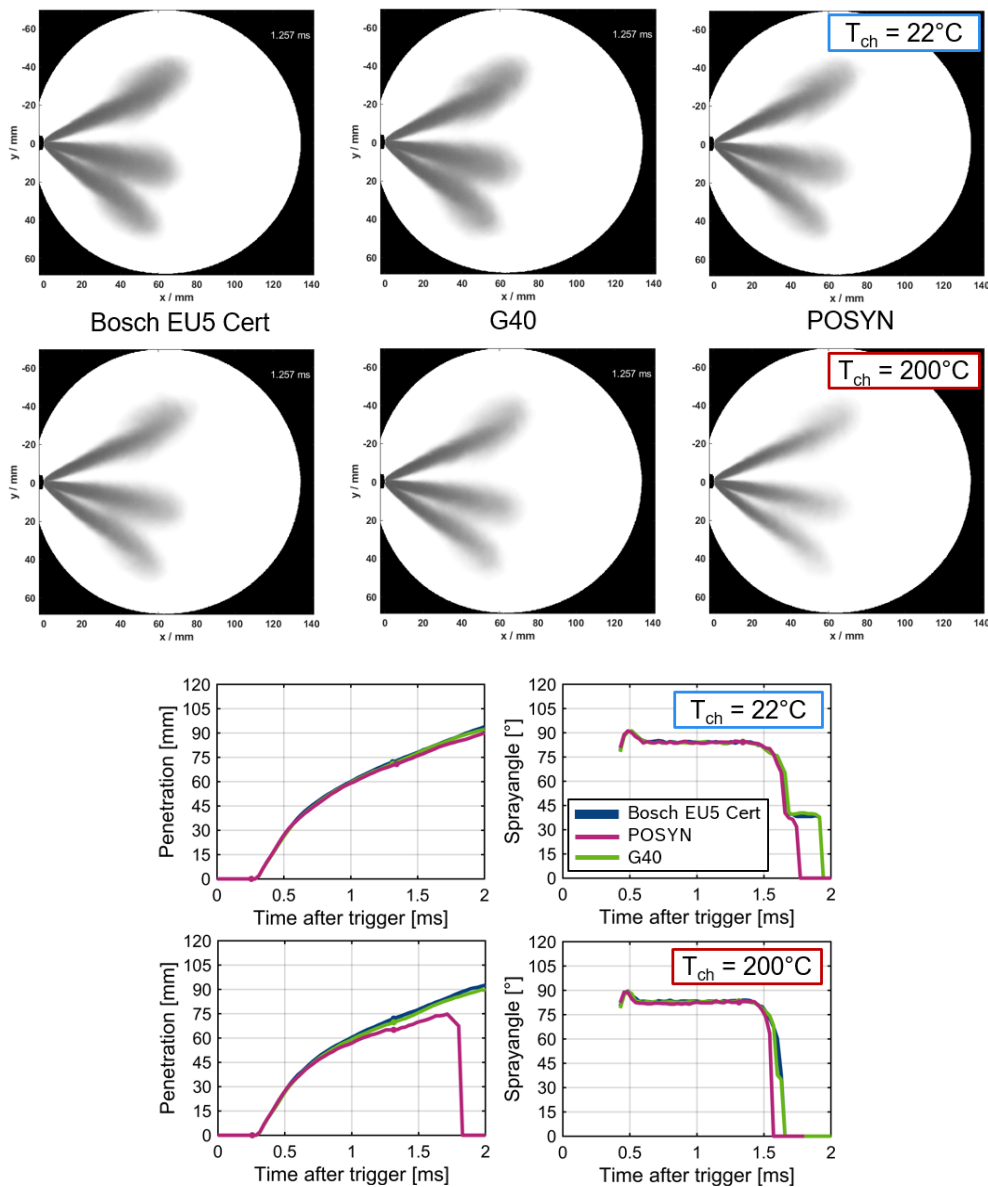


Abbildung 47 Schattenbildaufnahmen zum Zeitpunkt 1,26 ms nach elektrischem Start der Einspritzung (oben) und zeitlicher Verlauf der Eindringtiefe und des Spraywinkels (unten) bei jeweils 20°C und 200°C Kammertemperatur für die Kraftstoffe Bosch EU5 Cert, POSYN und G40. Kraftstofftemperatur 85°C . Kammerdruck 400 mbar abs., Kraftstoffdruck 350 bar. Einspritzdauer konstant 1,0 ms für alle Kraftstoffe.

Die Ergebnisse bei 20°C zeigen, dass sich der Kraftstoffkandidat G40 gleich zu den beiden Vergleichskraftstoffen verhält. Dies gilt für die Eindringtiefe, die Spraykegelwinkel und das generelle zeitliche Eindringverhalten. Es kann geschlussfolgert werden, dass sich unter diesen Bedingungen der Einspritz- und Gemischbildungsvorgang für alle Kraftstoffe gleich verhält. Zudem ist kein Kollabieren des Sprays sichtbar, welches die Robustheit aller Kraftstoffe auf den Einspritzvorgang repräsentiert. Bei 200°C ist ebenso kein Kollabieren des Sprays feststellbar. Das Targeting ist unverändert. Dies kann anhand des identischen zeitlichen Verlaufs des Spraykegelwinkels gezeigt werden. Auffällig ist jedoch, dass der POSYN Kraftstoff in den Sprayaufnahmen die geringste Signalintensität bei 1,26 ms aufweist und zudem eine reduzierte Eindringtiefe erkennbar ist. Dies ist speziell, bei diesem auf Eigenschaften optimierten Kraftstoff, auf das signifikant reduzierte Siedende zurückzuführen. Bei G40 ist dieses Verhalten nicht feststellbar. Die Eindringtiefe ist identisch mit der des Referenzkraftstoffes Bosch EU5 Cert. Beide Kraftstoffe besitzen bei Temperaturen unterhalb des Siedendes (vgl. E150) einen ähnlichen Siedeverlauf.

Es kann geschlussfolgert werden, dass anhand der Sprayversuche der G40 Kraftstoff als voll kompatibel angesehen werden kann. Auch nicht hier dargestellte Betriebsbedingungen zeigen gleiches Verhalten des G40, wie der Referenzkraftstoff Bosch EU5 Cert. Es wurde keine besonderen Auffälligkeiten des Kraftstoffs G40 festgestellt.

5.3.2.2 Ergebnisse Motorenprüfstand

In diesem Abschnitt werden beispielhaft unterschiedliche Betriebspunkte aus dem Bosch Bewertungsprogramm beschrieben und die Ergebnisse erläutert. Zunächst soll die Kennfeldmessung (Lastvariation von 2 - 22 bar BMEP) bei 2000 U/min und betriebswarmen Motor betrachtet werden. Alle Motorparameter, wie bspw. Raildruck, Einspritzzeitpunkt und Zündzeitpunkt wurde aus seriennahem Kennfeld gefahren. Diese Vorgehensweise erlaubt die Bewertung der Kraftstoffkandidaten hinsichtlich Applikationsneutralität durch Beobachtung von Verbrennungsgrößen wie z.B. Laufruhe (COV – coefficient of variation) und Verbrennungsschwerpunkt (MFB50 – 50% mass fraction burned). Zudem werden die motorischen Rohemissionen Partikelanzahl (PN), HC, NOx und CO vor Katalysator betrachtet. Die wichtigen Ergebnisgrößen sind in Abbildung 48 dargestellt.

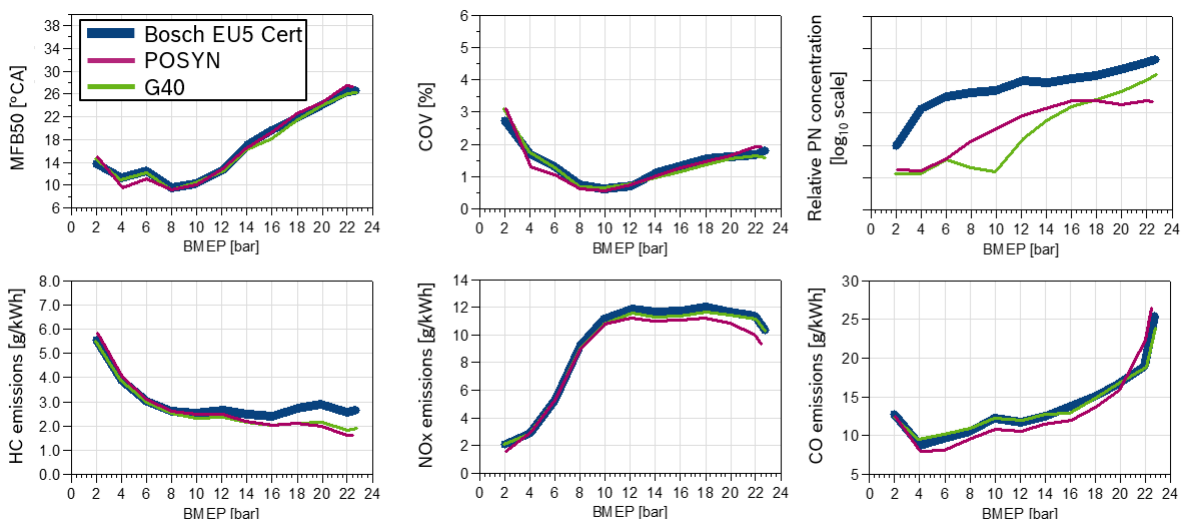


Abbildung 48 Wichtige motorische Kenngrößen und Rohemissionen für die Kennfeldmessung (Lastvariation BMEP) bei 2000 U/min und betriebswarmen Motor für die im Projekt verwendeten Kraftstoffkandidaten.

Der Verbrennungsschwerpunkt (MFB50) ist im Rahmen der Messtreuung für alle untersuchten Kraftstoffe identisch. Die Messung des Zündwinkels (hier nicht dargestellt) bestätigt, dass die Kraftstoffe über alle Lasten aus dem applizierten Kennfeld mit identischem Zündwinkel gefahren worden. Dies bedeutet, dass G40 und die Vergleichskraftstoffe keinen Einfluss auf das Zündwinkelkennfeld und den daraus folgenden Verbrennungsschwerpunkt aufweisen. Die gleiche Aussage kann für die Laufruhe (COV) getroffen werden. Für alle untersuchten Kraftstoffe ist der Wert identisch und liegt bei $\leq 3\%$.

Die Emissionsergebnisse der gasförmigen Emissionskomponenten (HC, CO, NOx) vor Katalysator des G40 liegen innerhalb der Messtreuung auf gleicher Höhe wie der Referenzkraftstoff Bosch EU5 Cert und sind damit als emissionsneutral zu bewerten. Bei den Partikelemissionen hingegen zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Kraftstoffen. Speziell G40 und POSYN zeigen, reduzierte Rohpartikelemissionen um teilweise mehrere Zehnerpotenzen. Dieses Verhalten ist auf spezielle Eigenschaften der Kraftstoffe zurückzuführen. G40 und POSYN besitzen gegenüber Bosch EU5 Cert ein reduziertes Siedeende. Zudem ist der Anteil an schweren Aromaten für beide Kraftstoffe signifikant reduziert. Beide Kraftstoffeigenschaften können demnach

deutlich zur Partikelminderung im motorischen Betrieb beitragen. Beim potenziellen Einsatz des G40 Drop-In Kraftstoffs in Bestandsfahrzeugen ohne Ottopartikelfilter, hätte das positive Partikelverhalten den Vorteil, dass Abgasemissionen im Fahrzeugbestand reduziert werden können.

Im Folgenden soll die Partikelbildung anhand des Untersuchungspunktes „PN Drift“ (vgl. Tabelle 10) genauer analysiert werden. Dafür wird ein spezieller Dauerlaufstest bei 2000 U/min und mittlerer Motorlast (10 bar BMEP) gefahren. Das Ziel des Untersuchungspunktes ist es, zu prüfen, ob der Kraftstoffkandidat über die Laufzeit Injektorablagerungen bildet. Diese Ablagerungen können zu einem zeitlichen Driftverhalten und damit zur Erhöhung der Partikelemissionen führen. Der Mechanismus dazu ist in Referenz [37] beschrieben. Am Prüfstand wird dieses Verhalten gezielt durch eine Raildruckreduktion von 350 bar auf 200 bar provoziert. Vor dem Test werden die Injektoren gereinigt. Danach wird der Betriebspunkt für 14 Stunden gefahren und kontinuierlich die Rohpartikelemission gemessen. Sollte der Kraftstoff einen PN Drift zeigen, so steigt das PN Signal über die Testzeit kontinuierlich an und stabilisiert sich auf hohem Niveau. Nach dem Dauerlauf erfolgt der Ausbau der Injektoren und eine Fotodokumentation der Düsenkuppen. In Abbildung 49 ist der zeitliche Verlauf der PN Rohemissionen für die untersuchten Kraftstoffe dargestellt.

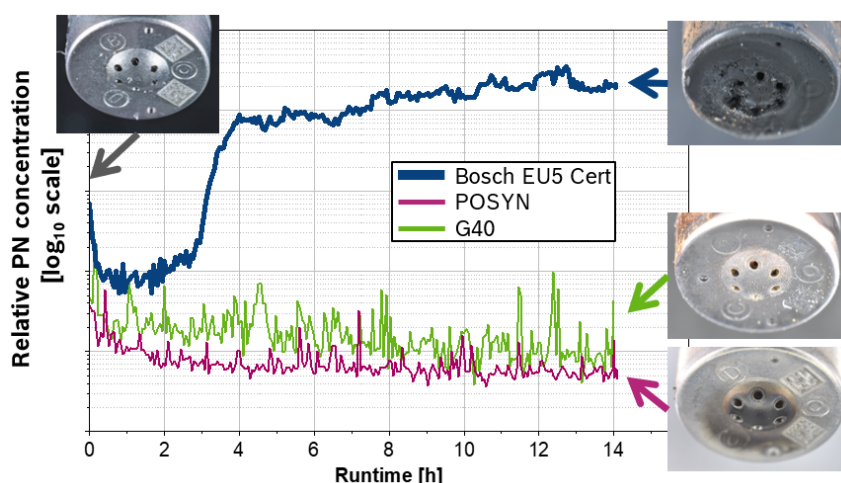


Abbildung 49 PN Rohpartikelemissionen der untersuchten Kraftstoffkandidaten für den 14 Stunden PN Drift Dauerlauf und Fotos der Düsenkuppen nach dem Dauerlauf inkl. Beispielfoto eines gereinigten Injektors am Start der Messung.

Die Ergebnisse der PN Rohpartikelkonzentration zeigen, dass Bosch EU5 Cert nach mindestens 4 Stunden einen signifikanten PN Drift aufweist und sich auf hohem PN Niveau stabilisiert. POSYN und G40 hingegen zeigen keinen PN Drift und verbleiben auf sehr niedrigem Partikelemissionsniveau. Die Ursache für den PN Drift des Referenzkraftstoffes kann auf die erhöhte Konzentration von schweren Aromaten (C9/C9+) zurückgeführt werden. G40 und POSYN besitzen den geringsten Anteil an schweren Aromaten. Neben der Partikelkonzentration zeigen die Fotos der Düsenkuppen keine signifikanten Ablagerungen für G40 und POSYN im Vergleich zu Bosch EU5 Cert. Es kann geschlossen werden, dass G40 sich bezüglich Partikeldriftverhalten wie ein auf niedrige PN Emissionen optimierter Benchmarkkraftstoff verhält, der keine signifikanten Ablagerungen aufbaut.

Als nächster Untersuchungsgegenstand soll beispielhaft die Ölverdünnungsuntersuchung betrachtet werden. Um die Ölverdünnung des Kraftstoffes bewerten zu können, wurde der Motor in einem Betriebspunkt betrieben, bei dem hohe Brennraumwand- und Zylinderbenetzung durch den Kraftstoff zu erwarten sind. Der Motor wird dabei bei 1500 U/min und Teillast (10 bar BMEP) für 2 h bei reduzierter Kühlmitteltemperatur von 50°C betrieben. Vor dem Testlauf wird frisches Motoröl aufgefüllt. Im Anschluss an den Testlauf wird das

Motoröl auf Kraftstoffanteile analysiert. Der verbleibenden Kraftstoffanteil wird als Prozentwert der Ölverdünnung angegeben (siehe Abbildung 50). Die Messung wird für jeden Kraftstoff einmal wiederholt.

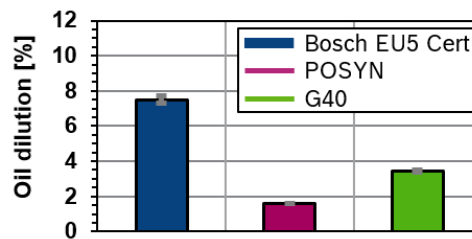


Abbildung 50 Ölverdünnungsraten für Bosch EU5 Cert, POSYN und G40.

Der Anteil an verbliebenen Kraftstoff im Motoröl ist für Bosch EU5 Cert am höchsten. POSYN und G40 besitzen dagegen signifikant reduzierte Anteile. Es ist bekannt, dass die Ölverdünnung sehr stark durch das Siedeverhalten eines Kraftstoffs bestimmt wird. Da G40 und POSYN deutlich reduzierte Siedepunkte besitzen, kann das Ergebnis damit begründet werden. G40 kann damit auch bei der Ölverdünnungsuntersuchung als voll kompatibel bewertet werden, mit einem Ergebnis, das mit einem in EN228 optimierten Benchmarkkraftstoff vergleichbar ist.

5.3.2.3 Zusammenfassung der Otto Kraftstofftests bei Bosch

Alle im Projekt getesteten Bewertungspunkte werden in diesem Kapitel zusammengefasst. Die abschließende Bewertung des funktionalen Verhaltens des Kraftstoffkandidaten G40 erfolgt mittels einer Matrix und Farbgebung nach qualitativen Kriterien aus den unterschiedlichen Untersuchungspunkten. Die Zusammenfassung aller durchgeführten Untersuchungen ist in Abbildung 51 dargestellt. Die grüne Farbgebung bedeutet dabei, dass sich G40 in allen Betriebspunkten als neutral oder besser als der Referenzkraftstoff Bosch EU5 Cert verhält. In keinem Betriebspunkt wurde der Kraftstoff als negativ abweichend von der Referenz oder als nicht-kompatibel bewertet. In einzelnen Betriebspunkten konnten sogar Vorteile des Kraftstoffs festgestellt werden. Diese sind hauptsächlich durch positiv beeinflussende Kraftstoffparameter wie das Siedeverhalten und die Aromatenzusammensetzung zurückzuführen (vgl. reduzierte Partikelemissionen im niedrigen Drehzahlbereich (< 4000 U/min)). Zudem konnte festgestellt werden, dass sich im klopfbegrenzten Kennfeldbereich nahe der Vollast, die hohe Oktanzahl des G40 Kraftstoffs vorteilhaft auswirkt. Es konnten Verbrauchsvorteile gemessen werden, die auf reduziertes Klopfverhalten des Kraftstoffs zurückgeführt werden können, da weniger Eingriffe der Klopfregelung notwendig sind und damit den Anfertigungsbedarf reduziert wird.



Operating Point	Bosch EU 5 Cert	G40
PN-Drift	Drift	No drift, @350 bar PN ↓
Cat Heating		
SOI sweep, 1500/2		
SOI sweep, 1500/10		PN ↓
SOI sweep, 1500/18		COV ↓, PN ↓
Load sweep @ 1000 rpm, warm		PN ↓
Load sweep @ 2000 rpm, warm		PN ↓
Load sweep @ 4000 rpm, warm		less knock, fuel enrich. ↓ CO ↓, BSFC ↓
Load sweep @ 6000 rpm, warm		
Load sweep @ 1000 rpm, cold		PN ↓
Load sweep @ 2000 rpm, cold		PN ↓
Load sweep @ 4000 rpm, cold		
Load sweep @ 6000 rpm, cold		
Load step 1500/2 → WOT, cold		
EGR Variation 1500/2 and 4		PN ↓
Engine knocking → WOT, warm		<4000 rpm PN ↓, advantages of high RON
Oil dilution assessment		Less fuel in oil
Spray evaluation		

Reference

Abbildung 51 Zusammenfassung der funktionalen Bewertung im Bosch Kraftstoffbewertungsprogramm.

Zusammenfassend kann der Kraftstoff G40 als funktional voll kompatibel und applikationsneutral im von Bosch untersuchten Bewertungsprogramm bewertet werden.

5.4 Messtechnik

Zur umfassenden Beurteilung der Einsatzfähigkeit in der bestehenden Fahrzeugflotte wurden im Rahmen des Projekts unterschiedliche Messtechniken genutzt. Die folgende Auflistung dient zur späteren vereinfachten Darstellung in den einzelnen Unterkapiteln. Neben konventionellen Abgasmessanlagen zur Bestimmung der Konzentration von CO, CO₂, NO, NO_x und O₂ erfolgte die Bewertung der Partikelemissionen (Anzahl und Größenverteilung) mit Hilfe eines Partikelgrößenspektrometers. Die dynamische Abgasanalyse für transiente Motorversuche erfolgte durch eine schnelle Abgasanalyse. Realfahremissionen im Straßenbetrieb wurden mit Hilfe portabler Abgasmesstechnik (PEMS) ermittelt. Zur Bestimmung weiterer Abgaskomponenten, die gesetzlich nicht limitiert sind, wurde ein Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer (FTIR) eingesetzt.

Tabelle 12. Verwendete Messtechnik

Name	Abkürzung	Hersteller	Messtechnik	Versuchsträger
Stationäre Abgasmessanlage AMA 4000	AMA4000	AVL	Messung von gasförmigen Emissionen: HC, NO, NO _x , CO, CO ₂	Einzyylinder und Vollmotor

Partikelmesstechnik DMS500	DMS500	Cambustion	Messung von Partikelgröße, -anzahl und -gewicht	Einzylinder und Vollmotor
Schnelle Abgasmesstechnik	FGA	Cambustion	Zyklusaufgelöste gasförmige Abgasemissionen: HC, NO, CO, CO ₂	Vollmotor
Fourier-Transformations- Infrarot-Spektrometer	FTIR	IAG	u.a. gasförmige nicht- limitierte Emissionen: NH ₃ ,	Vollmotor
Portables Emissionsmesssystem	PEMS	AVL	Gasförmige Emissionen HC, NO _x , CO, CO ₂ sowie Partikelanzahl	Fahrzeug

5.5 Untersuchungen am Einzylinderforschungsaggregat

Einzyklindorforschungsaggregate werden für grundlegende thermodynamische und emissionspezifische Untersuchungen genutzt. Sie haben den Vorteil, einzelne Parameter gezielt untersuchen zu können, ohne Quereinflüsse von anderen Zylindern wie bei Mehrzylindermotoren in Kauf nehmen zu müssen. Für die Untersuchungen der Diesekraftstoffe wurde ein PKW-Aggregat von Mercedes-Benz und für die Untersuchungen der Benzinkraftstoffe ein PKW-Aggregat von Porsche genutzt.

5.5.1 Untersuchungen mit Diesekraftstoffen

Als Dieseleinzyklindorforschungsaggregat wurde ein Aggregat Typ OM654 von Mercedes Benz genutzt. Dieser hat ein Verdichtungsverhältnis von 15,5:1 und ein Hubraum von 487 cm³. Für die Untersuchungen war eine AMA4000 sowie das DMS500 im Einsatz.

Am Forschungsaggregat wurden die Kraftstoffe R33 und S33 mit B7 verglichen. Ziel dieser Untersuchungen war, grundlegende Verbrennungs- und Emissionseigenschaften von vollständig innerhalb der gültigen Norm EN590 liegenden Kraftstoffen zu erhalten. Als Grundlage für R33 und S33 wurde B0-Diesel genutzt, also Diesel ohne Bioanteile. Die Mineralölraffinerie Oberrhein hat reinen Biodiesel, auch bekannt als Fettsäuremethylester (FAME), zur Verfügung gestellt. Bei R33 wurde als regenerativer Anteil HVO (Hydrogenated Vegetable Oils) genutzt. Es wurde 26 Vol.-% HVO, 7 Vol.-% FAME und 67 Vol.-% B0-Diesel als R33 geblendet. Bei S33 wurde als regenerativer Anteil e-Diesel vom Institut für Mikroverfahrenstechnik verwendet. Dieser hatte eine geringere Dichte als HVO, sodass

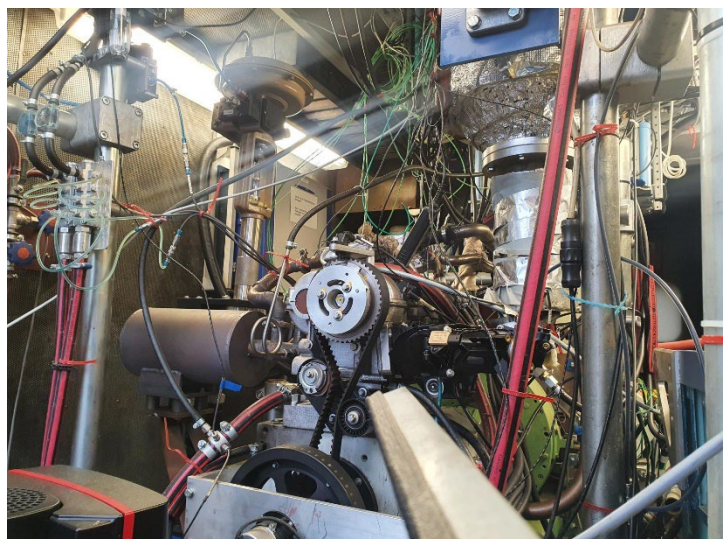


Abbildung 52 Prüfstands Aufbau Einzyklindorforschungsaggregat Diesel

dort der Blend mit 24 Vol.-% e-Diesel, 7 Vol.-% FAME und 69 Vol.-% B0-Diesel verwendet wurde, damit dieser hinsichtlich der Dichte noch innerhalb der Norm liegt. Höhere regenerative Blendraten können hauptsächlich aufgrund der zu geringen Dichte unter Einhaltung der Normanforderungen dargestellt werden.

Die Untersuchungen wurden bei verschiedenen Betriebspunkte (1000-3000 U/min / 4-20 bar indizierter mittlerer effektiver Druck (p_{mi})) entsprechend dem Standarddatenstand des Motorsteuergerätes gefahren und die Einzelparameter tests mit nur einer Haupteinspritzung (ohne Vor- und Nacheinspritzung) bei 2000 U/min und 4 - 7,5 bar IMEP durchgeführt. Neben der emissionsseitigen Bewertung wurde das Zünd- und Verbrennungsverhalten herangezogen, um die Mischkraftstoffe auf ihre generelle Eignung beurteilen zu können. Abbildung 53 Links: Brenndauer in Abhängigkeit von Lambda; Rechts: Stickoxidemissionen in Abhängigkeit der AGR-Rate (2000 U/min und 4 - 7,5 bar p_{mi}) zeigt einen Vergleich für den die Brenndauer (H5-90) über verschiedene Luft-Kraftstoff-Verhältnisse bzw. die NO_x -Änderungen über verschiedene AGR-Raten. Die Streuungen innerhalb der Kraftstoffe sind sehr gering und es können keine relevanten Unterschiede zwischen B7, R33 und S33 erkannt werden.

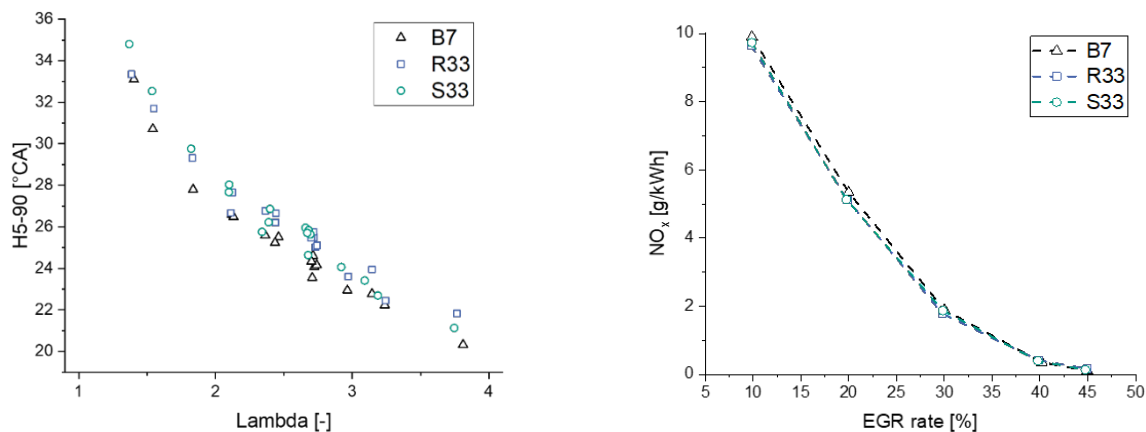


Abbildung 53 Links: Brenndauer in Abhängigkeit von Lambda; Rechts: Stickoxidemissionen in Abhängigkeit der AGR-Rate (2000 U/min und 4 - 7,5 bar p_{mi})

5.5.2 Untersuchungen mit Benzinkraftstoffen

In einem ersten Stichversuch wurden verschiedene bioliq-Kraftstoffchargen untersucht [8, 38]. In diesen Untersuchungen konnte ein erhöhtes Partikelanzahlmissionsverhalten bei höherer Zublendung (Beimischung) des synthetisch erzeugten Kraftstoffanteils beobachtet werden. Weitere Untersuchungen [39] bestätigen das Verhalten von erhöhten Partikelemissionen bei einem hohen Anteil an $\geq C_9$ -Aromaten. Mit diesem Hintergrund wurde der Schnitt für die folgend untersuchten Kraftstoffe angepasst (siehe Cluster A).

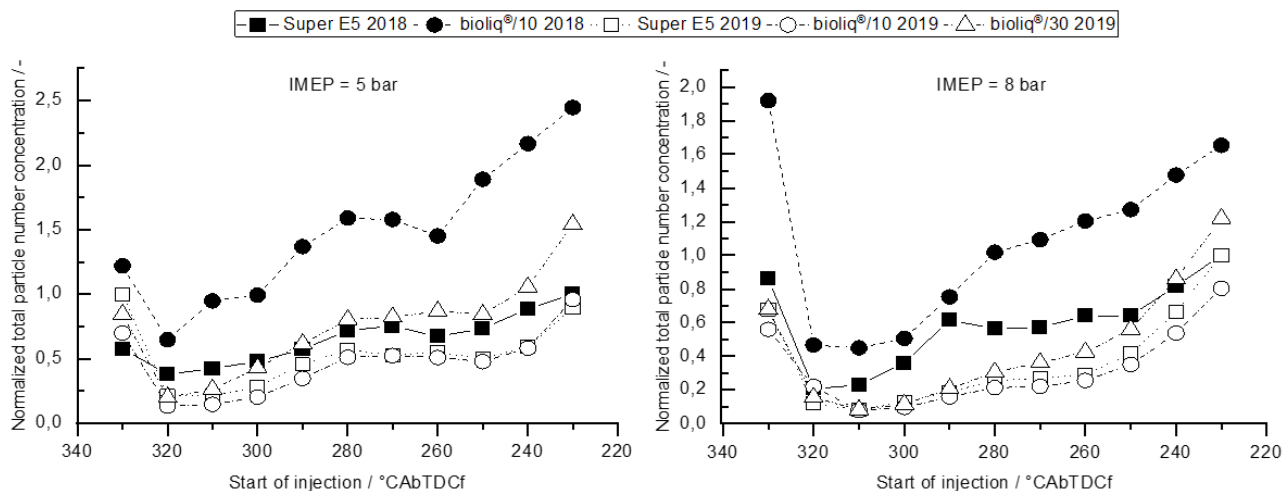


Abbildung 54 Partikelanzahlemissionen unterschiedlicher bioliq-Chargen bei 2000 min⁻¹

Um auch hier die grundlegenden Verbrennungseigenschaften der ottomotorischen reFuels-Kraftstoffe genauer beurteilen zu können, wurden auch hier grundlegende Experimente am Einzylinderaggregat durchgeführt. Entsprechend wurden die motorischen Untersuchungen mit einem Porsche-Einzylindermotor sowohl bei der Porsche AG als auch am IFKM, KIT durchgeführt. Zur Bewertung der Kraftstoffeigenschaften hinsichtlich der Emissionswerte wurden auf dem Einzylindermotoren-Prüfstand gasförmige Emissionen sowie Partikelanzahl berücksichtigt und gemessen. Dafür ist der Prüfstand mit einer Abgasmessanlage zur Messung von NO_x, CO, HC und mit einem Partikelmessgerät zur Messung der Partikelanzahl ausgerüstet.

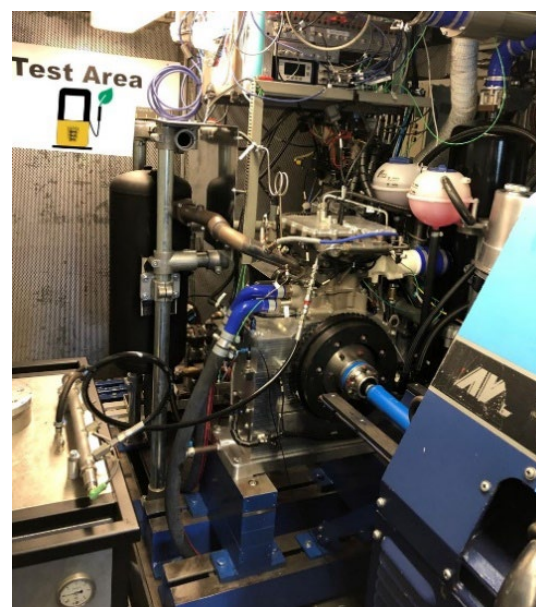


Abbildung 55: Porsche Einzylindermotor aufgebaut am Prüfstand des IFKM

Die Kraftstoffeigenschaften von G40 (s.a. 4.2.1.2 und Tabelle 6) wurden sowohl am Prüfstand bei der Porsche AG als auch am IFKM untersucht [40]. Hierzu wurden zuerst die Versuche mit G40 sowie SP98 als Referenzkraftstoff bei der Porsche AG durchgeführt. Danach wurden die Untersuchungen mit dem gleichen Motor, aufgebaut am IFKM, durchgeführt. Dies ermöglichte erweiterte Vergleichsmessungen als auch den Einsatz zusätzlicher Messtechnik.

Abbildung 56 zeigt die Ergebnisse der Versuche mit SP98 und G40 auf dem Prüfstand bei der Porsche AG. In den folgenden Diagrammen ist ein Vergleich zwischen SP98 und G40 für CO, HC, NO_x und Partikelanzahl dargestellt. In den grün markierten Punkten hat G40 bessere Emissionswerte als SP98 gezeigt. In den mit rot gekennzeichneten Bereichen sind die Emissionswerte für SP98 jedoch niedriger als für G40. Bei der Definition der grünen und roten Bereiche wurde auch die Messunsicherheit der Abgasmessanlage berücksichtigt. Obwohl bei CO- und HC-Werten keine signifikanten Unterschiede zu erkennen sind, zeigt G40 Vorteile bei den NO_x- und PN-Werten, insbesondere bei niedrigeren Lasten.

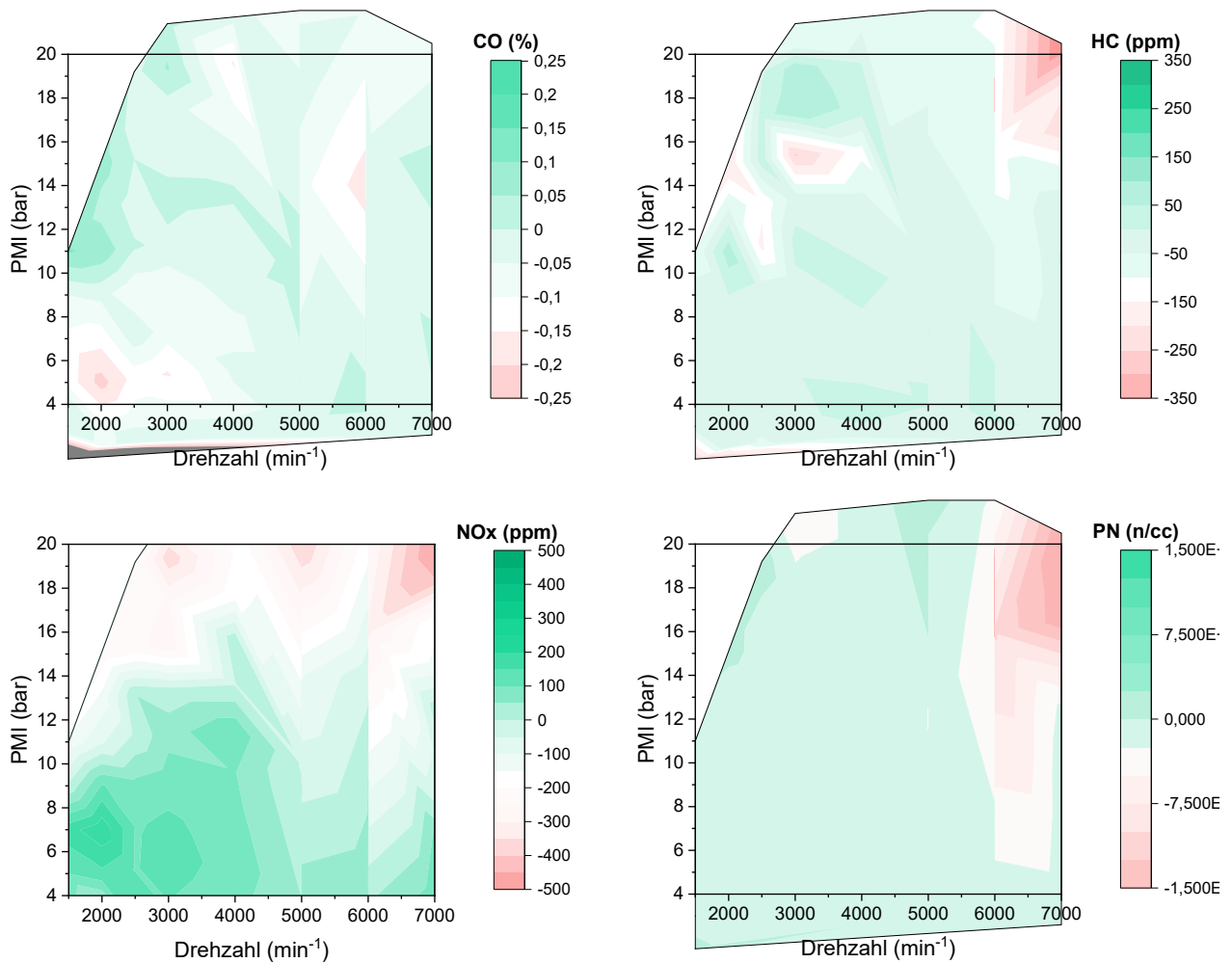


Abbildung 56: Ergebnisse der Versuche mit SP98 und G40 am Prüfstand bei der Porsche AG

Vergleichbare Versuche wie bei der Porsche AG wurden auch am IFKM, KIT mit G40 und E5 durchgeführt. Die Ergebnisse haben die bei der Porsche AG gemessene Werte bestätigt. In den grün markierten Punkten hat G40 bessere Emissionswerte als E5 gezeigt. In den mit rot gekennzeichneten Bereichen sind die Emissionswerte für E5 jedoch niedriger als für G40. Wie in Abbildung 57 zu sehen ist, sind zwischen G40 und E5 keine signifikanten Unterschiede bei den Emissionswerten zu erkennen.



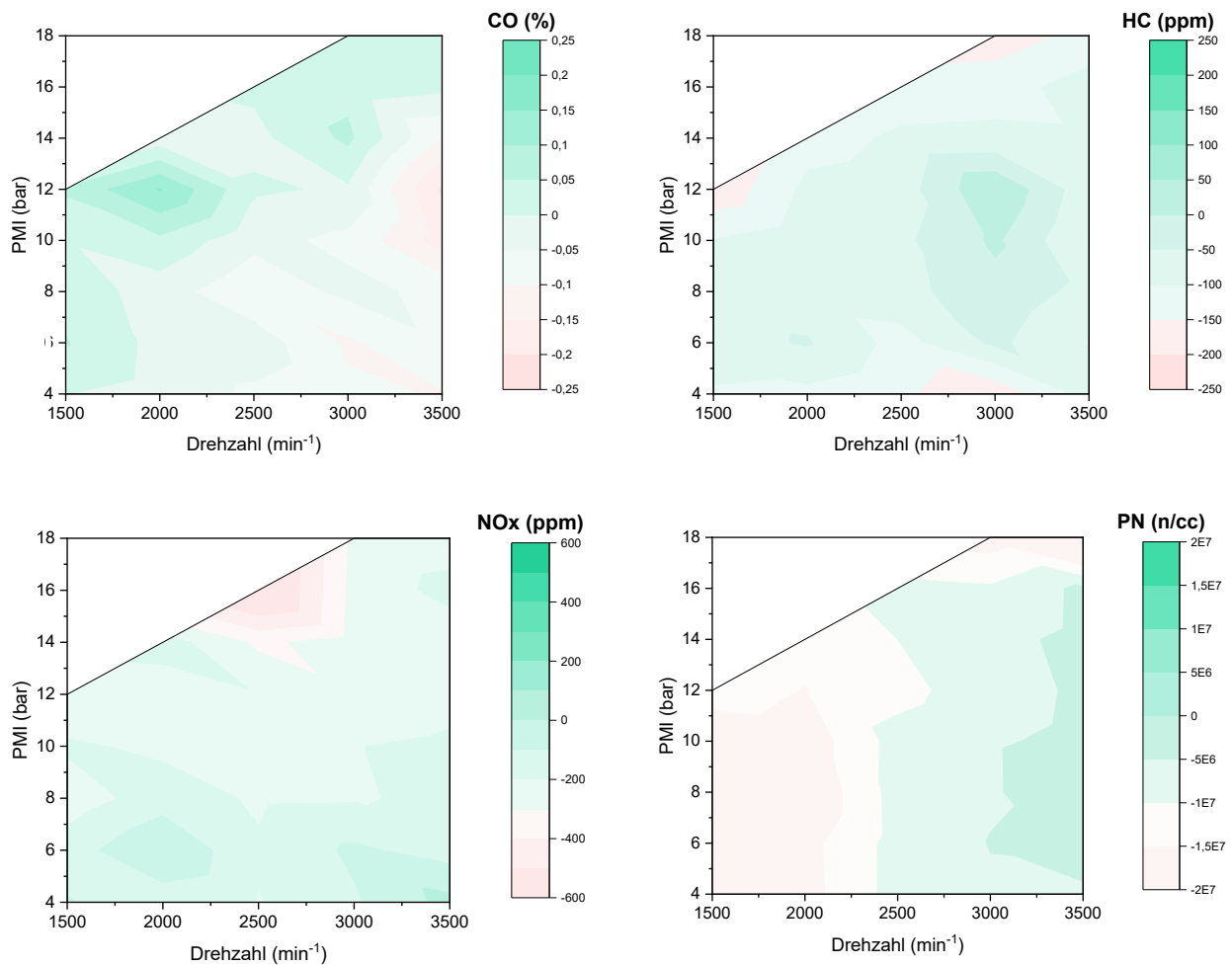


Abbildung 57: Ergebnisse der Versuche mit E5 und G40 am Prüfstand am IFKM

5.6 Untersuchungen an Komponentenprüfständen

Zusätzlich zu den motorischen Untersuchungen wurden Eigenschaften der Kraftstoffe an Komponentenprüfständen untersucht. Sprayuntersuchungen wurden an einer Druckkammer durchgeführt, der Einfluss auf die Oktanzahl an einem CFR-Oktanzahlmotor und weitere Untersuchungen bei Projektpartnern wie zum Beispiel das Verhalten auf Dichtungswerkstoffe bei Freudenberg Sealing Technologies.

5.6.1 Untersuchungen des Sprayaufbruchverhaltens an einer Druckkammer

Die in Kapitel 5.5.2 vorgestellten bioliq®-Chargen wurden an einer Druckkammer auf ihr Einspritz- bzw. Sprayaufbruchsverhalten untersucht. In der folgenden Abbildung 58 Sprayuntersuchungen von bioliq®-Chargen sind Aufnahmen vom Aufbrechen der Einspritzstrahlen zu sehen. Je höher der bioliq Anteil ist, desto tendenziell schlechter ist das Zerstäubungsverhalten des Kraftstoffstrahls und umso höher die Eindringtiefe des Strahls. Dies ist ein weiterer Indikator, warum die Partikelemissionen angestiegen sind. Durch die erhöhte Eindringtiefe wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, den Kolben oder den Liner mit Kraftstoff zu treffen. Durch dieses Auftreffen entstehen erhöhte Partikelemissionen, zum Beispiel durch so genanntes Poolfire.

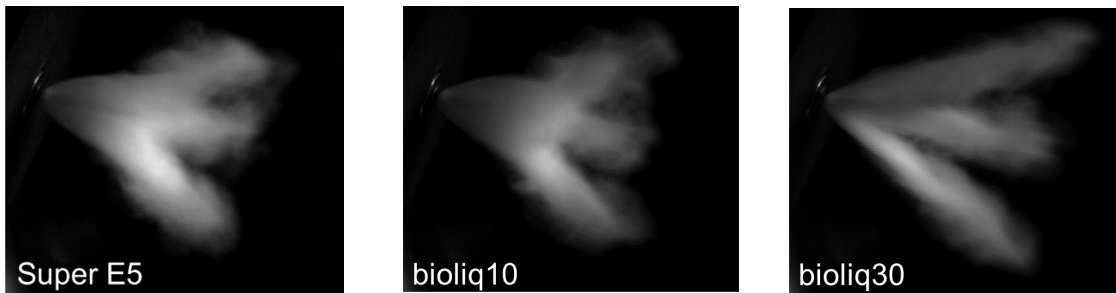


Abbildung 58 Sprayuntersuchungen von bioliq®-Chargen

5.6.2 Einfluss auf Dichtungskomponenten

Um den Einfluss von G40 und G85 auf das Quellungsverhalten von Dichtungskomponenten zu untersuchen, wurde beim Projektpartner Freudenberg Sealing Technologies entsprechende Versuche durchgeführt. Dabei kam neben den genannten Kraftstoffen zwei Referenzkraftstoffe zum Einsatz. Referenz A, ein Referenzkraftstoff für Ottomotoren aus Toluol und Isooktan sowie Referenz B, ein Referenzkraftstoff, der Methanol und Ethanol enthält. In folgender Abbildung sind die Volumenänderungen der einzelnen Kraftstoffe für Dichtungen aus Fluorkautschuk mit unterschiedlichem Fluorgehalt (FKM) dargestellt. In der Darstellung bedeuten die Fluorgehalte der Proben:

Probe 1: 64 % Fluor; Probe 2: 65 % Fluor; Probe 3: 67 % Fluor; Probe 4: 70 % Fluor; Probe 5: 66 % Fluor (bisphenolisch)

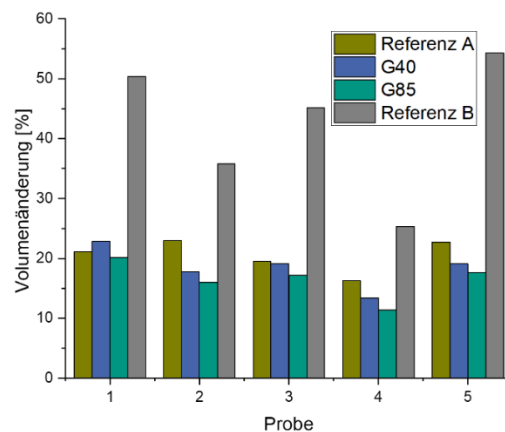


Abbildung 59: Einlagerungsversuche von G40 und G85 mit unterschiedlichen Dichtungskomponenten

Zur Standardreferenz A verhält sich G40 und G85 sehr ähnlich bzw. und damit keine Unterschiede im Quellverhalten auf. Referenz B, der im Dichtungswerkstoff FKM zu deutlich höheren Quellwerten führt, liegt deutlich über dem Niveau von G40 und G85. Auch bisphenolische FKM Typen (Probe 5) liegen auf akzeptablen Wertenniveau gegenüber den alkoholhaltigen Referenzkraftstoffen. Als Fazit lässt sich ziehen, dass im Vergleich zu anderen Referenzkraftstoffsystemen G40 und G85 im gleichen Quellungsbereich liegen und keine erkennbaren Auffälligkeiten hinsichtlich der Quellung und Dichtungsverhalten aufweisen. Mit Problemen durch einen Einsatz dieser Kraftstoffe in der Bestandsflotte ist entsprechend nicht zu rechnen.

5.6.3 Untersuchungen am CFR-Oktanahlmotor

Die Oktanzahl bestimmt als wichtige Kraftstoffeigenschaft das Klopfverhalten. Eine erhöhte Oktanzahl kann den thermodynamischen Wirkungsgrad verbessern, indem die Schwerepunktage durch den Zündzeitpunkt optimal gelegt werden kann. Eine abgesenkte Oktanzahl bereitet durch das Klopfen Schwierigkeiten, da es zu lauten Verbrennungsgeräuschen oder auch Bauteilschäden führen kann. Hierauf muss mit wirkungsgradverschlechternden Maßnahmen reagiert werden. Zur genauen Beurteilung des Oktanzahlverhaltens der Blendkraftstoffe wurde an einem so genannten CFR-Oktanahlmotor der Einfluss von unterschiedlichen Kraftstoffkomponenten untersucht. In Abbildung 60 ist der Einfluss der Oktanzahl mit unterschiedlichen Methyl-tert-butylether (MTBE)-Raten zu sehen. Je größer der MTBE-Gehalt war, desto höher war die Oktanzahl. Jedoch verhält dieses sog. Oktanzahlboostern für verschiedene chemische Komponenten unterschiedlich. Als Grundkraftstoff der Untersuchungen diente einerseits ein Gemisch aus Isooktan und n-Heptan (PRF, primary reference fuel) sowie Methylcyclohexan (MCH) als Benzinersatzkraftstoff. Letzterer wird häufig für grundsätzliche Vergleiche herangezogen, bietet aber keine Klopf-hemmenden Funktionalitäten. Die Grundkraftstoffe unterscheiden sich in der chemischen Gruppe, PRF ist dabei ein Alkan und MCH ein Cycloalkan. Das Cycloalkan zeigt die geringste Sensitivität auf den Oktanzahlbooster MTBE (ROZ=118). Weitere Ergebnisse können [41] entnommen werden.

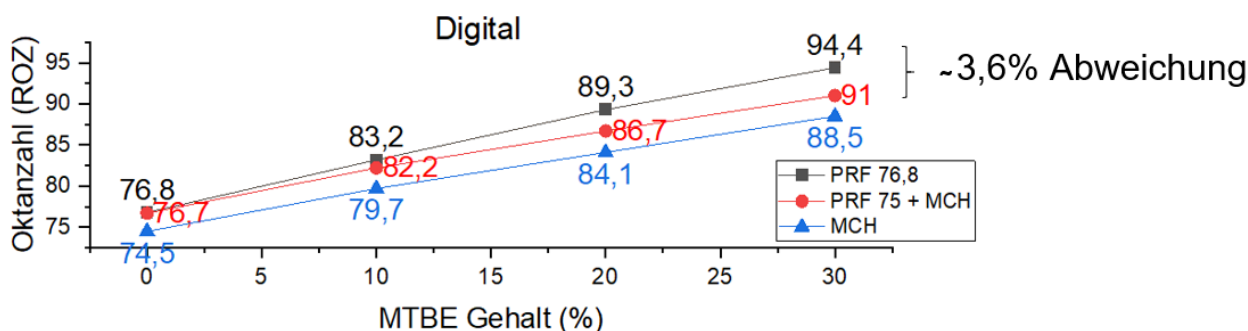


Abbildung 60: Zunahme der Oktanzahl bei Erhöhung des MTBE-Anteils

5.7 Untersuchungen am Vollmotor

Der Fokus der Untersuchungen am Vollmotor lag auf transienten Fahrbedingungen wie zum Beispiel ie zertifizierungsrelevante worldwide harmonized light vehicles test Prozedur(WLTP). Dabei wurden unterschiedliche Temperaturrandbedingungen mit bis zu -20°C untersucht. Um die Unterschiede der Kraftstoffe auf das Emissionsverhalten zu validieren, wurden, wenn nicht anders erwähnt, Rohemissionen, also vor Abgasnachbehandlung, verglichen. Im Einsatz war für die Dieseluntersuchung ein PKW-Aggregat von Mercedes-Benz und für die Benzinuntersuchung ein PKW-Aggregat von Ford. Beide Motoren sind aktuelle Serienaggregate. Bei allen Untersuchungen gilt, dass der Motor mit Seriensteuergerät betrieben worden ist und kein Einfluss auf die Motorsteuerung genommen worden ist. Ein schematischer Prüfstands Aufbau samt Entnahmestellen zur Emissionsbestimmung ist im Unterkapitel Untersuchungen mit Benzin Kraftstoffen zu finden.

5.7.1 Untersuchungen mit Dieselmotoren

Als PKW-Vollmotor kam ein OM654 mit aktuellem Abgasnachbehandlungssystem zum Einsatz. Dieser Motor verfügt über eine Hochdruck- und Niederdruck-AGR sowie einen Dieseloxydationskatalysator (DOC), einen Dieselpartikelfilter (DPF) und einen Stickoxid-(SCR)-Katalysator. Das Verdichtungsverhältnis beträgt 15,5:1 und der Hubraum 1950 cm^3 . In diesen Versuchen wurden transiente Kaltstartzyklen mit den Kraftstoffen B7, R33

und HVO untersucht. Die Abgasemissionen wurden mit folgenden Messsystemen gemessen: AMA4000, FGA, FTIR und DMS500.

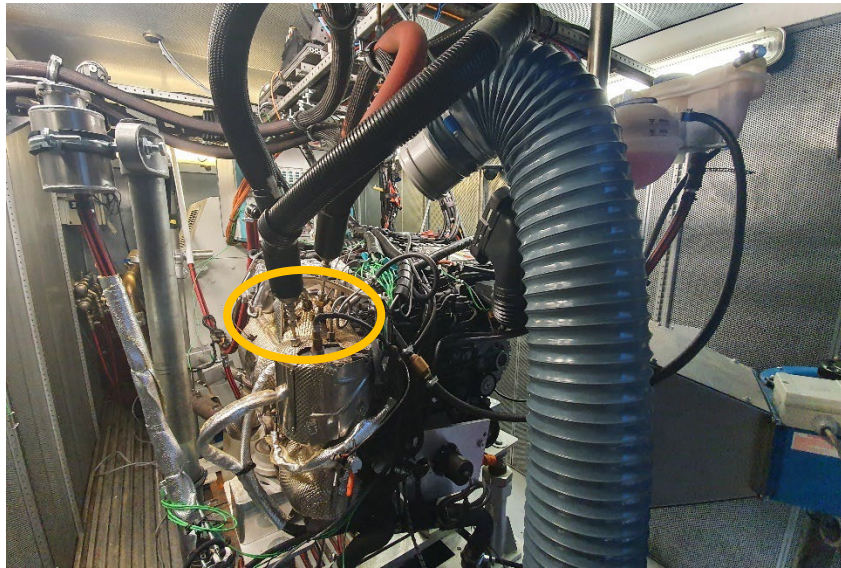


Abbildung 61: Versuchsaggregat OM654 im Kälteprüfstand mit Abgasentnahmestellen vor Abgasnachbehandlung AGN (im Bild markiert)

Zusätzlich zu den transienten Fahrzyklen wurden generische Lastsprünge untersucht. In Abbildung 62 sind die Partikelanzahlemissionen von HVO und Diesel bei einer Lastaufschaltung von $p_{me}=2$ bar auf $p_{me}=14$ bar zu sehen. Die Emissionen verhalten sich vor, während und nach dem Lastsprung nahezu identisch.

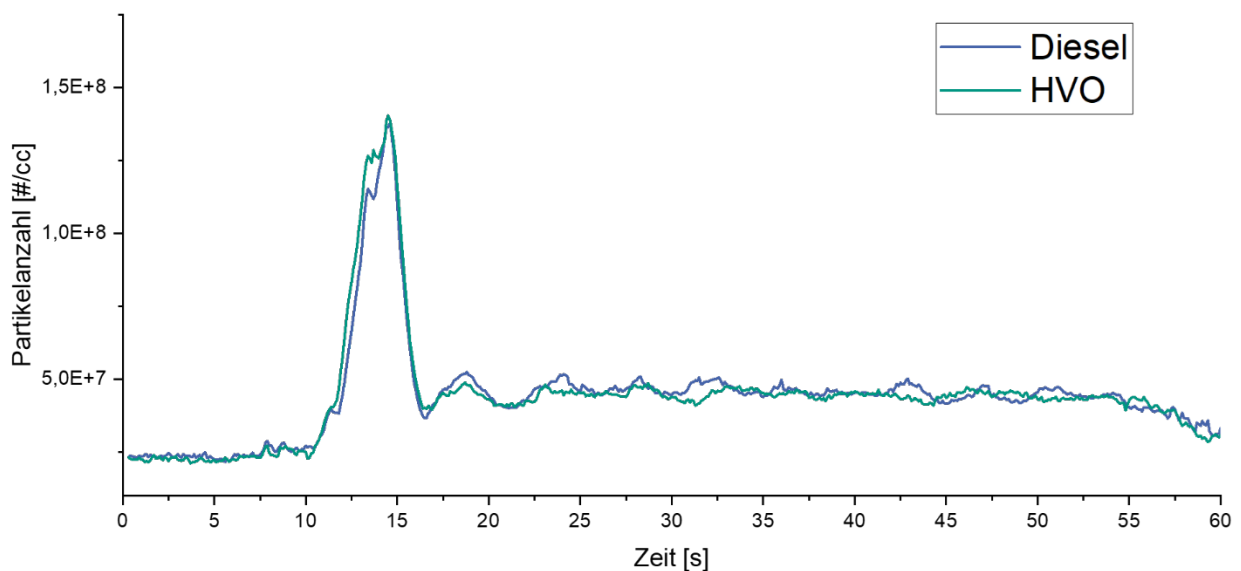


Abbildung 62: Partikelanzahlemissionen bei einem Lastsprung von $p_{me}=2$ bar auf $p_{me}=14$ bar von fossilem Diesel zu HVO.

Um die transienten Messergebnisse besser interpretieren zu können, wurde auch am Vollmotor ähnlich zu den Einzylinderversuchen ein stationäres Kennfeld eingefahren.

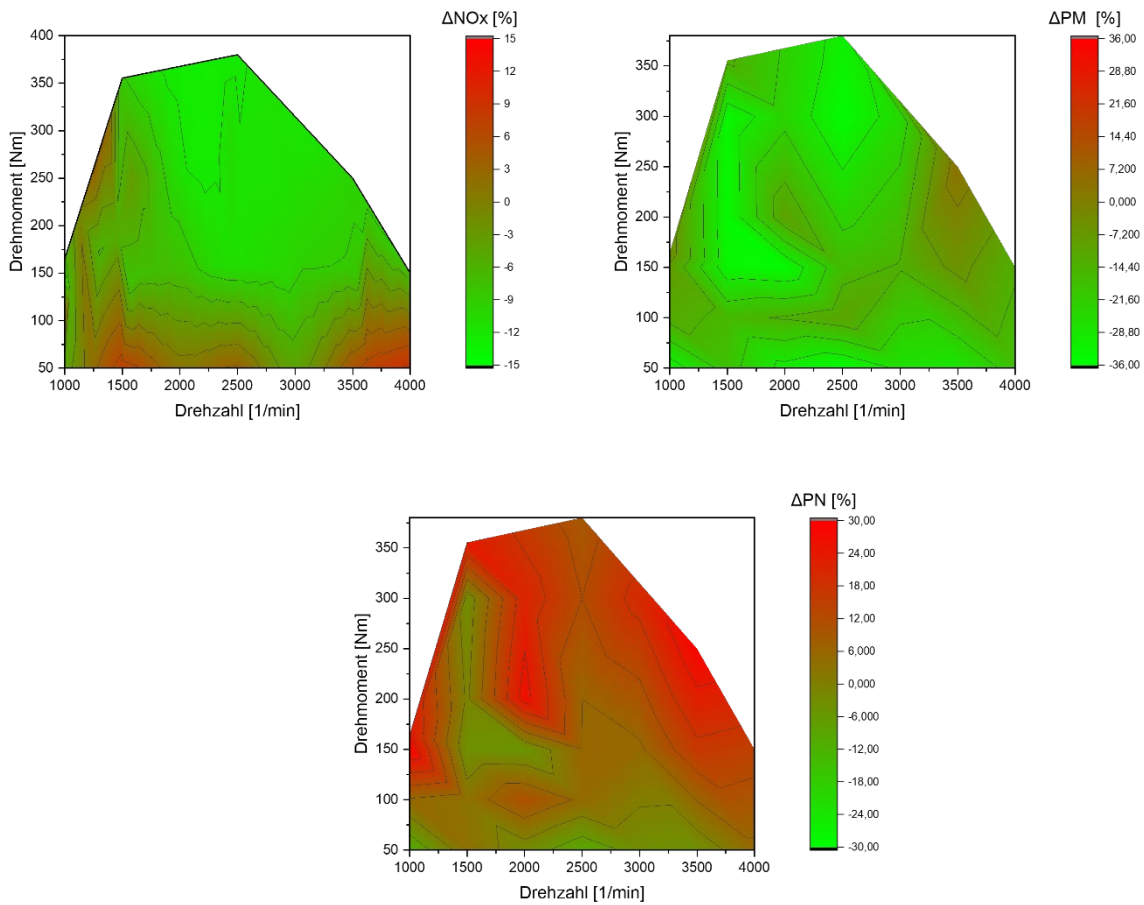


Abbildung 63: Differenzkennfelder der Stickoxidemissionen, Partikelanzahl und Partikelmasse. Δ = B7-HVO.

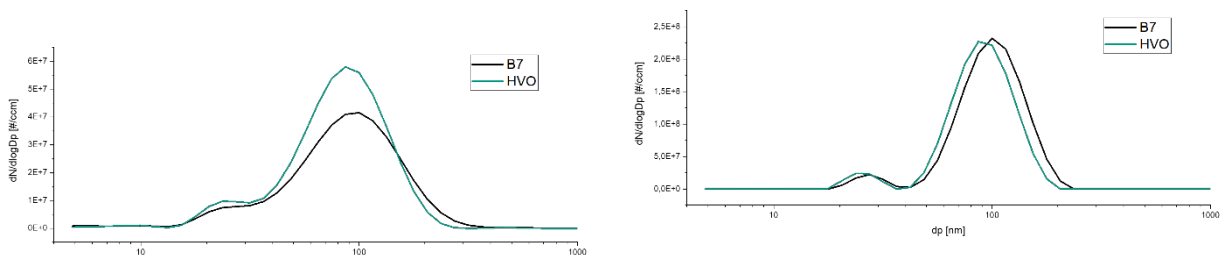


Abbildung 64: Partikelgrößenverteilungen von B7 und HVO. Links: 2000 min⁻¹/300 Nm, rechts: 3000 min⁻¹/50 Nm.

In Abbildung 59 ist das typische Emissionskennfeldverhalten von fossilem Diesel zu paraffinischem Diesel, in diesem Fall HVO zu erkennen. Über weite Bereiche im Kennfeld unterscheiden sich die Stickoxidemissionen wenig. Vor allem bei höheren Lasten sinken die Stickoxidemissionen, da aufgrund der höheren Cetanzahl von paraffinischem Diesel der Anteil der vorgemischten Verbrennung sinkt und somit geringere Brennraumtemperaturen auftreten. Aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung, keine Aromaten, neigt

das HVO zu einem leicht veränderten Partikelverhalten. In den beiden Kennfeldern ist zu erkennen, dass die Partikelanzahlemissionen bei paraffinischem Diesel in den meisten Kennfeldbereich leicht höher liegen, lediglich der untere Lastbereich zeigt ein vorteilhaftes Verhalten. Die Partikelmasse ist jedoch über den kompletten Kennfeldbereich geringer. Dieses zunächst widersprüchliche Verhalten lässt sich mit Abbildung 58 erklären. In dieser Abbildung sind zwei Partikelgrößenverteilungen aufgezeigt. Auf der linken Seite, bei hoher Last, unterscheiden sich sowohl die Maxima als auch der Verlauf der Kurven. Auf der rechten Seite, bei niedriger Last, unterscheidet sich nur der Verlauf der Kurven leicht: HVO ist leicht nach links zu kleineren Partikeln verschoben. Da die Fläche unter der Kurve der gesamten Partikelanzahl entspricht, wird deutlich, dass bei höherer Last eine höhere Anzahl von Partikel vorherrschen. Bei der Partikelmasse zählen vor allem die größeren Partikel, also je weiter rechts wir im Diagramm liegen. Hier zeigt sich bei beiden Betriebspunkt, dass B7 tendenziell mehr größere Partikel erzeugt, die somit einen großen Einfluss auf die Partikelmasse haben. Die Partikelmasse stellt hier den größeren Einflussfaktor auf die Beladung des Partikelfilters vergleichen mit der Partikelanzahl dar. Da über die meisten Bereiche des Kennfeldes die Partikelmasse bei paraffinischem Diesel geringer ist, lässt sich mit einer optimierten Betriebsstrategie die Anzahl der Regenerationszyklen verringern und somit Kraftstoff einsparen.

Das bessere PN-Verhalten spiegelt sich auch in den transienten Kaltstartzyklen wider. Als Testzyklen wurden ein WLTP mit einer Dauer von 30 Minuten und eine aggressive RDE-Fahrt mit einer Dauer von circa 10 Minuten. Das Last- und Drehzahlprofil ist Abbildung 65: Drehzahl/Drehmomentprofil der verwendeten Zyklen zu entnehmen.

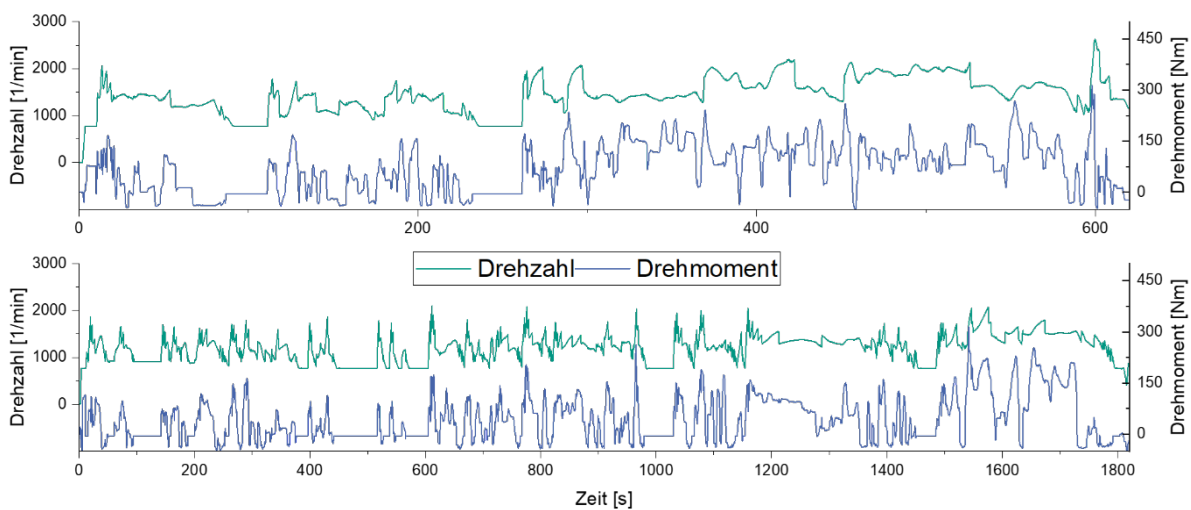


Abbildung 65: Drehzahl/Drehmomentprofil der verwendeten Zyklen. Oben RDE, unten WLTP

In Abbildung 66 sind die Ergebnisse eines WLTP-Zyklus mit einer Starttemperatur von -7°C dargestellt. Als Referenz dient wiederum B7-Diesel, zusätzlich wurde R33 und HVO untersucht. Die Stickoxidemissionen sind für alle drei Kraftstoffe auf demselben Niveau und zeigen keine relevanten Unterschiede. Bei der Partikelanzahl, wie bereits oben erwähnt, zeigt paraffinischer Diesel in niedrigen Lastbereichen Vorteile bei den Emissionen. Dies wird in den fünf niederlastigen rot markierten Abschnitte erkennbar: R33, das einen Anteil an HVO besitzt, zeigt ein etwas besseres Verhalten wie B7, HVO dagegen zeigt eine große Verbesserung.

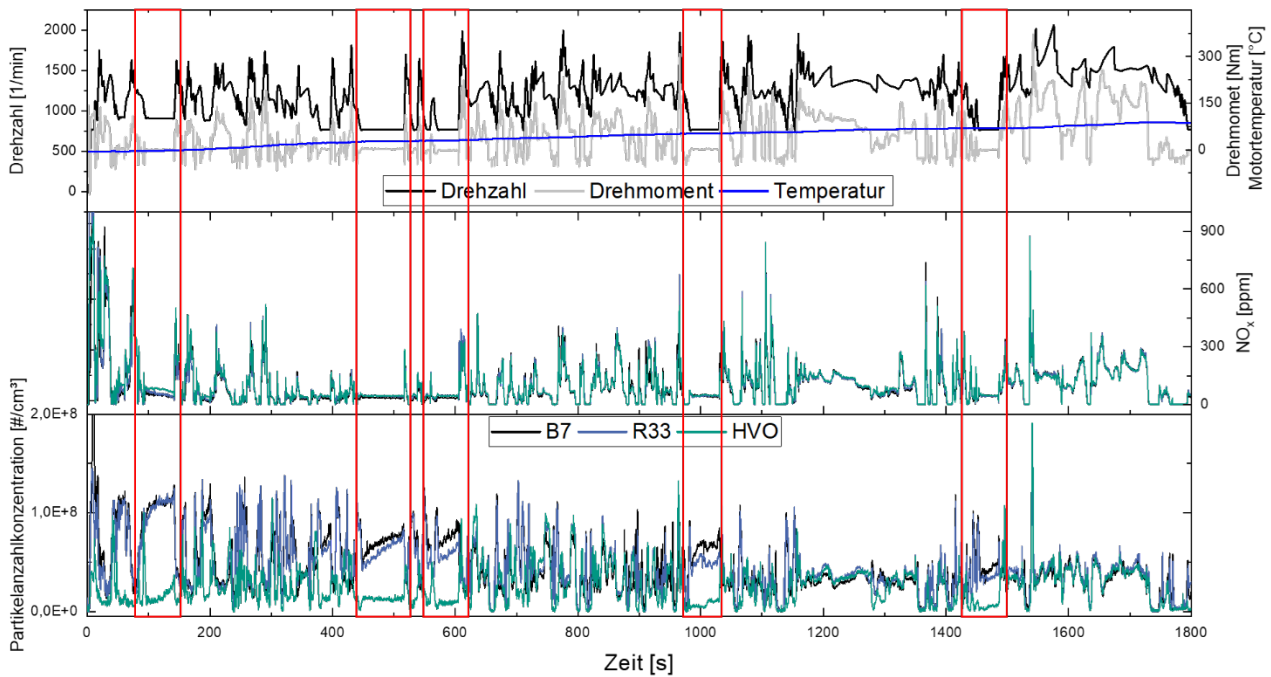


Abbildung 66: WLTP-Zyklus mit einer Starttemperatur von -7°C

5.7.2 Untersuchungen mit Benzinkraftstoff

Im Rahmen der Untersuchungen mit Benzinkraftstoff kam ein Dreizylinder-Volllmotor mit Direkteinspritzung der Firma Ford zum Einsatz. Dieser besitzt einen Hubraum von 999 cm³ und ein Verdichtungsverhältnis von 10,0:1. Zur Analyse der Abgasemissionen wurde eine AMA4000, DMS500 und FTIR eingesetzt. Der Motor war auch allen drei Zylindern indiziert. Als Kraftstoffe wurden fossiler E5, G40 und G85 untersucht.

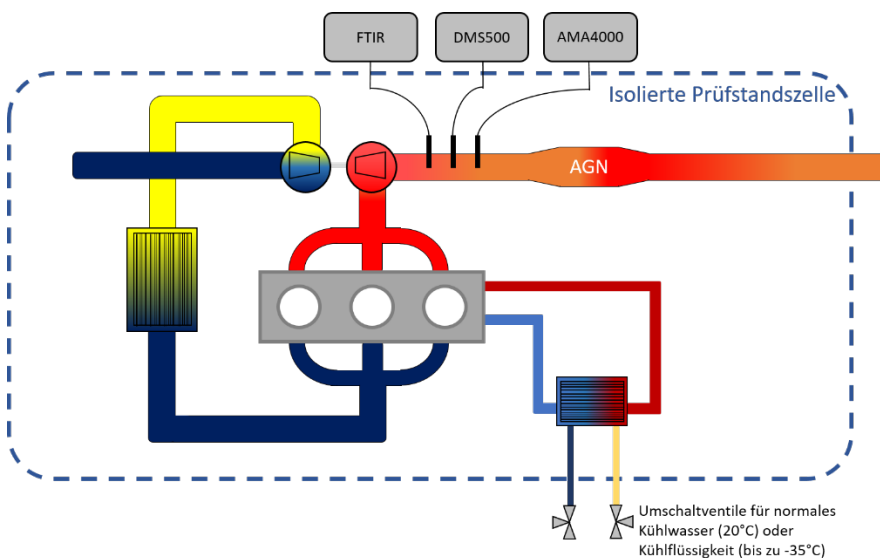


Abbildung 67: Schematisches Prüfstandschemata für die Kaltstartuntersuchungen mit Abgasentnahmesonden vor Abgasnachbehandlung.

Wie auch bei den Dieseluntersuchungen wurde auch hier zunächst das Lastsprungverhalten und die stationären Emissionen untersucht. In Abbildung 68 sind die stationären Partikelanzahlmissionen von E5, G40

und G85 aufgezeigt. Im warmen Motorzustand unterscheiden sich G40 und G85 lediglich minimal. Beide haben einen leichten Vorteil gegenüber E5.

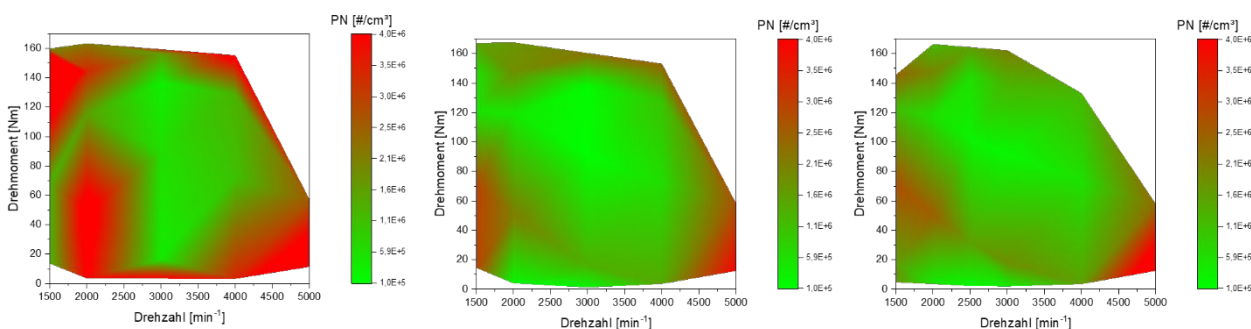


Abbildung 68: PN-Emissionen von E5, G40 und G85(von links nach rechts)

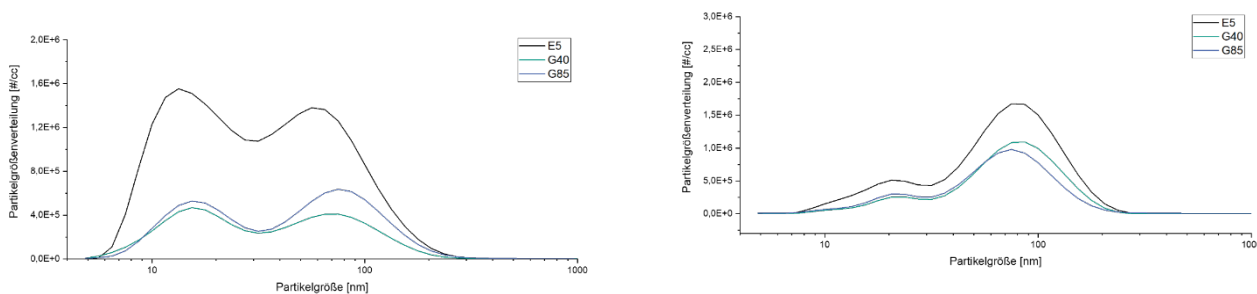


Abbildung 69: Partikelgrößenverteilung bei 2000min-1/120Nm (links) und 4000min-1/70Nm (rechts)

Dieses Verhalten ist auch in der Partikelgrößenverteilung zu erkennen. G40 und G85 zeigen ein sehr ähnliches Verhalten, E5 schneidet im Schnitt leicht schlechter ab.

Im Lastsprung ist das Verhalten von G40 und G85 wieder ähnlich, jedoch zeigt das niedrigere Siedeende von G85 ein Effekt auf die Partikelemissionen. Vor allem zu Beginn, bei sehr kaltem Motor, zeigt G85 ein besseres Verhalten gegenüber G40 und E5

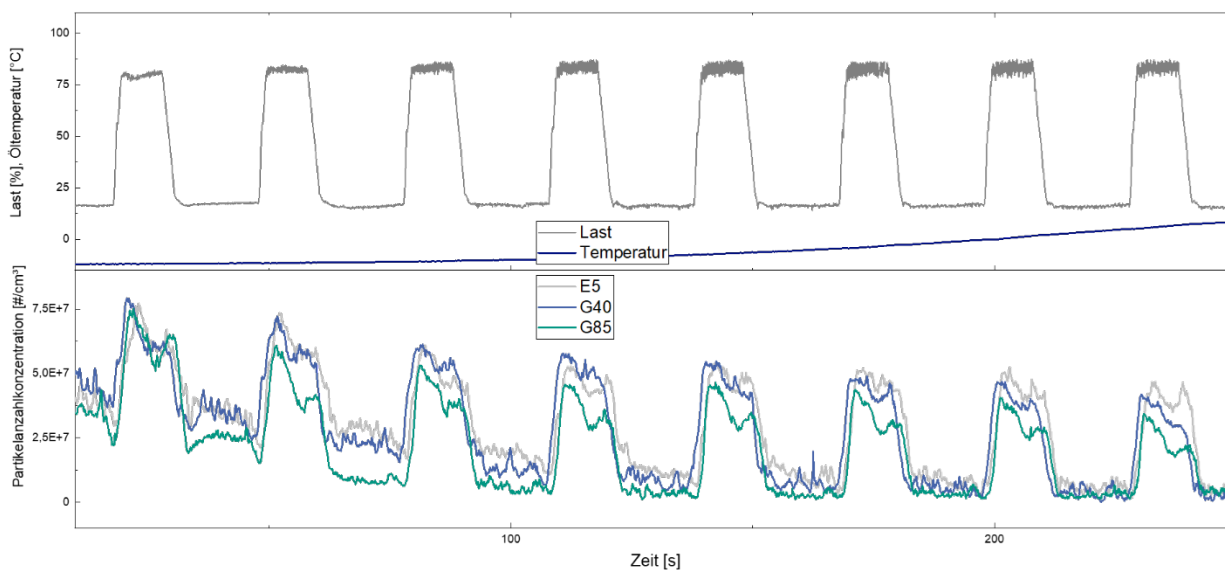


Abbildung 70: Lastsprünge bei 2000 min-1 bei einer Starttemperatur von -10°C

Im stationären warmen Kennfeld sind die Unterschiede zwischen G40 und G85 sehr gering. Dieses Verhalten ist auch bei den folgenden Lastsprüngen zu erkennen, in denen der Motor die Betriebstemperatur von 90 °C erreicht, siehe Abbildung 71: Lastsprünge bei 2000 min-1 . Dort unterscheiden sich alle drei Kraftstoffe nur noch minimal.

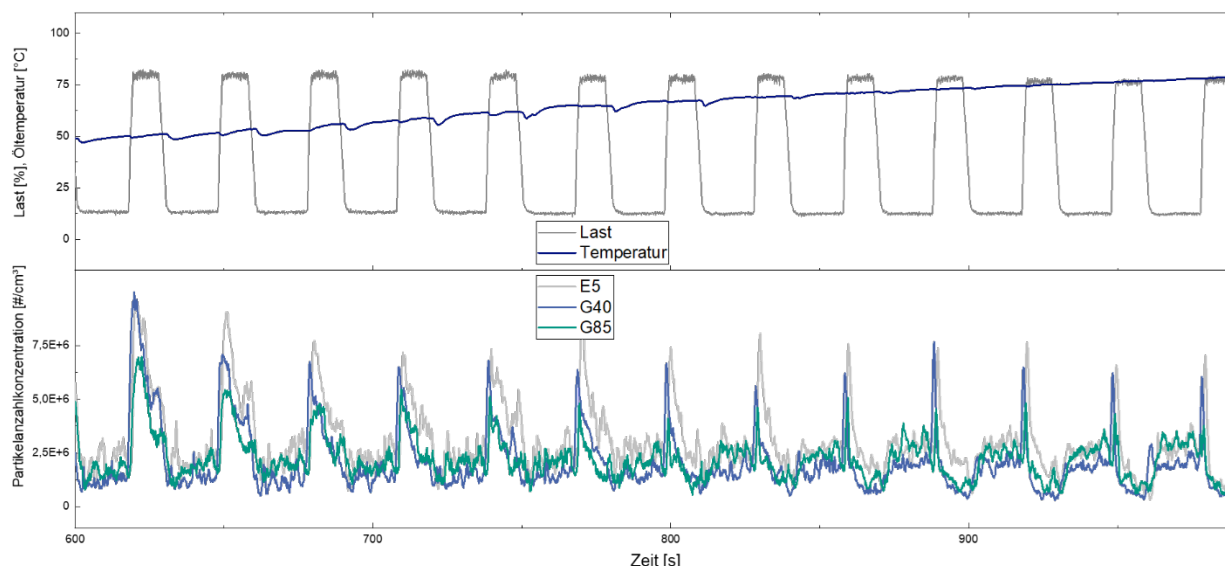


Abbildung 71: Lastsprünge bei 2000 min-1 zwischen 50°C und 90°C

Um einen möglichen Einfluss des Kraftstoffes auf die Ölverdünnung zu untersuchen, wurde folgende Testprozedur durchgeführt. Nachdem am Motor ein Ölwechsel durchgeführt worden ist, wurde nach fünf Minuten Betriebszeit die Referenzölprobe gezogen. Im Anschluss an diese Probe wurden drei 30-minütige WLTP-Zyklen bei unterschiedlichen Starttemperaturen gefahren. Im Anschluss an den dritten Zyklus wurde somit nach insgesamt 90 Minuten Betriebszeit die Verdünnungsölprobe gezogen und in Relation zur Referenzölprobe gesetzt.



Abbildung 72: Ablauf der Ölverdünnungsuntersuchung: 3x 30 Minuten WLTP-Zyklen mit unterschiedlicher Starttemperatur

Tabelle 13 Ergebnisse Ölverdünnung. Δ = Ölprobe – Referenzölprobe

Fuel	E5	G40	G85
Δ -Kraftstoffverdünnung	2,9 %	2,7 %	2,6 %
Δ -Viskosität 40°C	-6,76 mm ² /s	-7,29 mm ² /s	-5,95 mm ² /s
Δ -Viskosität 100°C	-0,89 mm ² /s	-0,9 mm ² /s	0,68 mm ² /s

G40 und G85 verhalten sich sehr ähnlich zu E5. Es sind in der Ölverdünnung keine negativen Effekte zum Kraftstoffeintrag zu erkennen. Da das Siedeverhalten alle Kraftstoffe ähnlich ist, konnte ein solches Verhalten erwartet werden.

Für die Beurteilung des Emissionsverhaltens im transienten Betrieb wurde wiederum der niederlastige WLTP-Zyklus und ein aggressiver RDE-Zyklus ausgewählt. Das Leistungsprofil sowie die Dauer sind [42] zu entnehmen.

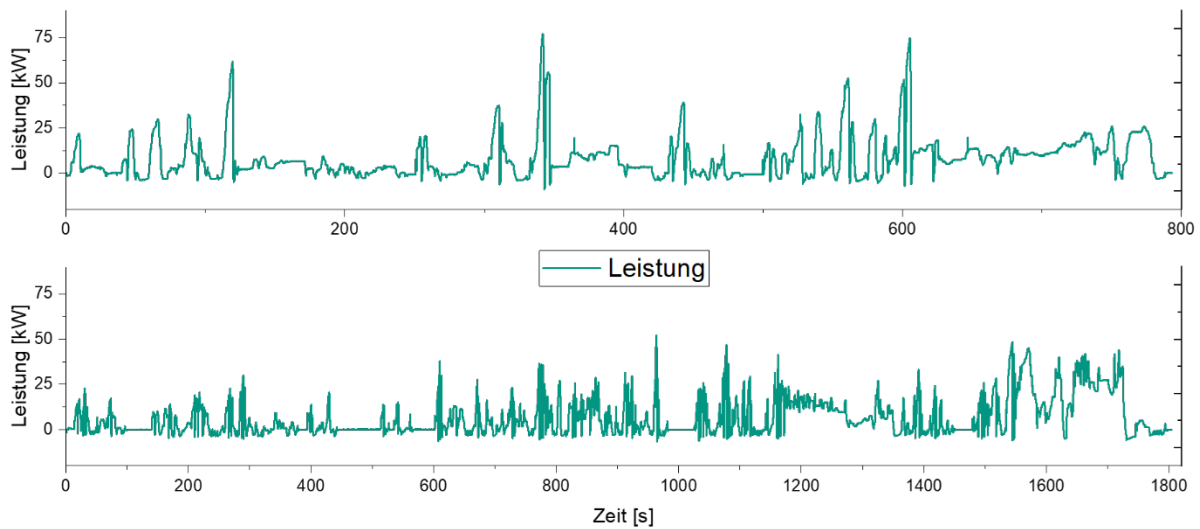


Abbildung 73: Leistungsprofile von RDE-Zyklus (oben) und WLTP-Zyklus (unten)

In Abbildung 74 sind die spezifischen gasförmigen Emissionen für verschiedene Starttemperaturen im WLTP-Zyklus dargestellt. Über den kompletten Temperaturbereich verhalten sich die Emissionen sehr ähnlich. Bei CO sowie den NO_x liegt G40 unterhalb von E5, die THC-Emissionen sind leicht erhöht. Die höhere Oktanzahl von G40 spielt im niederlastigen WLTP-Zyklus keine Rolle. Aufgrund des erhöhten Ethanolgehalts von G40 und damit einhergehend die erhöhte Verdampfungsenthalpie kommt den Stickoxiden im Teillastbereich zu Gute. Kein Kraftstoff zeigt ein auffälliges Verhalten, die geringen Unterschiede würden nach der Abgasnachbehandlung nicht mehr zu erkennen sein.

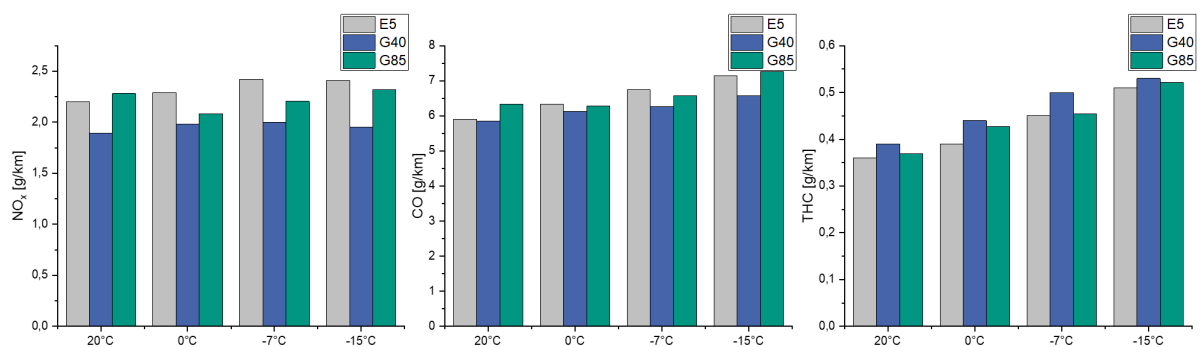


Abbildung 74: Spezifische WLTP-Emissionen von E5, G40 und G85 bei verschiedenen Starttemperaturen

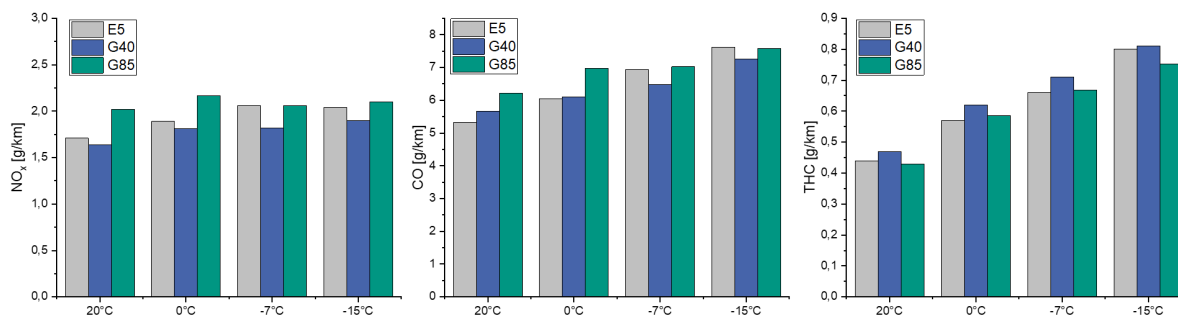


Abbildung 75: Spezifische RDE-Emissionen von E5, G40 und G85 bei verschiedenen Starttemperaturen

Bei den spezifischen RDE-Emissionen sieht das Ergebnis ähnlich aus. G40 zeigt seinen Vorteil bei den Stickoxidemissionen, G85 zeigt einen leichten Vorteil bei den THC-Emissionen, der mit dem verringerten Siedepunkt zusammenhängen kann. Eine minimale Verschlechterung gegenüber E5 und G40 zeigt G85 bei CO.

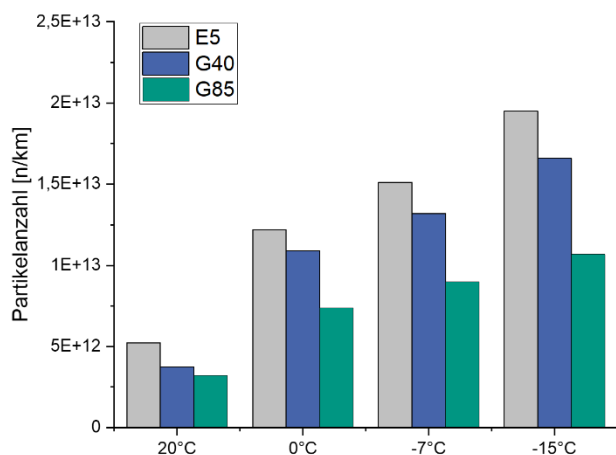


Abbildung 76: PN-Emissionen von E5, G40 und G85 bei verschiedenen Starttemperaturen

Im Partikelverhalten werden jedoch größere Unterschiede zwischen den Kraftstoffen bemerkbar. G40 zeigt bereits über alle Temperaturen ein verbessertes PN-Verhalten gegenüber E5, unter anderem durch den erhöhten Sauerstoffgehalt und der niedrigeren Siedepunkt-Temperatur. Das Siedepunkt von G85 liegt nochmals unterhalb von G40. Dies hat den Einfluss, dass die Partikelemissionen mit G85 weiter abnehmen. In Abbildung 77: PN-Verlauf bei -15°C RDE-Test ist der PN-Verlauf bei -15°C zu Beginn des Zyklus dargestellt. Der Verlauf von E5 und G40 ähneln sich sehr, G85 zeigt vereinzelt Vorteile. Die Verläufe der Emissionen spiegeln die Erkenntnisse der Stationärpunkte sowie der Lastsprünge wider.

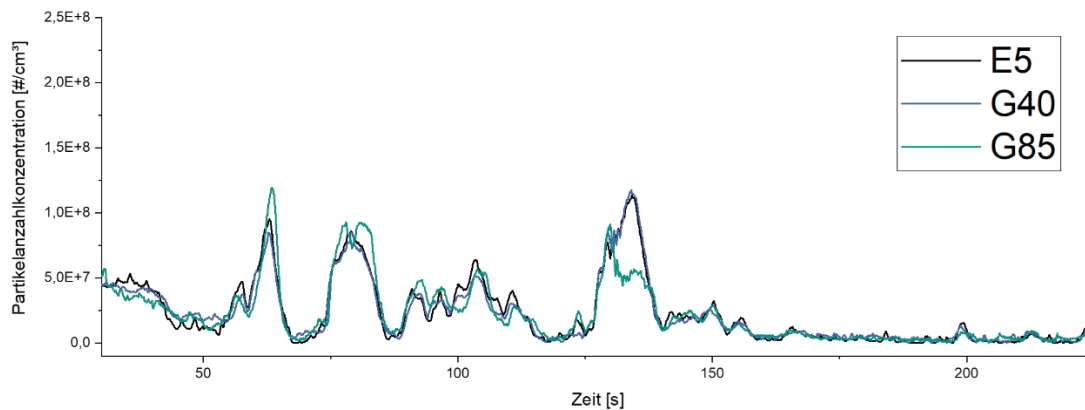


Abbildung 77: PN-Verlauf bei -15°C RDE-Test

5.8 Reale Emissionsmessungen auf der Straße (RDE)

5.8.1 Allgemeine Anforderungen

Um die reFuels-Kraftstoffe umfassend bewerten zu können, ist das Emissionsverhalten im tatsächlichen Fahrbetrieb durch die Prüfung von Fahrzeugen auf der Straße unter normalen Fahrbedingungen mit normalem Fahrmuster und mit normaler Nutzlast nachzuweisen. Real-Driving-Emission-Messungen (RDE) dienen dazu, das reale Emissionsverhalten von Fahrzeugen im alltäglichen Gebrauch zu untersuchen. Die Emissionsmessungen unter realen Betriebsbedingungen sind ein wichtiger Schritt, um realistische Angaben zum Schadstoffausstoß von Fahrzeugen zu bekommen. Die RDE-Gesetzgebung fordert, dass RDE-Tests mit portablen Emissionsmesssystemen (PEMS) durchgeführt werden müssen. Das PEMS wird an der Pkw-Anhängekupplung installiert und dient zur Bestimmung der Schadstoffkonzentrationen (PN, NO, NO_x und CO, CO₂) direkt am Ende des Abgasstranges. Im Rahmen des Projekts „reFuels-Kraftstoffe neu denken“ konnte am IFKM, KIT ein PEMS der Firma AVL beschafft werden. Mit dem AVL PEMS-System wurden RDE-Fahrten mit verschiedenen Kraftstoffen, sowohl mit Diesel- als auch mit Benzinfahrzeugen, durchgeführt. Dies ermöglicht eine belastbare und aussagefähige Bewertung des Emissionsverhaltens für verschiedene Kraftstoffe durchzuführen.

Ein RDE-Test muss eine Fahrt unter realen Straßenbedingungen entsprechend abbilden können. Sie besteht zu etwa 34 % aus Stadtbetrieb, ca. 33 % aus Landstraßenbetrieb und ca. 33 % aus Autobahnbetrieb. Die Mindeststrecke für den Stadt-, den Landstraßen- sowie den Autobahnbetrieb beträgt jeweils 16 km. Im Stadtbetrieb ist eine maximale Fahrzeuggeschwindigkeit von 60 km/h zulässig. Zum Überlandteil zählen Fahrzeuggeschwindigkeiten zwischen 60 - 90 km/h. Eine Geschwindigkeit über 90 km/h wird dem Autobahnanteil zugeordnet. Die Dauer der Fahrt muss zwischen 90 und 120 Minuten betragen. Die Fahrsequenz beginnt in der Stadt und wird ohne Unterbrechung auf Landstraßen und Autobahnen fortgesetzt. Diese Fahrsequenz ist in der Abbildung 79 dargestellt. Hier ist auffällig, dass der Landstraßenbetrieb über die Testdauer nicht zusammenhängend ist. Dies liegt daran, dass die Route durch städtische Gebiete hindurchführt und somit dem Stadtanteil zugeordnet wird.

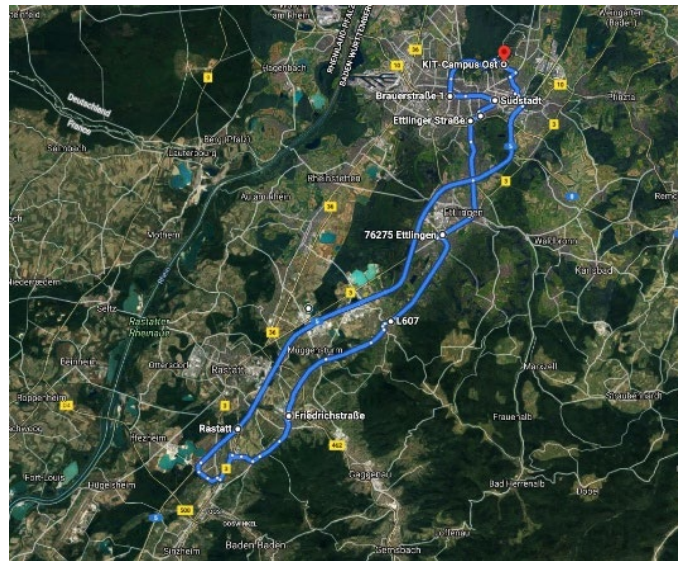


Abbildung 78: Entwickelte RDE-Route am IFKM

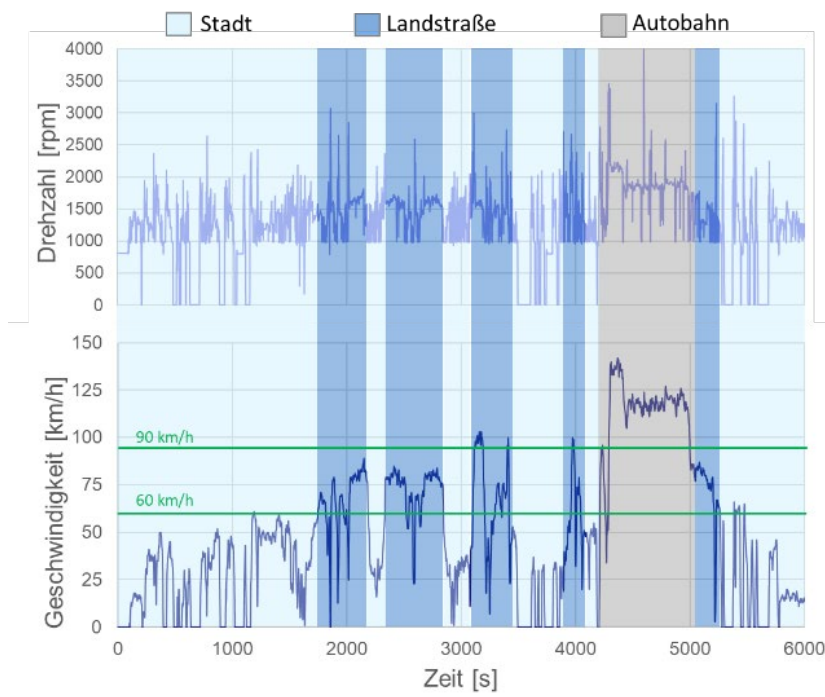


Abbildung 79: Motor- und Fahrzeuggeschwindigkeitsverläufe bei der RDE-Fahrt

Im Rahmen des Projekts „reFuels-Kraftstoffe neu denken“ wurden mehrere RDE-Tests mit insgesamt 5 verschiedenen Diesel- und Benzinfahrzeugen durchgeführt. Die mobilen Messgeräte, d.h. Gas-PEMS, PN-PEMS und EFM, wurden an den Testfahrzeugen aufgebaut und die RDE-Fahrten wurden sowohl mit reFuels-Kraftstoffen als auch mit fossilen Kraftstoffen durchgeführt. In Folgenden sind die Bilder und Spezifikationen von den Testfahrzeugen zu sehen.



Diesel-Testfahrzeuge



- VW Passat 2,0 L Dieselfahrzeug
- Schadstoffklasse: Euro 4
- Kilometerstand: 210.000 km
- Baujahr: 2008
- RDE-Tests mit B7 und R33
- Bereitgestellt durch IFKM-KIT



- Audi Q3 Sportback 2,0L Dieselfahrzeug mit SCR
- Schadstoffklasse: Euro 6d
- Kilometerstand: 2000 km
- Baujahr: 2019
- RDE-Tests mit B7 und R33
- Bereitgestellt durch Audi

Benzin-Testfahrzeuge



- Skoda Fabia III Combi 1,0 L Ottofahrzeug
- Schadstoffklasse: Euro 6b
- Kilometerstand: 23000 km
- Baujahr: 2018
- RDE-Tests mit G40 und E5
- Bereitgestellt durch IFKM, KIT





- Ford Tourneo 1,0 L Ottofahrzeug
- Schadstoffklasse: Euro 6d
- Kilometerstand: 3000 km
- Baujahr: 2019
- RDE-Teests mit G40 und E5
- Bereitgestellt durch Ford



- Mazda3 mit Sky X Motor 2,0 L
- Schadstoffklasse: Euro 6
- Kilometerstand: 5000 km
- Baujahr: 2019
- RDE-Tests mit G40, G85 und E5
- Bereitgestellt durch MAHLE

5.8.2 Ergebnisse der RDE-Messungen für die Dieseldieselkraftstoffe

Die RDE-Fahrten mit den Dieselfahrzeug wurden sowohl mit R33 als auch mit dem fossilen Kraftstoff B7 durchgeführt. In Folgenden Abbildungen sind die beispielhaften Ergebnisse der RDE-Fahrten mit den Dieseltestfahrzeugen dargestellt.

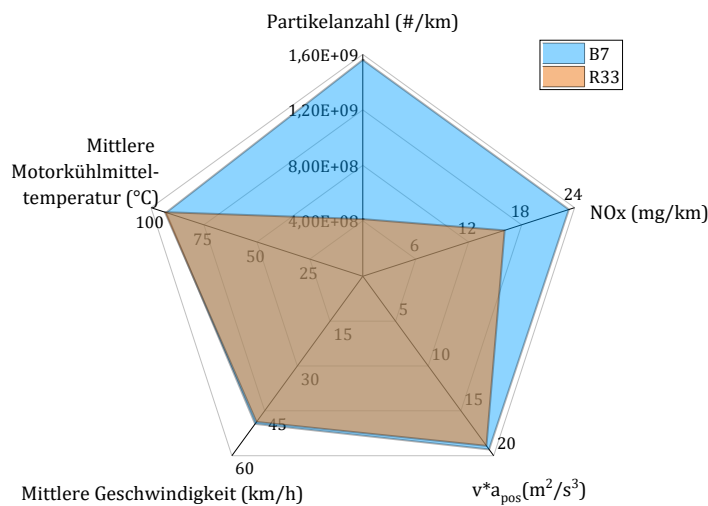


Abbildung 80: Ergebnisse der RDE-Fahrten mit Audi Q3 für R33 und B7, Fahrmodus: Efficiency

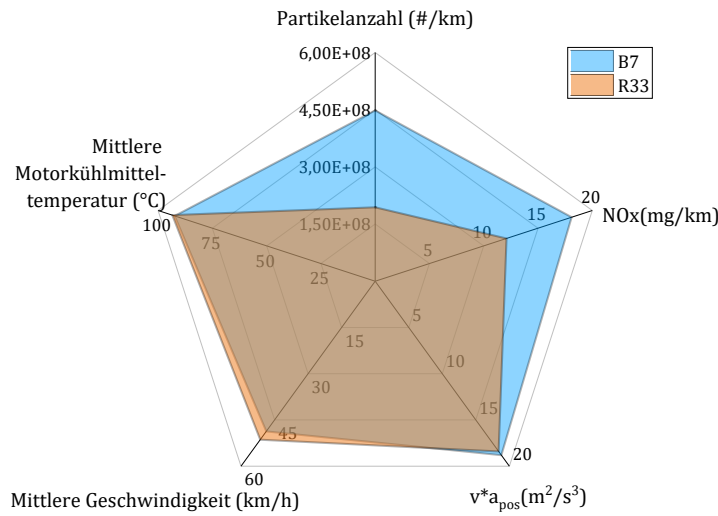
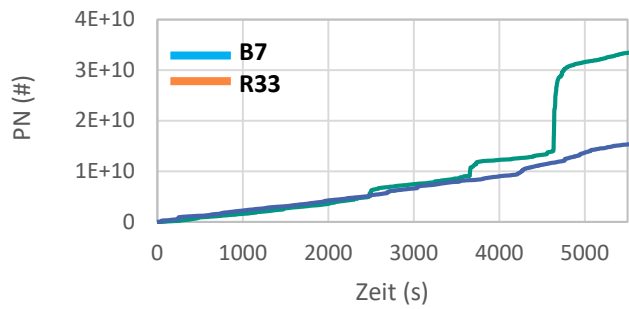
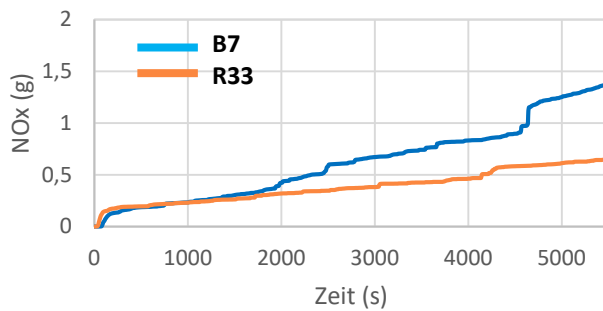
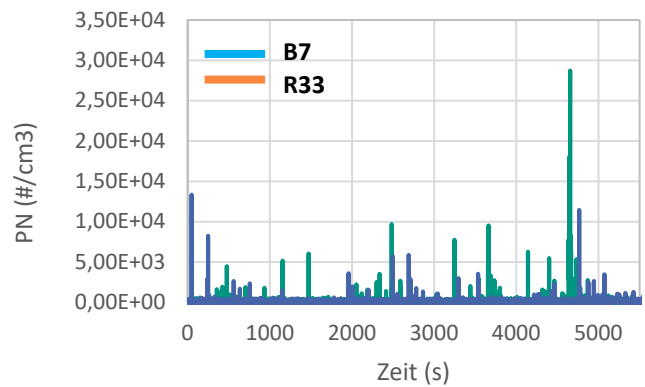
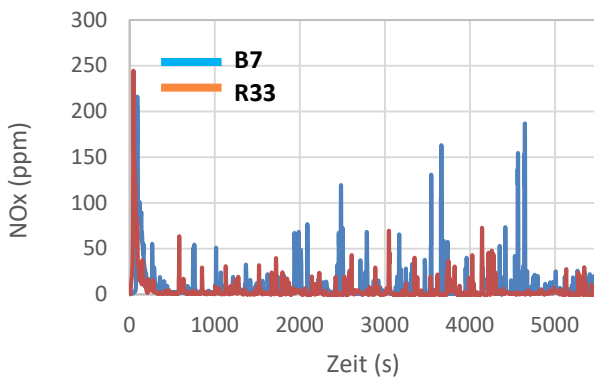


Abbildung 81: Ergebnisse der RDE-Fahrten mit Audi Q3 für R33 und B7, Fahrmodus: Dynamic



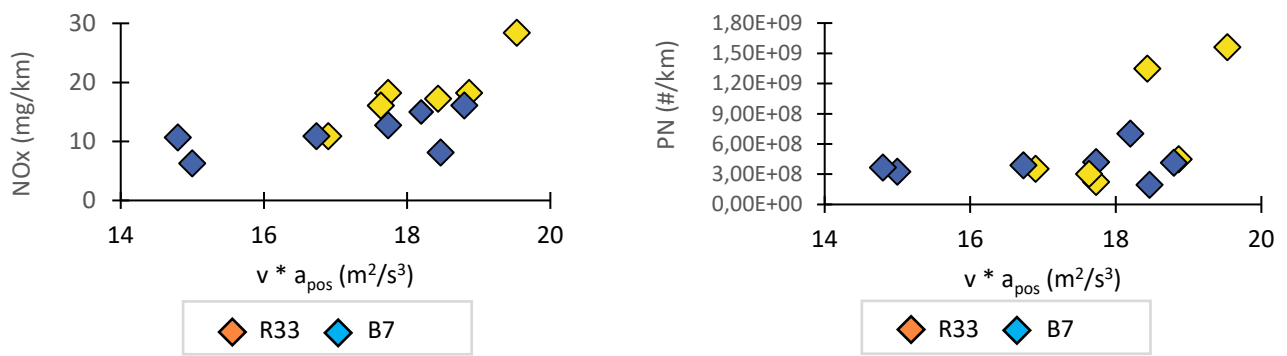
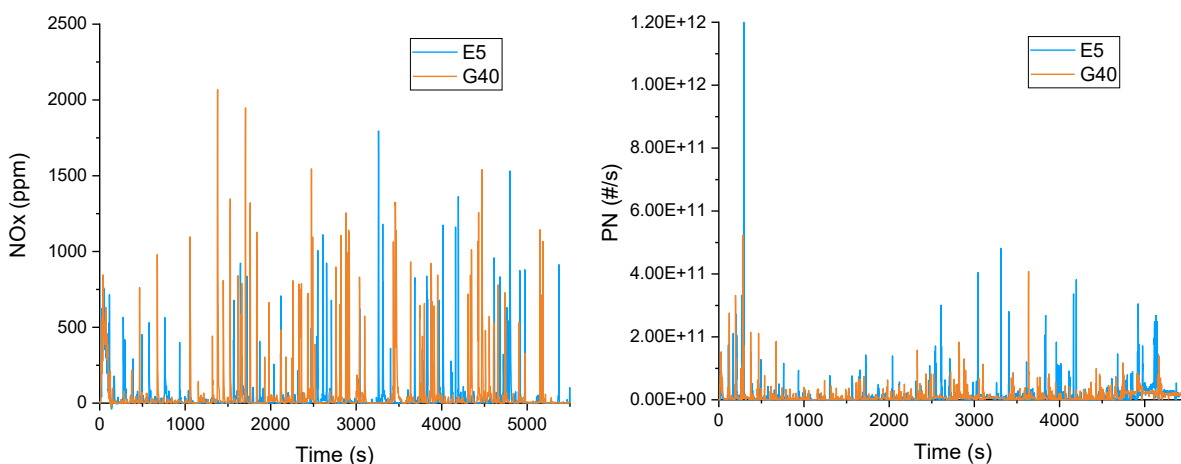


Abbildung 82: Vergleich zwischen R33 und B7 in Bezug auf NOx-Emissionen und Partikelanzahl für Audi Q3

Wie in Abbildung 80 bis Abbildung 82 zu sehen ist, zeigen die RDE-Fahrten mit B7 und R33 ein großes Potenzial bei der Reduzierung der NO_x- und Partikel-Emissionen beim Einsatz von reFuels-Kraftstoffen im Vergleich zum konventionellen Diesel B7. Weitere RDE-Tests bestätigen auch das gleiche Potenzial bei Verwendung der reFuels-Kraftstoffe. Generell ist hier jedoch anzumerken, dass bei allen Fällen die Emissionen deutlich unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte liegen.

5.8.3 Ergebnisse der RDE-Messungen für die Benzinkraftstoffe

Die RDE-Fahrten mit den Benzinfahrzeug wurden sowohl mit dem reFuels-Benzinkraftstoff als auch mit dem fossilen Kraftstoff E5 durchgeführt. Im Folgenden Abbildungen sind die beispielhaften Ergebnisse der RDE-Fahrten mit Benzin-Testfahrzeuge dargestellt.



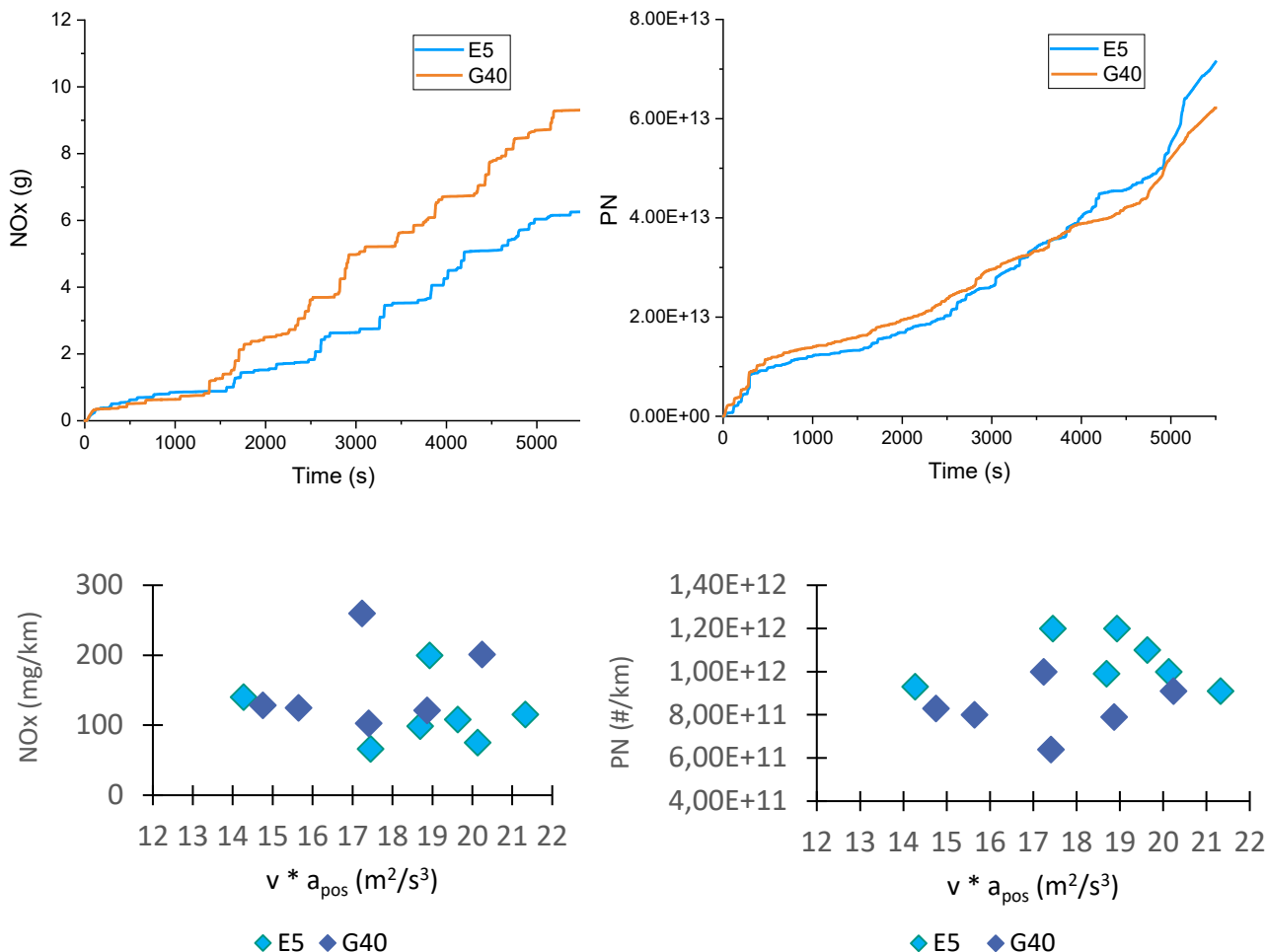


Abbildung 83: Vergleich zwischen G40 und E5 in Bezug auf NOx-Emissionen und Partikelanzahl für Skoda Fabia

Für das Testfahrzeug Skoda Fabia ist anzumerken, dass dieses im Gegensatz zu den beiden anderen ottomotorischen Versuchsfahrzeugen noch mit einer EURO 6b-Zertifizierung zugelassen wurde und damit nicht auf eine Erfüllung der RDE-Emissionsgrenzwerte entwickelt wurde. Er ist somit ein geeignetes Beispiel für ältere Antriebsstrang-Konzepte, die aber in großer Stückzahl im Feld sind.



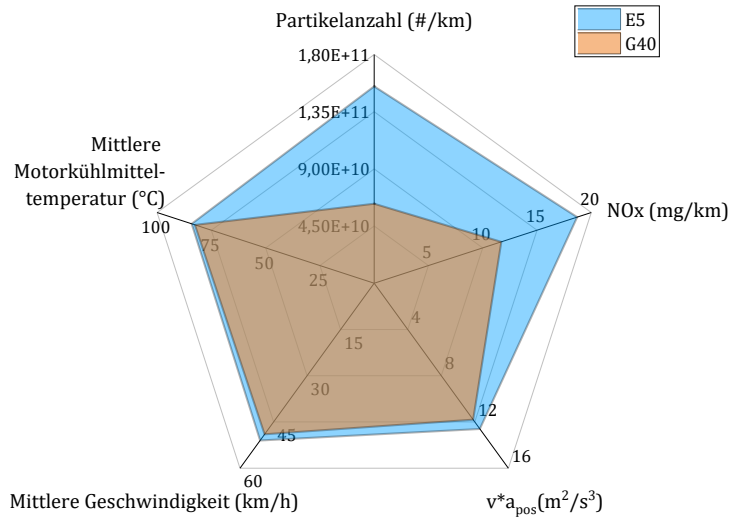


Abbildung 84: Ergebnisse der RDE-Fahrten mit Ford Tourneo für G40 und E5, Startpunkt Motorkühlmitteltemperatur = -2 °C

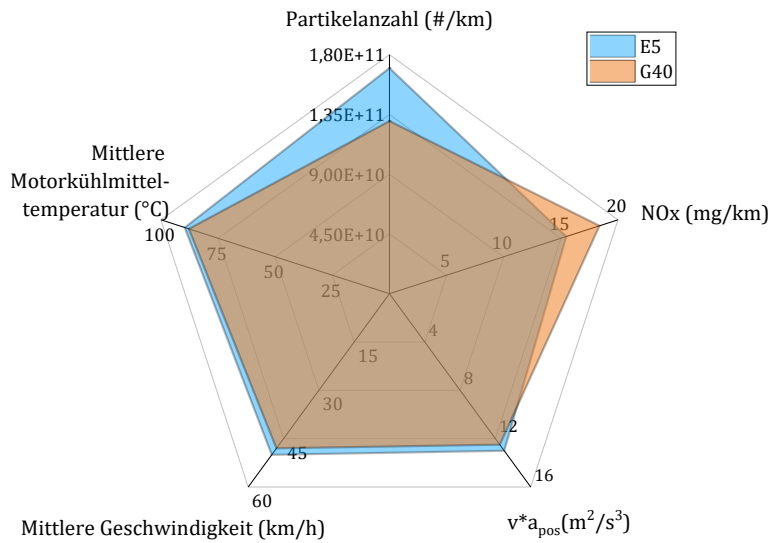


Abbildung 85: Ergebnisse der RDE-Fahrten mit Ford Tourneo für G40 und E5, Startpunkt Motorkühlmitteltemperatur = 19 °C

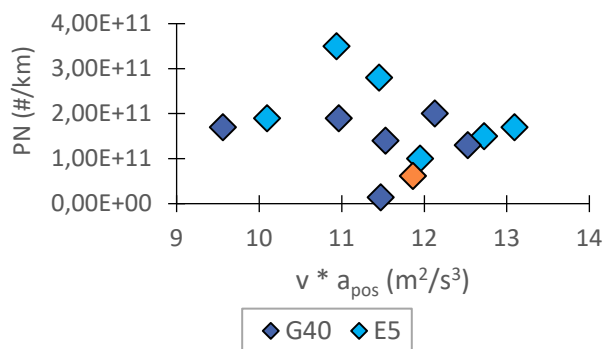
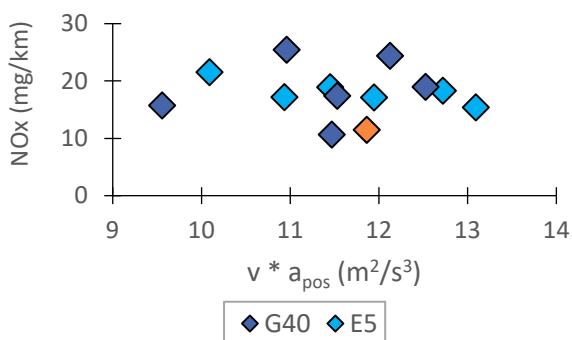
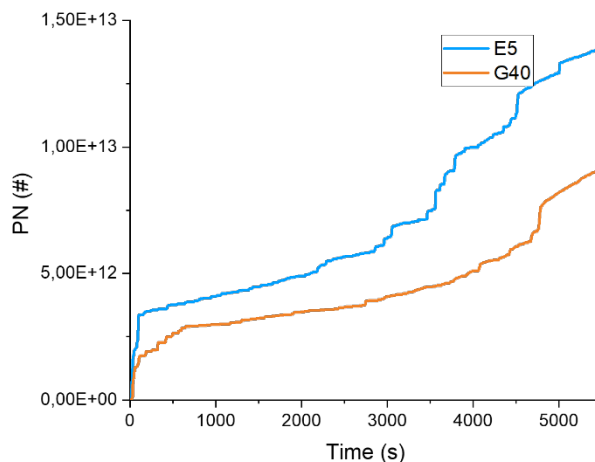
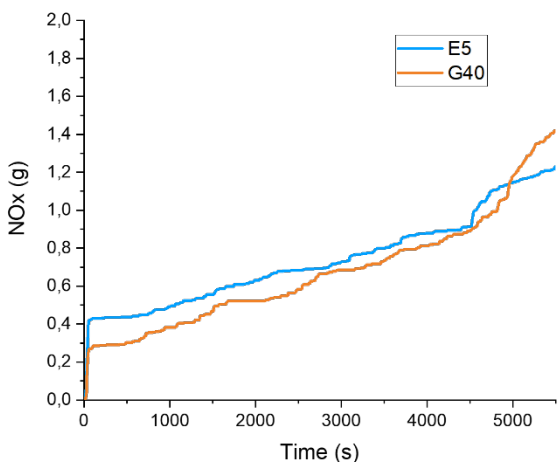
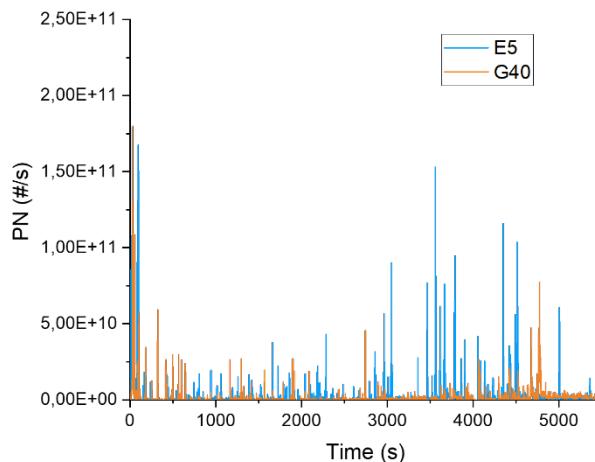
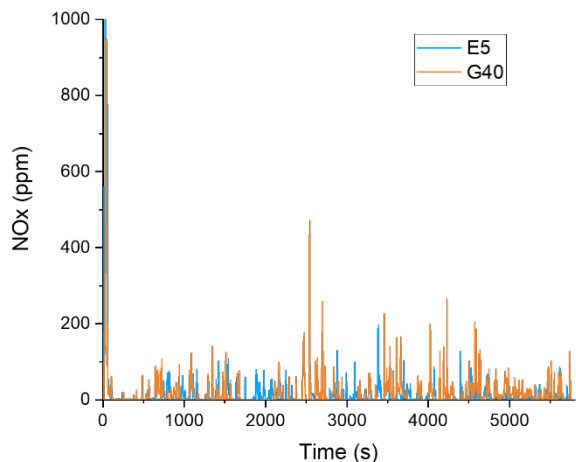


Abbildung 86: Vergleich zwischen G40 und E5 für Ford Tourneo in Bezug auf NO_x-Emissionen und Partikelanzahl

Wie in den Abbildung 83 bis Abbildung 86 zu sehen ist, zeigen die Ergebnisse einen Vorteil bei den Partikel-Emissionen für G40 im Vergleich zum konventionellen Benzin E5. Darüber hinaus sind bei dem NO_x-Verhalten





keine wesentlichen Unterschiede zwischen E5 und G40 zu erkennen. Auch andere RDE-Fahrten zeigen das gleiche Verhalten beim Einsatz der reFuels-Kraftstoffe.

Ein weitergehender Test des Kraftstoffblends G40 erfolgte durch Tests des reFuels Partners Mahle an einem Mazda 3 Skyactiv-X, der mit einem sehr auf Kraftstoffeigenschaften angepassten Otto-Brennverfahren arbeitet. Der Motor nutzt in weiten Bereichen des Kennfeldes eine sogenannte zündfunkenunterstützte Kompressionszündung, was reduzierte Rohemissionen und geringen Verbrauch kombiniert. Dieses Brennverfahren sollte sensitiv auf die für die Entflammung relevanten Parameter (Oktanzahl, Siedekurve, Verdampfungsenthalpie etc.) reagieren. Der für die Tests bei Mahle genutzte Skyactiv-X Motor hat eine Verdichtung von 16:1 und nutzt bei der Kompressionszündung ein mageres Gemisch im Bereich Lambda 1,5...2,0. Die Tests erfolgten in einer RDE-ähnlichen Fahrstrecke im Osten von Stuttgart. Über eine gesamte Fahrstrecke von mehreren 1000 km wurde kein signifikanter Verbrauchsunterschied bei der Verwendung des reFuels Blend G40 gegenüber der Referenz mit Tankstellenkraftstoff E10 festgestellt. Als Indikator für den Einfluss der Kraftstoffeigenschaften auf das Brennverfahren wurde analysiert, wie häufig der Motor mit Kompressionszündung betrieben wird. Dies wurde anhand des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses bewertet.

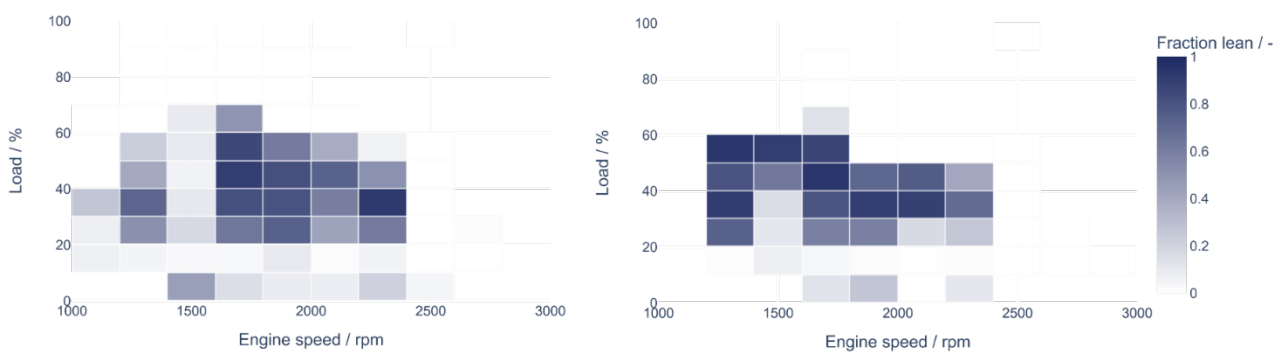


Abbildung 87: Häufigkeit der Nutzung des mit der Kompressionszündung verknüpften Magerbetriebes im Vergleich zwischen reFuels Blend G40 und Tankstellenkraftstoff E10 in einem Vergleichstest der Fa. Mahle mit einem Mazda 3 Skyactiv-X

5.9 Flottenversuch Lila Logistik/Porsche Logistik mit synthetischem paraffinischem Diesel

Anfang 2020 startete eine Testreihe mit paraffinischem Diesel auf der Basis von HVO-Kraftstoff bei der Logistikfirma Müller – Die lila Logistik Route GmbH mit der Unterstützung von Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG Logistikplanung Strategie & Standards. Auf dem Betriebshof von Lila Logistik wurde eine Tankstelle aufgestellt, die für den Testbetrieb mit HVO befüllt wurde.

Der Test läuft auf verschiedenen Nutzfahrzeugen von unterschiedlichen Herstellern. Dabei werden immer Fahrzeugpaare gebildet, die dieselbe Strecke mit ähnlicher Beladung fahren. Je ein Fahrzeug mit konventionellem Diesel und ein Fahrzeug mit HVO betankt. Nach dem ersten erfolgreichen Jahr wurde der Versuchsbetrieb auf eine größere Fahrzeugflotte und zusätzliche Anwendungsszenarien (höhere Anteile Stadtbetrieb) ausgeweitet. Insgesamt konnten so über 1.000.000 km ohne Ausfall oder Probleme zurückgelegt werden und die Durchschnittsverbräuche der Kraftstoffe unterschieden sich nicht. Zusätzlich gibt es eine begleitende Ölauswertung, die Ende 2023 abgeschlossen sein wird, aber bisher unauffällig ist.



5.10 Weitere motorische Untersuchungen

Neben den Untersuchungen am IFKM wurden weitere Versuche mit den verschiedenen Kraftstoffen untersucht. So wurde zum Beispiel eine 70 Jahre alte Shovelhead-Harley mit G85-Benzinkraftstoff betankt. Auch dieser alte Motor mit Vergaser vertrug den Kraftstoff ohne Probleme [43].

Bei der Deutschen Bahn AG wurden Untersuchungen mit HVO durchgeführt. Dort kamen ältere Motoren mit Pumpe-Düse-System oder Reiheneinspritzpumpe zum Einsatz. Die Motoren zeigten keine Auffälligkeiten. Der aufgenommene Zylinderdruck zeigte keine erhöhten Belastungen für den Motor. Wie auch bei den oben gezeigten Versuchen am Vollmotor zeigt HVO vor allem in niederlastigen Bereichen Vorteile hinsichtlich der Partikelemissionen. Dies wäre zum Beispiel am Bahnsteig zum Vorteil, insbesondere bei Fahrzeugen, die noch nicht über eine entsprechende Abgasnachbehandlung verfügen.

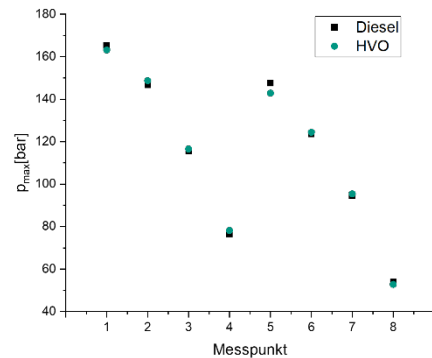


Abbildung 88: Spitzendruck bei verschiedenen Betriebspunkten

5.11 Fazit der motorischen Untersuchungen

Die durchgeführten umfangreichen Untersuchungen umfassten sowohl Grundlagenversuche zur Beurteilung verbrennungsseitiger Einzelaspekte als auch die vollumfängliche Bewertung in realen Einsatzfall auch bei tiefen Umgebungstemperaturen sowohl mit drop-in-fähigen Kraftstoffmischungen innerhalb der bestehenden Kraftstoffnormen EN 228 für Benzin als auch EN 590 für Diesel als auch mit Kraftstoffen innerhalb der EN 15 940 und zeigen durchgehend die vollumfängliche Einsatzfähigkeit dieser Kraftstoffe. Die eingesetzten Versuchsträger reichen von Straßenfahrzeugen mit aktueller Emissionszertifizierung und älterer Bauart bis hin zu Schienenfahrzeugen und decken damit einen weiten Bereich der Bestandsflotte ab.

Sowohl emissions- als auch betriebsseitig zeigen die Kraftstoffe ein sehr ähnliches Betriebsverhalten zu bestehenden konventionellen Kraftstoffen, teilweise mit leichten Vorteilen hinsichtlich Schadstoffemissionen als auch Kraftstoffverbrauch. Eine Anpassung der Motoren und Fahrzeuge an die Versuchskraftstoffe muss nicht erfolgen, eine Kraftstoffsubstitution ist direkt möglich. Die Materialverträglichkeitsuntersuchungen zeigten keinerlei Auffälligkeiten, sondern ein sehr vergleichbares Verhalten typischer Werkstoffe mit konventionellen Kraftstoffen.

Insgesamt kann die Einsatzfähigkeit der untersuchten Kraftstoffe aus technischer Sicht bestätigt und befürwortet werden. Kein Kraftstoff trat dabei negativ in Erscheinung. Neben dem kraftstoffinherenten CO₂-Einsparungspotential können teilweise auch noch leichte Verbrauchseinsparungen durch Wirkungsgradsteigerungen erzielt werden.

6 Cluster C: Technologiepartnerschaft reFuels

Andresh, Manuel; Haase, Martina; Patyk Andreas, Scheer, Dirk; Schmieder, List (ITAS)

Kölle, Christoph, Landgraf, Monika (SEK)

Im Cluster C „Technologiepartnerschaft reFuels“ wurden gesellschaftspolitische, umweltbewertende und kommunikationsbezogene Aspekte thematisiert. Es standen dabei folgende Themenstellungen im Vordergrund, deren Projektergebnisse im Folgenden zusammenfassend dargestellt werden:



- C1: Systemanalyse und Nachhaltigkeitsbewertung
- C2: reFuels und Zivilgesellschaft
- C3: Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation mit den Stakeholdern

6.1 Cluster C1: Systemanalyse und Nachhaltigkeitsbewertung

6.1.1 Systemanalyse

Schmieder, Lisa; Scheer, Dirk (ITAS)

Im Bereich **Systemanalyse** wurde eine Desk Research-basierte Dokumentenanalyse zur Eruierung von Kraftstoffen in unterschiedlichen wissenschaftlichen Energiesystemanalysen durchgeführt. Die ausführlichen Ergebnisse wurden im Arbeitsbericht Schmieder, Scheer [44] veröffentlicht.

Zentrale Forschungsfrage war dabei, die Rolle von regenerativen Kraftstoffen (sowohl fortschrittliche Biokraftstoffe und strombasierte Kraftstoffe) in energiebezogenen Gesamtsystemanalysen zu untersuchen. Dabei stehen unterschiedliche Strategien im Verkehrssektor, einzelne Charakteristika der verschiedenen Kraftstoffrouten sowie die betrachteten Kraftstofftypen im Vordergrund. Die Analyse der verschiedenen Transformationspfade mit Blick auf regenerative Kraftstoffe wurde methodisch über eine Desk Research-basierte Dokumentenanalyse durchgeführt. Hierbei wurden relevante Studien aus den letzten sechs Jahren identifiziert, die auf die Rolle von diesen Kraftstoffen in klimaschutzorientierten Transformationspfaden fokussieren. Das Sample beinhaltet sowohl Studien zum gesamten Energiesystem als auch sektorspezifische Szenarien zum Verkehr, die jeweils unterschiedliche methodische Vorgehensweisen abdecken.

Auf der Basis einer ersten Sichtung der Studien wurde ein vergleichendes Analyseraster erarbeitet, um die Bedeutung der Kraftstoffe in den Transformationspfaden vergleichend zu erfassen. Dabei standen folgende inhaltliche Aspekte bei der vergleichenden Auswertung im Vordergrund, deren Ergebnisse nachfolgend ausschnittsweise dargestellt werden.

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

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





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

Die Mehrzahl der Studien sieht eine geringe Rolle für **Biokraftstoffe** und damit ein begrenztes Potenzial zur Deckung des Kraftstoffbedarfs im Rahmen der Defossilisierung des Verkehrssektors (45, 46, 47, 48). Eine Studie stuft Biokraftstoffe kurz- und mittelfristig als wichtig ein während zwei Studien keine Verwendung von Biokraftstoffen im Transformationsprozess (49, 50) vorsehen. [51] und [52] weisen zudem darauf hin, dass alternative Optionen für den Biomasseeinsatz in konkurrierenden Sektoren bestehen. Biomasse kann beispielsweise volkswirtschaftlich effizienter in der Industrie und im Energiesektor mit höheren Wirkungsgraden eingesetzt werden [52].

Mit Blick auf **strombasierte Kraftstoffe** sind sich die Studien weitgehend einig, dass insbesondere für die Erreichung einer 95%igen Treibhausgasreduktion (gegenüber 1990) der Einsatz dieser Kraftstoffe von Relevanz ist. Die meisten Autoren sind sich zudem einig, dass für eine (kostenoptimale) Erreichung des 80%-Klimaziels strombasierte Kraftstoffe nicht zwingend notwendig sind (z.B. 52, 53). Kurzgefasst: für einen ambitionierten Klimaschutz sind synthetische Kraftstoffe notwendig – für einen minimalen Klimaschutz dagegen nicht. Synthetische Kraftstoffe sind dabei aus Sicht der meisten Autoren stets als Ergänzung zu anderen Technologien, wie der Elektromobilität, zu sehen und sollen aufgrund von Energieumwandlungsverlusten insbesondere dort Anwendung finden, wo es keine direktelektrischen Alternativen gibt (z.B. 54, 52, 55, 47, 48).

Mit Blick auf die betrachteten **Einsatzgebiete** von synthetischen Kraftstoffen sind sich die Autor*innen der Studien einig, dass strombasierte Kraftstoffe insbesondere für jene Bereiche, die nicht (wirtschaftlich) direktelektrisch versorgt werden können – also der Flug- und Schiffsverkehr auf längeren Strecken – zukünftig von besonderer Relevanz sind (z.B. 54, 56, 57, 46, 49). [56] betonen darüber hinaus, dass das Erreichen des Klimaziels im Schwerlastverkehr ohne den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen nicht möglich sein wird. Andere Autoren (bspw. 54, 50) sehen alle Verkehrsträger, die heute mit fossilen Kraftstoffen bzw. fossil erzeugten Energieträgern betrieben werden als relevant für den zukünftigen Einsatz synthetischer Kraftstoffe an; hierzu gehören folglich ebenfalls Pkw-Langstreckenfahrzeuge sowie Nutzfahrzeuge als auch Pkw-Fahrzeuge im Bestand.

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

- Für Biokraftstoffe sieht die Mehrheit der Studien nur ein begrenztes Mengenpotenzial zur Deckung des Kraftstoffbedarfs im Rahmen der Defossilisierung des Verkehrssektors. Dies wird vor allem sowohl mit Nachhaltigkeitsaspekten, wie bspw. Flächennutzungskonkurrenzen oder dem Verlust von Biodiversität begründet. Zudem bestehen alternative Optionen für den Biomasseeinsatz in konkurrierenden Sektoren.



- Mit Blick auf strombasierte Kraftstoffe sind sich die Studien weitgehend einig, dass insbesondere für die Erreichung einer 95%igen Treibhausgasreduktion gegenüber 1990 der Einsatz dieser Kraftstoffe von Relevanz ist.
- Hinsichtlich der betrachteten Einsatzgebiete von synthetischen Kraftstoffen sind sich die Autor*innen der Studien einig, dass strombasierte Kraftstoffe insbesondere für jene Bereiche, die nicht (wirtschaftlich) direktelektrisch versorgt werden können – also der Flug- und Schiffsverkehr auf längeren Strecken – zukünftig von besonderer Relevanz sind. Darüber hinaus sieht eine Mehrheit der Studien auch einen Einsatz im Güter- bzw. Schwerlastverkehr als auch (für Langstreckenfahrten) im Pkw-Bereich.

Potenziale und Grenzen von reFuels hinsichtlich Produktion und Nutzung wurden aus unterschiedlicher Perspektive analysiert. In der Gesamtschau der Studien lassen sich mit Blick auf Potenziale und Grenzen der Produktion und des Einsatzes von reFuels die folgenden übergreifenden Aspekte herausdestillieren:

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

Zusammenfassend können die wichtigsten Ergebnisse zur Rolle von reFuels in Energiesystemanalysen zu folgenden Ergebnisthesen präzisiert werden:

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

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





These 2: Grundlegende Übereinstimmung von Klimaschutzszenarien mit großer Diversität bei konkreter Szenarienspezifikation

Die Grundstruktur der identifizierten Transformationspfade ist in den Studien sehr ähnlich angelegt: Basisszenarien als Trendfortschreibung eines „weiter so“ – minimale (Fokus 2 Grad) und ambitionierte (Fokus 1,5 Grad) Klimaschutzorientierung bei nahezu identischer Raum- und Zeitperspektive. Bei der Schwerpunktsetzung unterscheiden sich die Szenarien hinsichtlich konkreter Klimaschutzpolitiken, Technologiepriorisierung und Konkretisierung von verkehrspolitischen Maßnahmen. Häufig ist in den Studien aufgrund des verwendeten ökonomischen Gleichgewichtsmodells eine Kostenoptimierung für das Gesamtsystem enthalten. Dabei wird entweder technologieoffen oder mit Technologiepräferenzen der kostenoptimalste volkswirtschaftliche Pfad berechnet. Daneben werden auch zukünftige Nachfrageentwicklungen (bspw. Verkehrsleistung, Fahrzeugbestand etc.) abgeleitet und darauf aufbauend Umweltemissionen, Energiebedarf sowie Bedarf an bestimmten Energieträgern ermittelt. Eine singuläre Ergebnisdimension enthält die Agenten basierte Simulation mit der Frage nach Zubaubedarf für PtX-Anlagen [58].

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

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

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

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



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

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

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

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

6.1.2 Nachhaltigkeitsbewertung

Andresh, Manuel; Patyk Andreas, Haase, Martina (ITAS)

Im Bereich der Nachhaltigkeitsbewertung wurde eine Ökobilanz durchgeführt.

6.1.2.1 Hintergrund

Die Anforderungen an neue Verfahren und Produkte hinsichtlich ihrer Umweltfreundlichkeit gehen über die Einhaltung von Grenzwerten hinaus. Dies gilt besonders für den Verkehrssektor. Darüber hinaus ist Umwelt nur einer von mehreren Nachhaltigkeitsaspekten (siehe die voran gegangenen Kapitel). Gegenstand dieses Kapitels ist die vergleichende Erfassung und Bewertung der Erzeugung der in reFuels beforschten Kraftstoffe mit ihren fossilen Pendanten anhand von Lebenszyklusbilanzen für ausgewählte Umweltwirkungen.

6.1.2.2 Methode „Ökobilanz“

Ökobilanzen sind Zusammenstellungen und Interpretationen

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

entlang seines gesamten Lebensweges.

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





Das Vorgehen bei der Erstellung von Ökobilanzen ist durch die DIN/EN/ISO-Normen 14040/44 weitgehend vorgegeben [59, 60]. Danach besteht eine Ökobilanz aus vier Phasen:

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

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

6.1.2.3 Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie

Die hier getroffenen Festlegungen sind wesentlich für den Erfolg des Projektes. Im Folgenden die Wichtigsten.

6.1.2.3.1 Projektgegenstand und -ziele

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

- A Dieselkraftstoff aus der mikroverfahrenstechnischen (MVT) Fischer-Tropsch-Synthese (FT) mit Protonen-Austausch-Membran (PEM)-Elektrolyse (Wasserstoffsynthese) und Reverse Water-Gas-Shift (RWGS, Synthesegaserzeugung)
- B Dieselkraftstoff aus der konventionellen FT-Synthese mit PEM-Elektrolyse und RWGS
- C Ottokraftstoff aus dem bioliq®-Prozess ohne (via DtG - Dimethylether-to-Gasoline) und mit (via MtG – Methanol-to-Gasoline) Einspeisung von Elektrolyse-Wasserstoff

Ziele des Teilprojektes sind

1. die Identifikation und Quantifizierung der umweltbezogenen Vor- und Nachteile der einzelnen reFuels-Pfade gegenüber fossilen Kraftstoffen,
2. die Identifikation von Hot Spots und - soweit in dieser Studie möglich - die Entwicklung von Vorschlägen zur Optimierung,
3. die Dokumentation und Diskussion der Ergebnisse in einer für Kommunikationszwecke nutzbaren Form.

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

6.1.2.3.2 Funktion und Funktionelle Einheit

Die Funktion der untersuchten Systeme besteht in der Bereitstellung von Kraftstoffen. In der Erweiterung auf Fahrzeuglebenszyklen besteht die Funktion in der Bereitstellung von Transportleistung. Die funktionelle Einheit ist die Menge bereitgestellter Kraftstoffe. Der konkrete Wert im Stoffstrommodell ist der sogenannte Referenzfluss, in dieser Studie ein Megajoule (MJ) Kraftstoff (Heizwerte gemäß [61–63]).

6.1.2.3.3 Systemgrenzen

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





und Infrastruktur werden miterfasst, zum Teil stark vereinfachend, wie es aufgrund der Datenverfügbarkeit gängige Praxis ist.

6.1.2.3.4 Bezugsraum und -zeit

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

6.1.2.3.5 Allokation

Der Begriff steht für die Verteilung von Umweltlasten eines Produktsystems auf mehrere Produkte anhand von Kriterien wie Preis oder Heizwert. Der Allokation vorzuziehen ist gemäß ISO 14044 die Systemerweiterung. Entsprechend werden Allokationen außer denen in der verwendeten Stoffstromdatenbank ecoinvent nur in Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

6.1.2.3.6 Wirkungsabschätzung

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

- Treibhauseffekt (Global Warming Potential über einen Zeitraum von 100 Jahren - GWP 100),
- Feinstaubbildung und
- Verknappung (auch "Verbrauch") fossiler Ressourcen

Die Wirkungsabschätzung in den genannten Kategorien erfolgt gemäß ReCiPe 2016 Midpoint (Hierarchist). Eine Normierung findet nicht statt.

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

Datengenerierung

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

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

Datenqualität

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





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

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

6.1.2.3.8 Kritische Prüfung

Der Bericht wurde während der ersten Phase einer kritischen Prüfung - angelehnt an die DIN/EN/ISO-Normen 14040/44 - durch das Paul Scherrer Institut (PSI) unterzogen. Das Gutachten bestätigt die fachliche Güte und Ergebnisplausibilität der Studie zum Zeitpunkt der Prüfung und anschließenden Anpassungen. Einzelne Szenarien und Gutschriften waren noch nicht enthalten.

6.1.2.4 Prozessketten

Die betrachteten Prozessketten im reFuels Projekt wurden im Rahmen von Technologie-Workshops und Diskussionen festgelegt. Die Prozesse zur Strombereitstellung und die fossilen Referenzen werden prozesskettenübergreifend modelliert (Abschnitt 6.1.2.4.1). Für die FT-Dieselmotor-Route (PtX Route) werden mehrere mögliche CO₂-Quellen sowie Containeranlagen mit MVT Reaktoren und typische Großanlagen mit konventioneller Technik untersucht (Abschnitt 6.1.2.4.2). Für die Ottomotor-Route wird der bioliq®-Prozess mit DME-Synthese in zwei Varianten analysiert: ohne und mit Einspeisung von zusätzlichem Elektrolyse-Wasserstoff (Abschnitt 6.1.2.4.3). Im Folgenden werden die Prozessketten in Fließschemata abgebildet und mit Verweis auf die umfassende gereviewte Dokumentation [64] nur knapp erläutert. Eine Ausnahme bilden die aufgrund ihrer absehbaren Ergebnisrelevanz detaillierter behandelten Strommische.

6.1.2.4.1 Kraftstoffketten übergreifende Prozesse

Strombereitstellung

Zur Gewährleistung möglichst großer Aktualität wurde die Zusammensetzung der Strommische auf Ebene der Energieträger für Deutschland und Europa aus [65] und Agora Energiewende, Sandbag [66] entnommen (Tabelle 14: Zusammensetzung der modellierten Strommische). Die Anteile der verschiedenen Technologien zur Nutzung der einzelnen Energieträger (Beispiel Erdgas: Kraft-Wärme-Kopplung und Gas- und Dampf-Turbinen) und die jeweiligen Spannungsstufen werden aus der ecoinvent Datenbank entnommen.

Für die Gutschrift im bioliq®-Prozess wurde der Strommix aus [67] übernommen, um Vorarbeiten im Bereich der bioliq®-Varianten optimal nutzen zu können.

Tabelle 14: Zusammensetzung der modellierten Strommische

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



Als potenzielle Technologien zur Strombereitstellung aus erneuerbaren Quellen wurden Photovoltaik (PV)- und Windkraftanlagen (WKA) mit dem Standort Deutschland und den damit verbundenen Volllaststunden gewählt. Es wird davon ausgegangen, dass die regenerative Strombereitstellung für die Kraftstoffproduktion mit Anlagen erfolgt, die zusätzlich zu den bestehenden gebaut werden, da anderenfalls der erneuerbare Anteil des allgemein verfügbaren Strommix negativ beeinflusst werden würde. Angesetzte Volllaststunden: PV 1191 h/a, WKA onshore 1717 h/a [67, 68] WKA offshore 3530 h/a [69]. Außerdem wird ein regeneratives 90 %-Szenario betrachtet (Details zur Ableitung und den verwendeten ecoinvent-Datensätzen in der umfassenden Dokumentation [64]).

In zusätzlichen Szenarien wurden PtX-Importe aus Ländern mit günstigeren Bedingungen für die erneuerbare Stromerzeugung untersucht (Tabelle 15). Es wird davon ausgegangen, dass die komplette Prozesskette im Ausland stattfindet und das Produkt anschließend per Schiff transportiert wird. Die Auswahl der Länder und Stromerzeugungstechnologien erfolgte im Rahmen des Projekts.

Tabelle 15: Parameter und Technologien für die Importszenarien

Land / Region	Technologie	Kapazitätsfaktoren	Transport [tkm/kg]
Marokko, Agadir	Hybrid: PV + Wind, onshore	PV 30 %, Wind 17 %	3
Argentinien, Patagonien	Wind, onshore	56 %	17
Australien	Hybrid: PV + Wind, onshore	PV 30 %, Wind 30 %	23
Island	Wind, onshore	45 %	2

Fossile Referenzen

Zur Einschätzung der potentiellen Umweltwirkungen der untersuchten Prozessketten werden diese Wirkungen mit fossilen Referenzprozessen verglichen. Die Referenzprozesse werden ohne Modifikationen aus der Datenbank ecoinvent entnommen (*Market for diesel, low-sulfur (Europe without Switzerland)*, *Market for petrol, low-sulfur (Europe without Switzerland)*).

6.1.2.4.2 Fischer-Tropsch-Synthese

Die Abbildungen 72 und 73 zeigen Fließschemata der PtX-Bereitstellung mit MVT und konventionellen Fischer-Tropsch-Anlagen. Die Schemata bildeten die Grundlage der Modellierung.

Abbildung 89: Fließschema Bereitstellung von FT-Diesel - Synthese mit MVT Reaktoren

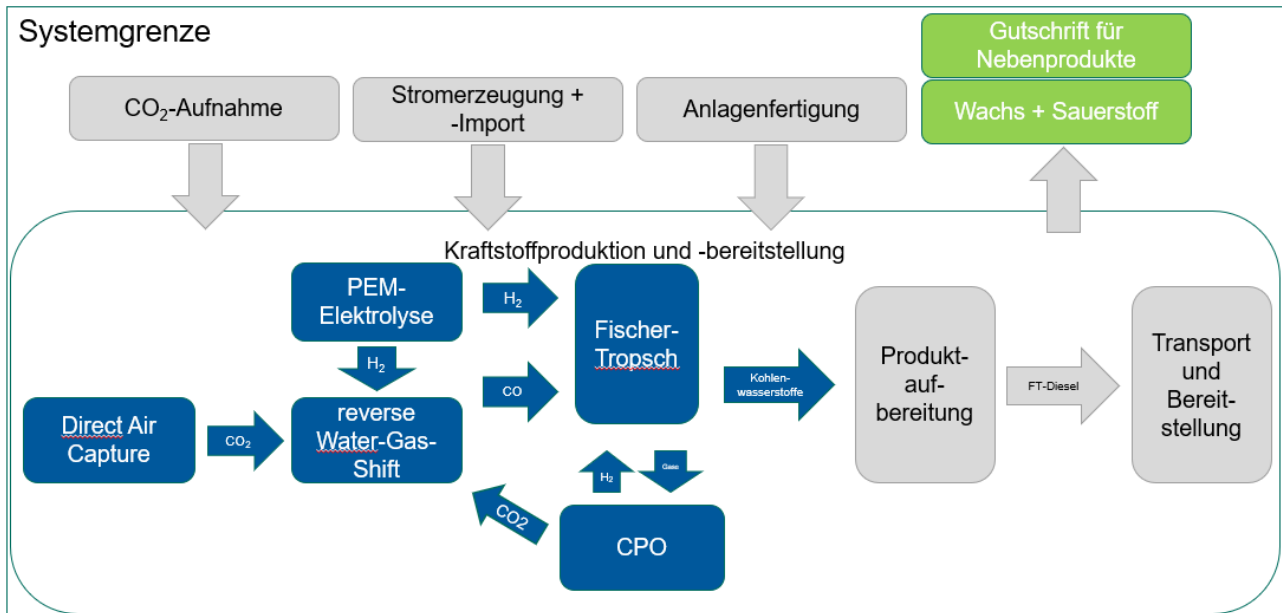
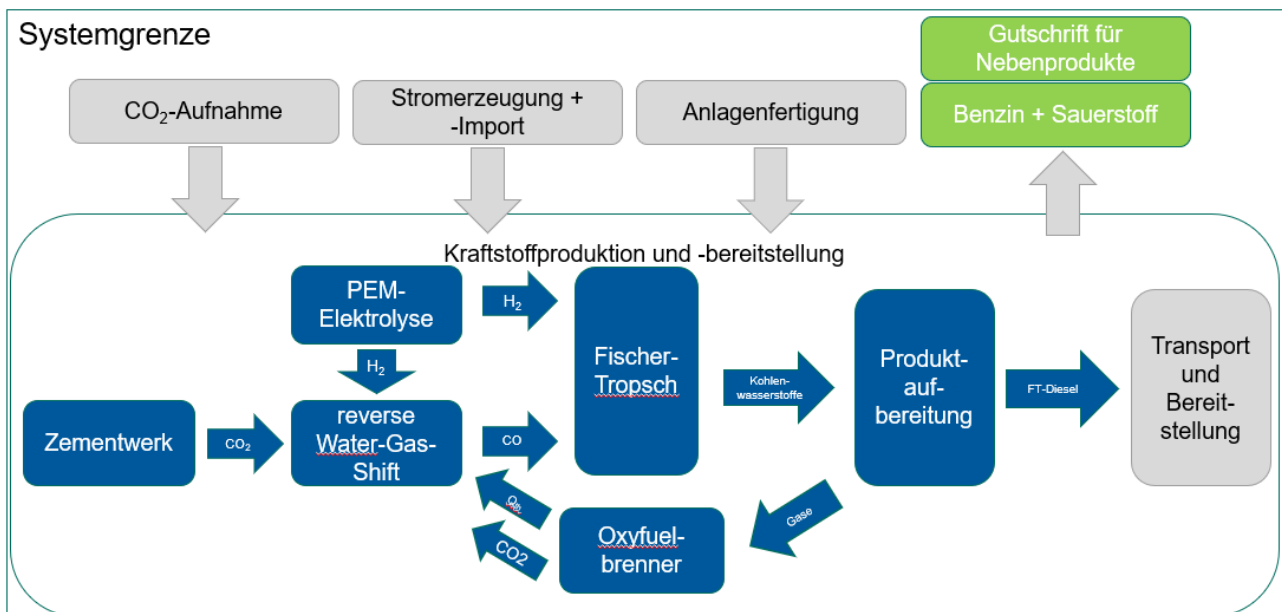


Abbildung 90: Fließschema der konventionellen Fischer-Tropsch-Synthese



Das Modell der MVT Fischer-Tropsch-Synthese wurde auf Grundlage der Publikation [70]: Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: SOLETAIR proof-of-concept and improved process concept erstellt.

Das Modell der konventionellen Fischer-Tropsch-Synthese wurde auf Grundlage einer Aspen Plus-Simulation für die techno-ökonomische Analyse im reFuels-Projekt aus dem Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des KIT erstellt.

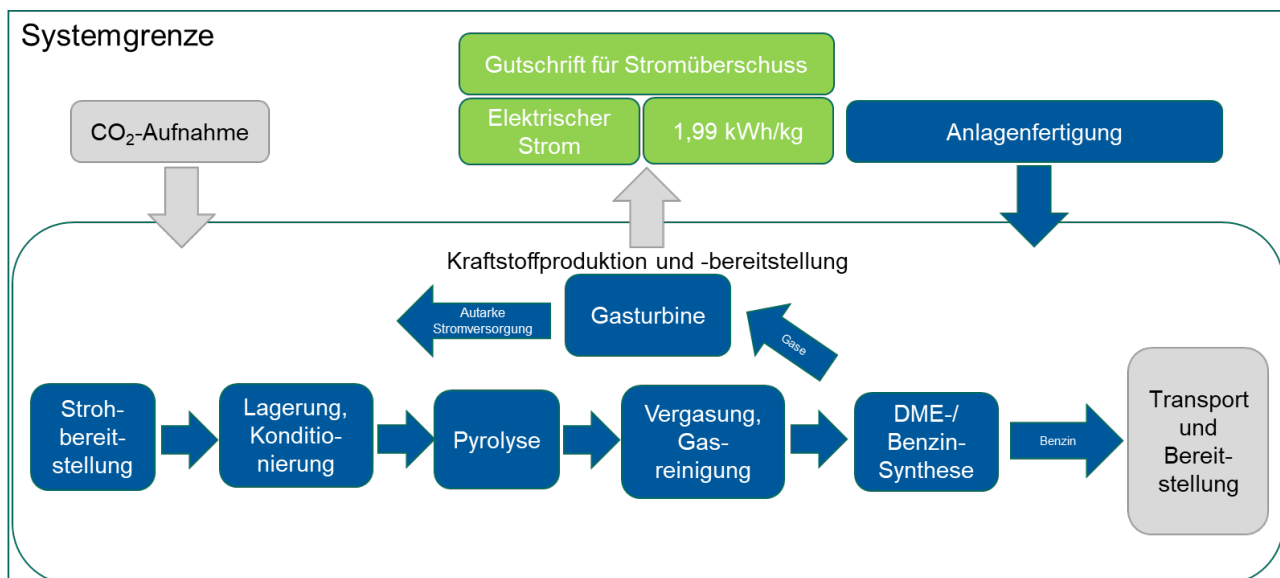
Neben der FT-Technik bestehen zwischen den beiden Prozessketten folgende Unterschiede: Die MVT Anlage bezieht CO₂ aus der Luft, die konventionelle aus der Abluft eines Zementwerkes. Die Gasfraktion der MVT FT-Synthese wird in einer CPO in CO₂ (=> RWGS) und H₂ (FTS) umgewandelt, die der konventionellen in einem

Oxyfuel-Brenner verbrannt ($\text{CO}_2 + \text{Wärme} \Rightarrow \text{RWGS}$). Bei der MVT Variante fällt Wachs als Nebenprodukt an, bei der konventionellen Benzin, bei beiden außerdem Sauerstoff. Die zahlreichen Annahmen zur Hinterlegung der Modelle mit Daten sowie Informationen über die verwendeten Hintergrunddaten aus der Datenbank ecoinvent finden sich in der umfassenden Dokumentation [64].

6.1.2.4.3 bioliq®-Prozess

Die Abbildung 91 zeigt das Fließschema des bioliq®-Prozesses ohne H_2 -Einspeisung. Das Schema bildete die Grundlage der Modellierung.

Abbildung 91: Fließschema des bioliq®-Prozesses ohne Einspeisung von Wasserstoff, basierend auf Trippe [63]



Die Prozesskette ohne H_2 -Einspeisung wurde auf Grundlage von [63] unter Verwendung der Modelle und Daten aus [71] und [72] modelliert. Hauptprozessschritte stellen die Pyrolyse der Biomasse, die Vergasung des Pyrolyseproduktes („Slurry“) und die Synthese dar (siehe Abbildung 91).

Die Prozessvariante mit Einspeisung von Wasserstoff aus alkalischer Elektrolyse zur Verbesserung der Kohlenstoffbilanz wird auf Basis von Hennig, Haase [73] modelliert. Es werden zwei Varianten für die Bereitstellung von H_2 betrachtet: „Off-site“ (externe Erzeugung und Bereitstellung via pipeline) und „On-site“ (lokale Erzeugung am Standort der Synthese). In beiden Fällen wird Windstrom für die alkalische Elektrolyse verwendet. Die Modellierung und Bewertung der Wasserstoffbereitstellung durch alkalische Elektrolyse basiert auf [74], [75] und [76].

Durch die H_2 -Einspeisung bestehen zwischen den beiden Prozessketten im Wesentlichen folgende Unterschiede:

Anstelle der Dimethylethersynthese (DME) mit anschließender Benzin-Synthese (Variante ohne H_2 -Einspeisung) erfolgt bei der Variante mit H_2 -Einspeisung eine Methanolsynthese mit nachfolgender Kraftstoffsynthese (Benzin und LPG). Bei der Variante mit H_2 -Einspeisung wird in der Gasreinigung kein Kohlendioxid vom Synthesegas abgetrennt, da dieses in der MtG-Synthese verwendet wird. Dadurch kann die Kohlenstoffbilanz des Prozesses deutlich verbessert werden. Im Falle der „On-site“-Herstellung von Wasserstoff wird außerdem der für die Vergasung benötigte Sauerstoff aus der Elektrolyse verwendet, d.h. es



wird kein Luftzerleger benötigt. Weitere Informationen zur Modellierung der bioliq®-Varianten finden sich in der umfassenden Dokumentation [64].

6.1.2.5 Ergebnisse

Aufgrund der überragenden Bedeutung des Klimawandels in der Umweltdiskussion und wegen des kompakten Berichtsdesigns werden hier nur die Ergebnisse für die Wirkungskategorie Global Warming Potential graphisch dargestellt. Ressourcenverbrauch und Feinstaubbildung werden im Text nur angerissen. Für das GWP werden in den Diagrammen die Treibhausgas-(THG)-Emissionen der Produktionsprozesse, die CO₂-Gutschriften der Systemerweiterung und der Kohlenstoffbindung bei der Kraftstoffproduktion sowie die Freisetzung der gleichen Menge von CO₂ bei der Kraftstoffverbrennung abgebildet. Die bewertungsrelevanten Salden sind markiert.

- Für beide FT-Konzepte hat die Wahl des Strommixes entscheidende Bedeutung.
- Beim Betrieb der Anlage mit regenerativem Strom aus Erzeugung mit hohen Volllaststunden-Werten werden gegenüber der fossilen Referenz sowohl THG-Emissionen als auch fossile Ressourcen eingespart.
- Für die Feinstaubbildung kann nur ein Vorteil erreicht werden, wenn der abgetrennte Sauerstoff als Wertstoff verwendet wird.
- Die Importszenarien weisen in den betrachteten Wirkungskategorien deutliche Vorteile gegenüber der Produktion in Deutschland auf. Ursächlich ist die erhöhte Anzahl an Volllaststunden bei nur relativ geringen zusätzlichen potenziellen Umweltwirkungen durch den Schiffstransport.
- Die Sensitivitätsanalyse "Allokation nach Heizwert" ergibt für die FT-Synthesen ungünstigere Ergebnisse als die Systemerweiterung.
- Beide bioliq®-Varianten (mit und ohne H₂ Einspeisung) zeigen sowohl für das GWP als auch den Verbrauch fossiler Ressourcen Vorteile gegenüber der fossilen Referenz.
- Die bioliq®-Variante mit zusätzlicher H₂-Einspeisung weist nur beim Ressourcenverbrauch Vorteile gegenüber der Basisvariante (ohne H₂-Einspeisung) auf.
- Bei der Feinstaubbildung wird mit keiner der bioliq®-Varianten eine Verbesserung relativ zur fossilen Referenz erreicht.
- Die on-site-Produktion von Wasserstoff mit der Nutzung des Sauerstoffs aus der Elektrolyse für die Vergasung der Biomasse ist mit geringeren potenziellen Umweltwirkungen verbunden als die Variante mit off-site-Produktion von Wasserstoff.
- Eine Sensitivitätsanalyse mit der Belastung des Strohs mit den Aufwendungen für den Getreideanbau zeigt nur geringen Einfluss auf das GWP, den Ressourcenverbrauch und die Feinstaubbildung aber erheblichen Einfluss auf den Flächenbedarf.

6.1.2.6 Diskussion

Die Modelle des MVT- und des konventionellen FT-Prozesses basieren aktuell auf Simulationen, da sie im betrachteten Maßstab noch nicht im Einsatz sind. Dadurch sind die Modelle mit hoher Unsicherheit verbunden. Insbesondere die Importszenarien basieren aktuell auf vereinfachten Annahmen.

Die Kopplung des Anlagenbetriebs an den Gang der Stromerzeugung (mittlere Anlagenauslastung ~ Volllaststunden) stellt weder für den MVT- noch den konventionellen FT-Prozess ein optimales Szenario dar. Hohe Volllaststunden für die Strombereitstellung für den ganzen Prozess sind essentiell. Die Sensitivitätsanalyse zeigt: Auch wenn der FT-Prozess unabhängig von den Limitierungen der Strombereitstellung zu 90 % ausgelastet wäre, würde die Strombereitstellung selbst trotzdem den größten Teil der potenziellen Umweltwirkungen verursachen. Aber die betrachteten Varianten zeigen auch, dass Verwendung und Nicht-Verwendung des anfallenden Sauerstoffs ökologisch einen großen Unterschied machen.



Aus den insgesamt relativ geringen Flächenpotentialen und mäßigen flächenbezogenen Leistungen einer regenerativen Stromerzeugung für PtX in Deutschland sowie optimierungsbedürftigen Ausbeuten an PtX ergeben sich zumindest zwei Folgerungen: (1) Längerfristig sollte PtFT nur für nicht problemlos elektrifizierbare Verkehrssektoren eingeplant werden, z.B. Luft- oder Seeschifffahrt [77]. (2) Die Produktion sollte in Ländern mit stabileren und größeren Sonneneinstrahlungen und Windaufkommen erfolgen.

Wie FT-Kraftstoffe sind biogene Kraftstoffe nicht unbegrenzt verfügbar. Laut Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe [78] werden in Deutschland ca. 15 Mio. t Ottokraftstoff pro Jahr verbraucht. Nach [79] beläuft sich das gesamte technische Stroh- und Waldrestholzpotenzial in Deutschland auf ca. 14 und 16 Mio. t, das ungenutzte technische Potenzial auf ca. 8 und 12 Mio. t (jeweils Trockensubstanz). Bei einer Ausbeute von ca. 0,125 t Kraftstoff je t Biomasse (trocken) ergeben sich überschlägig aus den Gesamtpotenzialen ca. 1,8 Mio. t bioliq[®]-Produkt aus Stroh und ca. 2,0 Mio. t bioliq[®]-Produkt aus Waldrestholz. Mit den ungenutzten Potenzialen resultieren ca. 1,0 Mio. t und ca. 1,5 Mio. t bioliq[®]-Kraftstoffe, was zusammen etwa einem Sechstel des deutschen Ottokraftstoffbedarfs entspricht.



Abbildung 92: Global Warming Potential durch Kraftstoffproduktion und –bereitstellung - kg CO₂ Äq / MJ Kraftstoff - Basisszenarien

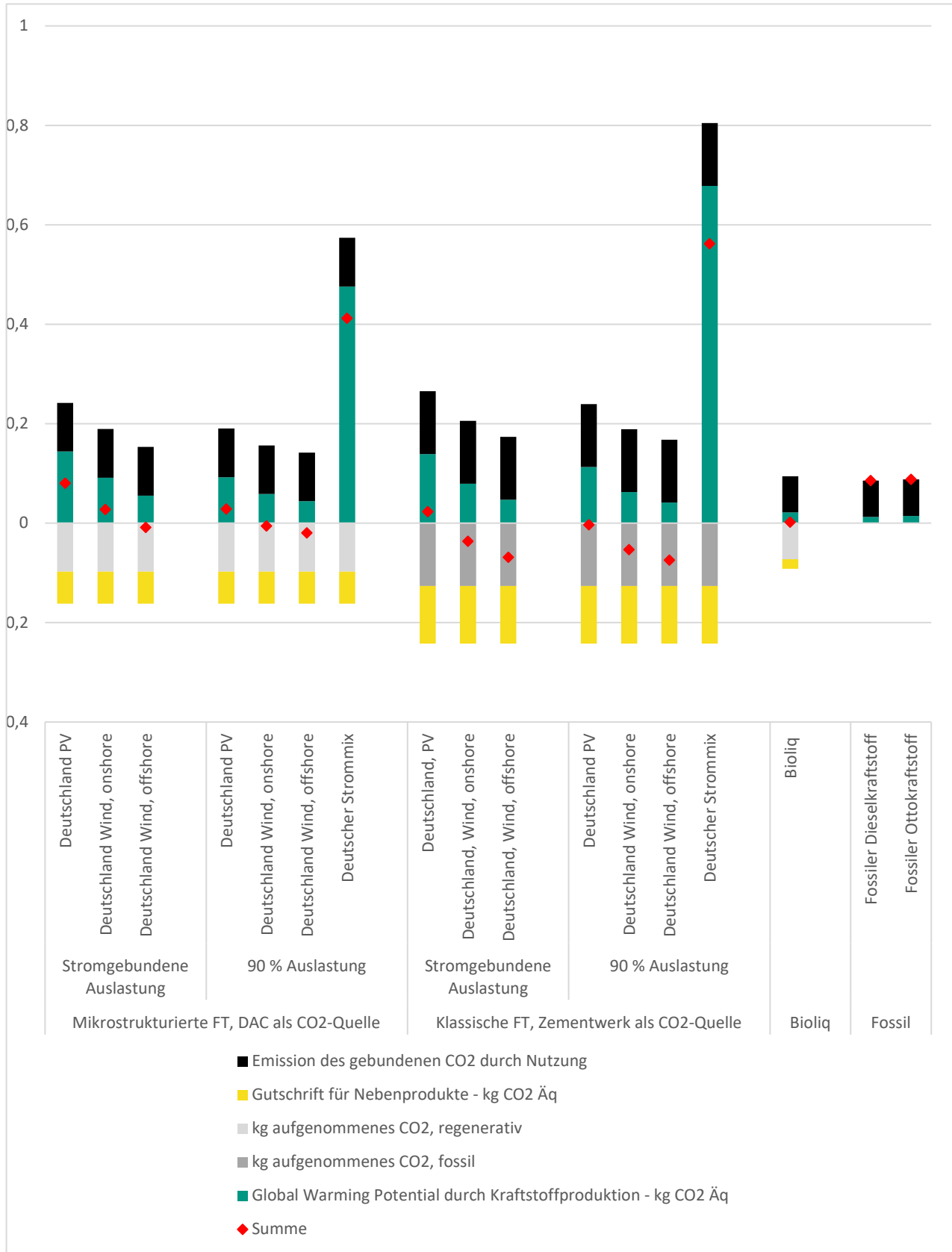
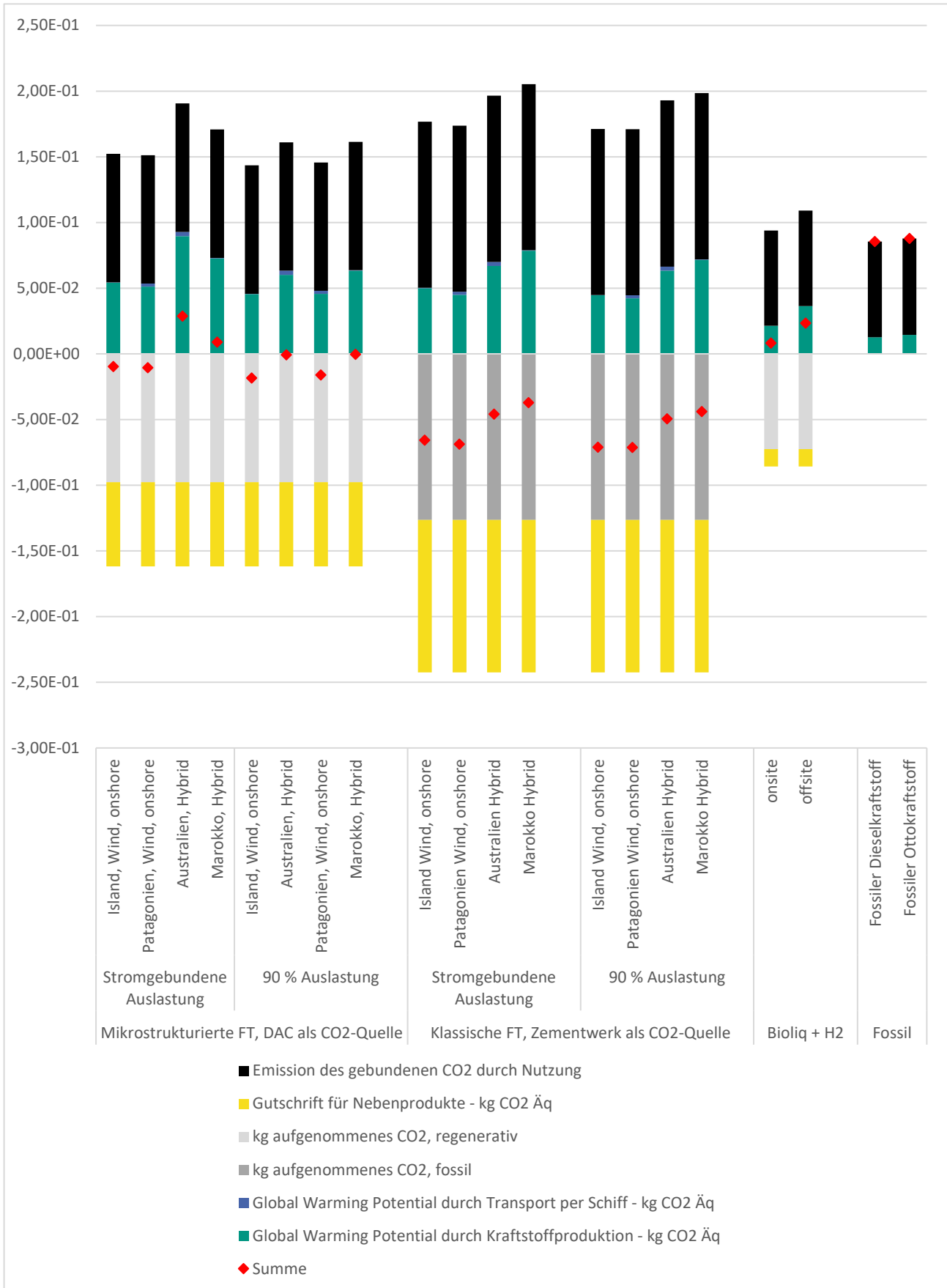




Abbildung 93: Global Warming Potential durch Kraftstoffproduktion und –bereitstellung - kg CO₂ Äq / MJ Kraftstoff - erweiterte Szenarien





6.2 Cluster C2: reFuels und Zivilgesellschaft

Scheer, Dirk; Schmieder Lisa (ITAS)

Die Arbeiten zu „reFuels und Zivilgesellschaft“ wurde als eine empirische Positionsanalyse von Stakeholdern durchgeführt. Zum einen wurde auf Basis einer Dokumentenanalyse die Einschätzungen von Stakeholdergruppen erhoben [80]; zum anderen wurde über das Format des Gruppendelphis ein Workshop mit Vertreter*innen von Stakeholdergruppen durchgeführt [81]. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse auszugsweise dargestellt.

6.2.1 Dokumentenbasierte Positionsanalyse

Im Rahmen des reFuels-Projektes wurde zunächst eine **Desk Research-basierte Positionsanalyse** zur Eruierung von Stakeholder-Positionen durchgeführt, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Einschätzungen zur Kraftstoffroute zu analysieren. Die Positionsanalyse ausgewählter Stakeholder-Dokumente wurde methodisch über Desk Research durchgeführt, indem zunächst von Stakeholdergruppen veröffentlichte Dokumente mit Bezug zu (synthetischen) Kraftstoffen identifiziert wurden. In einem zweiten Schritt wurde ein Analyseinstrument als Template („Steckbrief Verbandsposition“) erarbeitet. Schließlich wurde die Datenbasis aus einer vergleichenden Perspektive anhand der Steckbriefe ausgewertet. Zunächst wurde eine Liste mit deutschen Verbänden aus den Bereichen Wirtschaft, Umwelt und Zivilgesellschaft zusammengestellt, da Verbänden aus diesen drei Bereichen aus einer gesamtgesellschaftlichen Perspektive für die Verkehrswende eine große Bedeutung zukommt. Im Ergebnis wurden 21 Organisationen über die drei Bereiche identifiziert (vgl. *Tabelle 12*).

Tabelle 16: Zusammenstellung der betrachteten Organisationen (eigene Darstellung)

Wirtschaft	
<ul style="list-style-type: none"> • VDA: Verband der Automobilindustrie • VDB: Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie • BEM: Bundesverband eMobilität Elektromobilität • VDV: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen • BDEW: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft 	<ul style="list-style-type: none"> • bft/MEW: Bundesverband Freier Tankstellen und Unabhängiger Deutscher Mineralöhländler • DBV: Deutscher Bauernverband • BDI: Bundesverband der Deutschen Industrie • Tankstellen-Interessenverband e.V.
Umwelt	
<ul style="list-style-type: none"> • BUND: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland • Greenpeace 	<ul style="list-style-type: none"> • WWF: World Wide Fund For Nature • Germanwatch • NABU: Naturschutzbund Deutschland
Gesellschaft	
<ul style="list-style-type: none"> • Agora: Agora Verkehrswende • vzbv: Verbraucherzentrale Bundesverband • ADAC: Allgemeine Deutsche Automobil-Club 	<ul style="list-style-type: none"> • VCD: Verkehrsclub Deutschland • IG Metall: Industriegewerkschaft Metall • KDA: Kirchlicher Dienst in der Arbeitswelt • Deutscher Caritasverband

In der Gesamtschau über alle Verbände zeigt sich, dass die Thematik „Kraftstoffe“ fest im deutschen Stakeholderdiskurs verankert ist. Alle siebzehn analysierten Verbände haben sich in der ein oder anderen Art und Weise zu Kraftstoffen geäußert und positioniert (vgl. *Tabelle 17*).

Betrachtet man die einzelnen Themenlinien, so lassen sich folgende zentrale Ergebnisse herausstellen. Alle untersuchten Verbände haben eine *Positionierung* über Dokumente vollzogen, wobei die deutliche Mehrheit sich explizit über Stellungnahmen, Standpunkte oder Positionspapiere geäußert hat. Nur drei Verbände haben sich implizit zu Kraftstoffen positioniert (VDV, VCD und KDA). Während der VDV als Verband insbesondere den schienen- und Bus gebundenen Personennahverkehr vertritt, steht beim VCD der singuläre Verkehrsträger Fahrrad im Mittelpunkt. Der KDA hingegen hat keinen direkten Bezug zur Mobilität bzw. zum Verkehrssystem.



Zur Verkehrswende haben sich alle Verbände mit Ausnahme des DBV positioniert und tlw. eigene Schwerpunktsetzungen, Zielformulierungen und Maßnahmenprioritäten für eine zukünftige Verkehrswende festgelegt. Damit zeigt sich, dass das Themenfeld Verkehrswende mittlerweile fest im Stakeholderdiskurs verankert ist. Eine detaillierte Darstellung der Einzelergebnisse findet sich in [80].

Tabelle 17: Übersicht aller Stakeholder im Steckbrief Verbandsposition (eigene Darstellung)

	Wirtschaft							Umwelt			Zivilgesellschaft						
	VDA	VDB	BEM	BDEW	VDV	bft / MEW	DBV	BDI	BUND	Greenpeace	WWF	Agora	vzbv	ADAC	VCD	IG Metall	KDA
„Positionierung“																	
• Positionierung (e = explizit, i = implizit)	e	e	e	i	i	e	e	e	e	e	e	e	e	e	i	e	i
„Verkehrswende“																	
• Verständnis der Verkehrswende	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
„Relevanz Kraftstoffe“																	
• Einschätzung biogene Kraftstoffe	✓	✓			✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		
• Einschätzung synthetische Kraftstoffe	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓
• Einsatzgebiete reFuels	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓
„Aspekte strombasierte Kraftstoffe“																	
• Technologieoffenheit vs. -selektion	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓				✓				✓	✓
• Ort der Energieerzeugung + Relevanz des Imports	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓					
• Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit	✓			✓		✓		✓		✓		✓	✓				
• Stellenwert reFuels für Speicherung + Flexibilität	✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓				✓	
• Einschätzung zur Akzeptanz	✓	✓				✓		✓	✓			✓	✓	✓			
• Einschätzung zur Nachhaltigkeit	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
• Rolle für die Standortsicherung	✓					✓		✓								✓	
„Politische Rahmenbedingungen“																	
• Politische Rahmensetzung	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓	✓

Die Analyse der Stakeholderpositionen zu reFuels hat gezeigt, dass die Thematik von strombasierten Kraftstoffen von vielen Verbänden im Bereich Wirtschaft, Umwelt und Zivilgesellschaft aufgegriffen wurde – mit durchaus unterschiedlichen Akzentuierungen und Positionierungen. Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen werden von den Verbänden in unterschiedlichen thematischen Bezügen diskutiert und bewertet.



Diese reichen von einer grundlegenden Einordnung in das Selbstverständnis einer Verkehrswende über die Differenzierung von biogenen und strombasierten Kraftstoffen bis zu einzelnen technischen, wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Aspekten von strombasierten Kraftstoffen. Auch stehen fördernde politische Rahmenbedingungen im Mittelpunkt der Positionierung.

In der Gesamtschau der Positionsanalyse lassen sich drei stakeholderübergreifende Narrative synthetisieren, die die einzelnen oben genannten Aspekte aufgreifen und in ihrer Bewertung verdichten. Diese Narrative dienen als illustrative Pointierung von Positionierungen im derzeitigen Stakeholderdiskurs zu reFuels.

Narrativ 1:

reFuels sind entscheidend für das Gelingen der Verkehrswende

Mit Blick auf die Dinglichkeit des Klimaschutzes und damit der anstehenden Defossilisierung des Verkehrssektors stellen reFuels – insbesondere für den Flottenbestand, aber auch darüber hinaus – unter einer Nutzung der vorhandenen Infrastruktur eine unmittelbar verfügbare Lösung dar und sind damit ein wichtiger Baustein zur Erreichung der Klimaziele. Durch die Verzahnung der beiden Sektoren Energie und Verkehr wird ein wesentlicher Beitrag zur Netzstabilität, Flexibilisierung und Versorgungssicherheit des Energiesystems geleistet. Dabei besteht mit reFuels im Sinne eines netzstabilisierenden und fluktuationseliminierenden Einsatzes die Möglichkeit der Speicherung von Überschussstrom in synthetischen Kraftstoffen bis zu deren Verwendung. reFuels sichern zudem den Verbleib zumindest eines Teils der Wertschöpfung in Deutschland und tragen damit wesentlich zur Standortsicherung im Rahmen des nationalen Transformationsprozesses bei. Dies betrifft die lokale Wertschöpfung, Know-how- und Arbeitsplatzsicherung, Kaufkraft und Steuerleistung. Im Rahmen eines technologieoffenen Ansatzes sollen reFuels ihr Potential für die Verkehrswende ausspielen. Entscheidend für die breite Nutzung der synthetischen Kraftstoffe wird die Akzeptanz der Nutzer*innen sein. Die Möglichkeit der Nutzung der bestehenden Infrastruktur, die keine wesentlichen Verhaltensänderungen erfordert, begünstigt dies. reFuels werden neben den schwer zu elektrifizierenden Anwendungsbereichen (Schiff & Flugzeug) vor allem auch als relevant für den MIV im ländlichen Raum sowie für den Einsatz in der bereits bestehenden Flotte gesehen.

Narrativ 2:

reFuels haben Potential – bei Verkehrsträgern ohne Alternative und unter Einhaltung von Nachhaltigkeitskriterien

Ein Potenzial für den Einsatz synthetischer Kraftstoffe ist grundsätzlich vorhanden. Während synthetischen, strombasierten Kraftstoffen ein Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen zugesprochen wird, ist für Kraftstoffe aus Anbaubiomasse bis 2030 ein Ausstieg wichtig. reFuels sollen nur dort Anwendungen finden, wo keine (direktelektrische) Alternative absehbar ist, bspw. zur Nutzung als Grundstoff in der chemischen Industrie, als Speicher zur Stabilitätssicherung der Energieversorgung oder als Energieträger in speziellen Verkehrsbereichen wie dem Schiffs- und Flugverkehr. Für die Herstellung der reFuels ist eine Nutzung des CO₂ aus der Luft aus klimapolitischen Gründen geboten (kein fossiles CO₂). reFuels sind zudem nur dann klimapolitisch akzeptabel, wenn sie vollständig auf der Grundlage erneuerbarer Energien erzeugt werden. Aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ist langfristig ein kompletter Ausstieg aus der Nutzung von Anbaubiomasse für den Straßenverkehr nötig. Hinsichtlich der Biokraftstoffe sind nur jene (der zweiten Generation) akzeptabel, die keine bis geringe ökologische Auswirkungen haben. Dabei sind die Verwendung von Pestiziden, Düngemitteln sowie die Gefährdung der Nahrungsmittelindustrie als auch die Regenwaldabholzung zu vermeiden. Für die Herstellung von reFuels wird neben Strom und CO₂ zusätzlich Wasser benötigt. Es muss deshalb insbesondere beim Import von reFuels aus wasserarmen Gegenden sichergestellt werden, dass die Wasserverfügbarkeit nicht beeinträchtigt wird. Auch die Inanspruchnahme der Flächen für erneuerbare Energien muss unter ökologischen und sozialen Gesichtspunkten erfolgen. Der Ausbau von Erzeugungskapazitäten für reFuels ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll, sondern sollte frühestens nach





2030 geschehen, da die Gesamtbilanz strombasierter Kraftstoffe aufgrund der derzeitigen CO₂-Intensität des Strommixes schlechter als jene konventioneller Kraftstoffe ausfällt. Die nächsten Jahre sollten für weitere Forschung und Entwicklung im Bereich von reFuels genutzt werden, um dann auf Basis fundierter Kenntnisse und unter Berücksichtigung der Entwicklung im Stromsektor einen angemessenen Pfad für die Entwicklung strombasierter Kraftstoffe abzuleiten.

Narrativ 3:

Verkehrswende als nachhaltige, bezahlbare, sichere und komfortable Mobilität – wenn reFuels dazu beitragen, dann ja!

Es besteht aus klimapolitischer Sicht dringender Handlungsbedarf, die Verkehrswende anzugehen. Eine nachhaltige, für alle zugängliche, komfortable und bezahlbare Mobilität stellt dabei die Grundlage für Wohlfahrt, Lebensqualität und gesellschaftliche Teilhabe dar. Besonders aus sozialer Perspektive werden durch den Transformationsprozess positive Auswirkungen erwartet, wie bspw. bessere Luft und höhere Lebensqualität in den Städten, weniger Staus auf den Straßen, mehr Raum für Stadtkultur, neue Arbeitsplätze usw. Um diese Ziele zu erreichen, müssen der Energie- und Ressourcenverbrauch sowie Treibhausgasemissionen deutlich teurer werden, wobei gleichzeitig ein sozialer Ausgleich sicherzustellen ist. Möglicherweise kann deshalb auch ein Zustand entstehen, in dem für einen Teil der Bevölkerung CO₂-intensive Mobilität so teuer wird, dass manche Wege nicht mehr zu leisten sind. Aus diesem Grund gilt es im Sinne einer Mobilitätsteilhabe der gesamten Gesellschaft nicht hinnehmbare Nebenfolgen auszuschließen bzw. abzumildern und allen Menschen – ob in der Stadt oder auf dem Land – flexible Mobilität zu Fuß, mit dem Rad, Bus und Bahn oder mit Fahrzeugen, zu ermöglichen.

Die Entwicklung von reFuels befindet sich derzeit im Anfangsstadium und ist von einem wirtschaftlichen Einsatz weit entfernt. Trotz des generell gewachsenen ökologischen Bewusstseins werden die meisten Nutzer*innen reFuels nur bei einem adäquaten Preis akzeptieren. Eine relevante Frage wird es daher sein, mit welchen Steuern der Staat diese Kraftstoffe belegt und wieviel Kraftstoff die Autos im Alltagsbetrieb verbrauchen. Um Technologieoffenheit zu gewährleisten, muss die Politik sich finanziell beteiligen und gleichzeitig Rahmenbedingungen für Investitionsstrategien schaffen, die Investoren und Unternehmen ermutigen in die Entwicklung und Herstellung von reFuels zu investieren.

6.2.2 Gruppendelphi-Workshop

In einem zweiten Schritt wurden die Erkenntnisse der Positionsanalyse empirisch validiert. Dazu wurde ein sogenannter **Gruppendelphi-Workshop**, Pandemie-bedingt virtuell, mit Vertretern von Verbänden aus der Wirtschaft, Umwelt und Zivilgesellschaft durchgeführt. Ziel des Workshops war es, über das Gruppendelphi-Format konsensuale und dissente Positionen zwischen den teilnehmenden Verbänden und Organisationen zu erheben und sichtbar zu machen.

Das **Gruppendelphi** wurde in den 1990er Jahren als Modifikation des traditionellen Delphi-Verfahrens entwickelt (82, 83, 84, 85). Ziel war es, dieses methodisch so weiterzuentwickeln, dass die einer Expertenbewertung zugrundeliegenden Argumente eruiert werden können. Denn speziell bei Risikoproblemen und komplexen Sachverhalten repräsentieren solche Urteile und Auffassungen häufig verschiedene wissenschaftliche Denkschulen oder auch normative Positionen. Die wichtigste Modifikation im Vergleich zum konventionellen Delphi-Verfahren besteht in dem Umstand, dass die Expertinnen und Experten an einem ein- oder zweitägigen Workshop teilnehmen. Die grundlegende Struktur dieser Delphi-Methode beruht damit nach wie vor auf einem integrativen Befragungsprozess, obwohl die Datengewinnung sich nicht mehr anonymer Fragebögen bedient, sondern im Kontext einer diskursiven Workshop-Agenda stattfindet. Dabei ist darauf zu achten, dass die ausgewählten Teilnehmenden die für das Thema des Gruppendelphis maßgeblichen Standpunkte repräsentieren. Die Zahl der eingeladenen Expertinnen und Experten soll sich in der Bandbreite von 12 bis 24 Personen bewegen, um drei bis vier parallele Kleingruppenbewertungen zu





gewährleisten. In der sozialwissenschaftlichen Forschung liegen mittlerweile verschiedene Analysen auf Basis einer Gruppendelphi-Anwendung vor.

Der **Workshop** fand am 15. Oktober 2020 als vollständig virtuelle Veranstaltung ganztags statt. Der Teilnehmerkreis bestand aus neun Expertinnen und Experten – kurzfristig hatten mehrere Institutionen terminbedingt absagen müssen. Folgende acht Institutionen aus Wirtschaft, Umwelt und Zivilgesellschaft (sowie ein Wissenschaftsinstitut) waren bei dem Workshop vertreten. Tabelle 18 zeigt eine Übersicht jener Institutionen, die am Workshop teilgenommen haben.

Tabelle 18: Übersicht der im Workshop vertretenen Institutionen

Wirtschaft
<ul style="list-style-type: none"> • Verband der Automobilindustrie (VDA) • Bundesverband eMobilität (BEM) • Lufthansa
Umwelt
<ul style="list-style-type: none"> • World Wide Fund For Nature (WWF) • Germanwatch
Gesellschaft
<ul style="list-style-type: none"> • Kirchlicher Dienst in der Arbeitswelt (KDA) • Verbraucherzentrale Bundesverband (vzbv)
Wissenschaft
<ul style="list-style-type: none"> • Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ)

Quelle: eigene Darstellung

Der **Ablauf des Gruppendelphi-Workshops** umfasste zunächst eine Einführung in das reFuels-Projekt, den Gruppendelphi-Fragebogen und die weitere Vorgehensweise. Daran anschließend wurden jeweils zwei Delphi-Runden bestehend aus parallelen Kleingruppen gefolgt von jeweils einer Plenumsdiskussion durchgeführt. Die erste Gruppendelphi-Runde startete mit der Aufteilung der Gesamtgruppe in drei zufällig zusammengesetzte Teilgruppen mit je zwei bis drei Mitgliedern. Jede Teilgruppe hatte die Aufgabe, alle Fragen des Fragebogens zu diskutieren und soweit möglich zu gemeinschaftlichen Bewertungen zu kommen. In den Fällen, in denen dies nicht gelang, bestand die Möglichkeit, abweichende Bewertungen als Minderheitsvotum festzuhalten. In der moderierten Plenumsdiskussion waren die Teilnehmenden sodann aufgefordert, bei über die Gruppen hinweg dissidenten Bewertungen die zugrundeliegenden Begründungen und Argumente offen zu legen. Bewertungen, die über alle drei Gruppen konsensual getroffen worden sind, wurden im Plenum dagegen nicht thematisiert. Die zweite Gruppendelphi-Runde wiederholte im Wesentlichen die Vorgehensweise der ersten Runde, d.h. wiederum wurde die Gesamtgruppe zufällig auf Teilgruppen zur Beantwortung des Fragebogens verteilt, und im danach folgenden Plenum gebeten die dissidenten Bewertungen inhaltlich zu begründen. Das Hauptaugenmerk der zweiten Runde lag vor allem auf der Identifikation von Dissens- und Konsensverschiebungen. Im Kern ging es darum, zu beobachten, ob über den inhaltlich diskursiven Austausch dissidente Bewertungen ausgeräumt werden konnten und sich in der zweiten Runde zu einem konsensualen Urteil verschoben haben.

Die **Analyse des Gruppendelphi-Workshops** beruht auf der Auswertung von quantitativ und qualitativ erhobenen Daten während des Workshops. Erstere liegen in Form der insgesamt sechs Fragebögen vor, die von den je drei Teilgruppen in zwei Delphi-Runden ausgefüllt worden waren. Das qualitative Material besteht





aus wörtlichen Transkripten der Audioaufzeichnungen der beiden Plenumsdiskussionen. Im nachfolgenden Ergebniskapitel werden für jede Frage zunächst die Fragebogenresultate mit Tabellen dargestellt, die Vergleiche zwischen den Resultaten der ersten und zweiten Runde ermöglichen. Diese Vergleiche basieren auf den Mittelwerten der von den drei Kleingruppen für die verschiedenen Items abgegebenen Voten sowie auf einem aus diesen Mittelwerten gebildeten Ranking. Außerdem enthalten die Tabellen Aussagen darüber, ob die Teilnehmenden zu einer dissidenten oder konsensualen Bewertung der Items gelangt sind. Im Anschluss an die quantitativen Resultate stehen die qualitativen Daten im Fokus. Hierbei werden aus den Plenumsäußerungen die zentralen Argumente und Begründungsmuster rekonstruiert, die von den Teilnehmenden speziell in Dissens-Situationen zur Erklärung ihrer Bewertungen angeführt wurden. Die Themengebiete deckten die nachfolgend aufgeführten inhaltlichen Dimensionen ab und thematisieren unterschiedliche Aspekte von synthetischen Kraftstoffen, die als Fragebogen aufbereitet wurden. Die Einzelergebnisse der Analyse sind im Arbeitsbericht Scheer, Schmieder, Pfeiffer [81] dokumentiert:

- Rolle von regenerativen Kraftstoffen in einer nachhaltigen Verkehrswende
- Regenerative Kraftstoffe als biogene und strombasierte Kraftstoffe
- Wirkungsdimensionen von strombasierten Kraftstoffen
- Politische Rahmensetzung
- Verständnis einer nachhaltigen Verkehrswende
- Abschließende Bewertungen

Die Analyse hat gezeigt, wo Gemeinsamkeiten und Differenzen unter den Beteiligten liegen. Diese lassen sich folgendermaßen zusammenfassen.

Zunächst kann zu den überwiegend *konsensualen Einschätzungen* folgende Zusammenfassung gegeben werden: Regenerative Kraftstoffe sind für eine gelingende Verkehrswende im Rahmen eines ambitionierten Klimaschutzes ein essentieller Baustein. Dieser Baustein komplementiert im motorisierten Verkehr die zentralen Bausteine von alternativen Antrieben. Dabei ist im Kontext unterschiedlicher Verkehrswendestrategien auch die Verlagerung von zentraler Bedeutung. Regenerative Kraftstoffe sind dann unstrittig, wenn sie strombasiert (wirtschaftlich) hergestellt werden können und bei Verkehrsträgern ohne technische Alternative wie Luft-, Schiffs- und Langstreckenschwerverkehr eingesetzt werden. Der breite Einsatz strombasierter Kraftstoffe wird auf Kraftstoffimporte angewiesen sein und bei Verbraucherinnen und Verbrauchern aufgrund geringer Alltagsanpassung auf eher große Akzeptanz treffen. Zudem müssen diese Kraftstoffe auf einem klimaverträglichen Strommix und einer klimaverträglichen Kohlenstoffquelle basieren. Klar bleibt allerdings auch, dass der Markthochlauf von regenerativen Kraftstoffen auf die Internalisierung von derzeit externalisierten Klimakosten zur Verbesserung der Wettbewerbsbedingungen angewiesen ist. Ohne aktive nationale und internationale Anstrengungen zum Aufbau von Wertschöpfungsketten und Technologieinnovation und -diffusion werden reFuels ihr Potential nicht ausspielen können.

Zugleich wurden in dem Dialog basierten Verfahren des Gruppendelphis aber auch die Konsensgrenzen deutlich. Die auch über intensiven Austausch bestehenden *dissidenten Einschätzungen* lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Die Einschätzung von regenerativen Kraftstoffen findet insbesondere bei der biogenen Variante im Rahmen des Workshops unterschiedliche Bewertungen. Sowohl die Bedeutung als auch der Einsatz wurden hier kontrovers gesehen. Dies betrifft sowohl die mengenmäßige Einschätzung von fortschrittlichen Biokraftstoffen als auch der Einsatz unter Nachhaltigkeitsaspekten. Für regenerative Kraftstoffe gilt insgesamt, dass sie unter Effizienzgesichtspunkten mit anderen Ansätzen konkurrieren und die Bilanz des Primär- und Energieverbrauchs ausschlaggebend ist. Dem wurde entgegengehalten, dass unter Nachhaltigkeits- und Umweltaspekten eine alleinige Effizienzbetrachtung zu kurz greife. Auch können nationale Effizienz Nachteile durch internationale Effizienzvorteile ggf. kompensiert werden. Ebenfalls war das Argument der Risikostreuung strittig, bei der über Technologieoffenheit mehrere verkehrliche



Mitigationsstrategien verfolgt werden. Daraus leiten sich entsprechend auch unterschiedliche Einschätzungen zur Verwendung von regenerativen Kraftstoffen für die PKW-Flotte ab. Während einige hier den Einsatz grundsätzlich befürworteten, waren andere deutlich skeptischer.

Unabhängig davon welche Rolle regenerative Kraftstoffe als Klimaschutzmaßnahme zukünftig spielen können oder sollen, ist es offensichtlich, dass die Diskussion um die Erforschung und Umsetzung von reFuels nicht isoliert betrachtet werden kann. Politische Entscheidungen für eine Verkehrswende sind auf die Zustimmung von Interessengruppen und der breiten Öffentlichkeit angewiesen. Vor diesem Hintergrund ist es empfehlenswert, dass weitere und tiefergehende Untersuchungen zur Wahrnehmung, Einstellung und Bewertung von regenerativen Kraftstoffen bei Stakeholdern, Verbraucherinnen und Verbrauchern und der allgemeinen Öffentlichkeit durchgeführt werden und Foren für öffentliche Dialoge initiiert werden. Diese Dialoge sollten zunächst die Interessenvertreterinnen und -vertreter einbeziehen und dann ausgeweitet werden, um die breite Öffentlichkeit zu adressieren.

6.3 Cluster C3: Kommunikation im Projekt

Kölle, Christoph; Landgraf, Monika (SEK), Toedter, Olaf (IFKM)

Das Projekt reFuels hat im Gegensatz zu einer Vielzahl von bisherigen Projekten wesentlich auf erarbeiteten Inhalten aufgebaut, statt Literatur-basiert zu arbeiten. Mehrere der Aktivitäten und Ergebnisse in reFuels sind nicht erstmalig durchgeführt worden, aber erstmalig öffentlich und sollen als Basis für weitere Aktivitäten mit dem Ziel der Skalierung der Produktion regenerativer synthetischer Kraftstoffe dienen.

Die Veröffentlichungsarbeit zu den erarbeiteten Inhalten basiert auf mehreren Säulen

- A) Die Webseite reFuels.de
- B) Darstellung des Projektes und der Projekthalte auf öffentlichen Veranstaltungen
- C) Publikation des Projektes in der Presse und über gestreute Medien

Die Webseite reFuels.de bietet in deutscher und englischer Sprache mehrere Zugänge zum Themenfeld reFuels. In einem im graphity-Stil erstellten Kurzvideo wird den Besuchern der Seite der Grundgedanke des geschlossenen Kohlenstoffkreislaufes vermittelt und der Begriff reFuels erläutert.

Ferner werden auf der Webseite in Form von Kurzvideos auf Basis von Experteninterviews häufig gestellte Fragen (frequently asked questions) beantwortet. Für weitergehende Informationen sind auf der Webseite im Rahmen des Projektes erstellte Arbeitspapiere und Publikationen hinterlegt, die daten-technisch auf KIT open gehostet werden. KIT open ist eine öffentlich zugängliche Datenbank für Fachliteratur.

Zum Kontakt und zur Informationsweitergabe an die interessierte Öffentlichkeit wurden mehrere Ansätze verfolgt und durch geeignete Bild- und Videoprojekte unterstützt.

- A) Auftritt auf Messen
 - a. reFuels wurde präsentiert und mit interessierten Messebesuchern diskutiert auf Hannover Messe Industrie HMI 2020 und 2021 am Stand des Landes Baden-Württemberg und am Stand des Zentrums Energie des KIT. Hierzu wurde ein Zusammenfassendes Teaser-Video erstellt.
 - b. Die auf Mobilität spezialisierte Messe i-mobility war in 2019 ein geeignetes Forum, vielen Bürgern die Konzepte und das Projekt reFuels nahe zu bringen.
 - c. Die Nutzfahrzeugmesse NUFAM betrifft ein Fachpublikum mit hohem Interesse an den reFuels und wurde in 2019 und 2021 unterstützt.
- B) Kanäle der Wissenskommunikation
 - Teilnahme mit Exponaten und Podiumsdiskussionen an dem "Wissenschaftsfestival Effekte". An der Podiumsdiskussion haben neben wissenschaftlicher Begleitung auch Teilnehmer aus der Politik (Fr. Dr.



Herrmann vom Verkehrsministerium Baden-Württemberg) und der Industrie (D. Schwarzenthal von der Porsche AG) teilgenommen.

- Teilnahme an der Veranstaltungsreihe “Bioökonomie findet Stadt”
- Gestaltung und Ausstellung einer Zusammenfassung auf einem Bauzaunbanner, das zusammen mit anderen Exponaten anderer Hochschulen in 9 Städten als Exponat des Wissenschaftsjahr 2020/2021 ausgestellt wurde.
- Vorstellung der Projektinhalte bei der Akademie für Natur- und Umweltschutz Baden-Württemberg im Rahmen der Woche des Wasserstoffs Süd 2022
- Vorstellung und Diskussion des Projektes auf Veranstaltungen der Branchenverbände Verein Deutscher Ingenieure VDI, Handwerkskammer, Industrie- und Handelskammer IHK, der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für nachhaltige Energieträger, Mobilität und Kohlenstoffkreisläufe DGMK Bezirksgruppe Oberrhein und dem Verband Baden-Württembergischer Omnibusunternehmen e.V. WBO

Abbildung 94: Beispielhafte Darstellungen aus der Kommunikation des Projektes



C) Publikation des Projektes in der Presse und über gestreute Medien

- Das Forschungsmagazin lookKIT wird gestreut und gibt der interessierten Öffentlichkeit einen Einblick in die F&E-Aktivitäten des KIT. In den Sonderheften zu den Themenfeldern Mobilität, Energie, Bioökonomie und Energy Lab 2.0 wurden jeweils Inhalte aus dem Projekt integriert
- Die Zeitschrift der Handwerkskammer
- Mobilitäts-nahe Zeitschriften für Endverbraucher und Fachleute (Motortechnische Zeitschrift MTZ, Auto Motor Sport, Ride – Motorrad unterwegs)
- Zeitungen und Zeitschriften für Endverbraucher (u.a. Stuttgarter Nachrichten, Badische Neuste Nachrichten, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Fokus, Welt, Rheinpfalz, Badisches Tageblatt)
- Informationssendungen und –Beiträge im Fernsehen (u.a. Quarks (SWR), SWR aktuell, Baden TV)

D) Veranstaltungen

- Konferenzen und Tagungen (z.B. Fuels Joint research group, Fuels of the Future, Fuels Colloquium, Motorenkongress Baden-Baden, Wiener Motorensymposium, WKM-Tagung, DBFZ Jahrestagung)



- b. Konzentriert wurden die in “reFuels – Kraftstoffe neu denken” erarbeiteten Fortschritte auf der “Ergebnisveranstaltung reFuels” am 19.09.2022 der Presse und ausgewählten Partnern präsentiert. Die Durchführung der Veranstaltung bei dem reFuels –Partner der der Mineralölraffinerie Oberrhein MiRO machte deutlich, dass der Fokus aller Vorarbeiten auf der Skalierung der Technologie liegt. Die Darstellung in Form eines Marktplatzes erfolgte zusammen mit Vertretern weiterer Projekte der Projektgruppe reFuels des Verkehrsministeriums Baden-Württemberg. Die Präsentationsform eines Marktplatzes ermöglichte parallel Austausch, Diskussion und Information. Es wurden Einsatzszenarien besprochen wie auch Kostenentwicklungen und Nachhaltigkeitseffekte.
- c. Ein Fokus der Ergebnis-Veranstaltung lag auf der Darstellung der nächsten Schritte, wie auf den bisher erreichten Ergebnissen aufgebaut werden kann. Mit Blick auf die Skalierung ist die Umsetzung der in “reFuels – Kraftstoffe neu denken” und auch in weiteren vom Verkehrsministerium Baden-Württemberg durchgeführten Studien erarbeiteten Konzepte das Ziel und mündet in eine Demonstrationsanlage auf dem Gelände der MiRO.

Abbildung 95: Beispielhafte Kommunikationselemente in reFuels - Kraftstoffe neu denken



7 References

1. Brown T, Hörsch J, Schlachtberger D (2018) PyPSA: Python for Power System Analysis. JORS 6:4. <https://doi.org/10.5334/jors.188>
2. Hörsch J, Hofmann F, Schlachtberger D et al. (2018) PyPSA-Eur: An Open Optimisation Model of the European Transmission System. Energy Strategy Reviews 22:207–215. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.012>
3. Bundesnetzagentur Marktstammdatenregister. <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Datendownload>. Accessed 14 Dec 2021
4. Hersbach H (2018) ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present
5. Andresen GB, Søndergaard AA, Greiner M (2015) Validation of Danish wind time series from a new global renewable energy atlas for energy system analysis. Energy 93:1074–1088. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.071>





6. Dahmen N (2019) Bioliq®-pilot plant for the preparation of synthetic fuelsoperating experience. Proc. of the EUBCE, Lisbon
7. Dahmen N, Abeln J, Eberhard M et al. (2017) The bioliq process for producing synthetic transportation fuels. WIREs Energy Environ 6. <https://doi.org/10.1002/wene.236>
8. Michler T, Wippermann N, Toedter O et al. (2020) Gasoline from the bioliq® process: Production, characterization and performance. Fuel Processing Technology 206:106476. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106476>
9. Graf D, Korovesi X, Kolb T et al. (2022) Konzepte zur Integration erneuerbarer synthetischer Kraftstoffe in einen bestehenden Raffinerieverbund. Chemie Ingenieur Technik 94:267–280. <https://doi.org/10.1002/cite.202100154>
10. Olsbye U, Svelle S, Bjørgen M et al. (2012) Conversion of Methanol to Hydrocarbons: How Zeolite Cavity and Pore Size Controls Product Selectivity. Angewandte Chemie International Edition 51:5810–5831. <https://doi.org/10.1002/anie.201103657>
11. Tsai T-C, Liu S-B, Wang I (1999) Disproportionation and transalkylation of alkylbenzenes over zeolite catalysts. Applied Catalysis A: General 181:355–398. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(98\)00396-2](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(98)00396-2)
12. Yegorov AS, Ivanov VS, Wozniak AI (2014) International and Russian Methods of Synthesis and Use of Pyromellitic acid Dianhydride and Tendencies of Their Development (Review). Biosciences Biotechnology Research Asia 11:1765–1779. <https://doi.org/10.13005/bbra/1583>
13. Calcote HF, Manos DM (1983) Effect of Molecular Structure on Incipient Soot Formation. Combustion and Flame 49:289–304. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(83\)90172-4](https://doi.org/10.1016/0010-2180(83)90172-4)
14. Nakakita K, Ban H, Takasu S et al. (2003) Effect of Hydrocarbon Molecular Structure in Diesel Fuel on In-Cylinder Soot Formation and Exhaust Emissions. SAE Paper 112:1763–1775. <https://doi.org/10.4271/2003-01-1914>
15. McEnally CS, Pfefferle LD (2007) Improved sooting tendency measurements for aromatic hydrocarbons and their implications for naphthalene formation pathways. Combustion and Flame 148:210–222. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2006.11.003>
16. Vivas AH, Joensen F (2018) Process and catalyst for upgrading gasoline(US10150714B2)
17. Santikunaporn M, Alvarez WE, Resasco DE (2007) Ring contraction and selective ring opening of naphthenic molecules for octane number improvement. Applied Catalysis A: General 325:175–187. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2007.03.029>
18. Cooper BH, Donniss BB (1996) Aromatic saturation of distillates: an overview. Applied Catalysis A: General 137:203–223. [https://doi.org/10.1016/0926-860X\(95\)00258-8](https://doi.org/10.1016/0926-860X(95)00258-8)
19. Do PTM, Crossley S, Santikunaporn M et al. (2007) Catalytic strategies for improving specific fuel properties. In: Spivey JJ, Dooley KM (eds) Catalysis: Volume 20. Royal Society of Chemistry, pp 33–64
20. (2021) 3rd International Conference on Energy & Power (ICEP) 2021. <https://sites.google.com/view/asep-org-au/icep-conference/3rd-icep-2021>. Accessed 23 Aug 2022
21. Graf D, Neuner P, Rauch R (2022) Hydroprocessing and Blending of a Biomass-Based DTG-Gasoline. Energy Engineering 119:2169–2192. <https://doi.org/10.32604/ee.2022.022759>
22. Sullivan RF, Egan CJ, Langlois GE et al. (1961) A New Reaction That Occurs in the Hydrocracking of Certain Aromatic Hydrocarbons. Journal of the American Chemical Society 83:1156–1160. <https://doi.org/10.1021/ja01466a036>
23. Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ed) (2022) Synthetic fuels: From laboratory to the road
24. Pepiot-Desjardins P, Pitsch H, Malhotra R et al. (2008) Structural group analysis for soot reduction tendency of oxygenated fuels. Combustion and Flame 154:191–205. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.03.017>





25. Aikawa K, Sakurai T, Jetter JJ (2010) Development of a Predictive Model for Gasoline Vehicle Particulate Matter Emissions. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants* 3:610–622. <https://doi.org/10.4271/2010-01-2115>
26. Langner BE (1982) Reactions of methanol on zeolites with different pore structures. *Applied Catalysis* 2:289–302. [https://doi.org/10.1016/0166-9834\(82\)80075-4](https://doi.org/10.1016/0166-9834(82)80075-4)
27. Kulzer AC, Deeg HP, Villforth J et al. (2020) Sustainable Mobility Using Fuels with Pathways to Low Emissions. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility* 2:1870–1892. <https://doi.org/10.4271/2020-01-0345>
28. McEnally CS, Xuan Y, St. John PC et al. (2019) Sooting tendencies of co-optima test gasolines and their surrogates. *Proceedings of the Combustion Institute* 37:961–968. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.05.071>
29. McEnally CS, Pfefferle LD (2011) Sooting Tendencies of Oxygenated Hydrocarbons in Laboratory-Scale Flames. *Environmental Science & Technology* 45:2498–2503. <https://doi.org/10.1021/es103733q>
30. Traber B Varying Fuel Composition Worldwide: What are the Effects on Seals ? In: *International Fuel Colloquium, Ostfildern, vol 11*
31. Wintrich T, Rothe S, Bucher K (2018) Dieseleinspritzsystem mit geschlossenem Regelkreis. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 79:58–63. <https://doi.org/10.1007/s35146-018-0064-0>
32. Heinrichs D (2021) Mobilitätswende: DKV Mobility erweitert Angebot um CO2-reduzierten Diesel-Kraftstoff (R33). [https://www.dkv-mobility.com/de/news-und-presse/mobilit%C3%A4tswende-dkv-mobility-erweitert-angebot-um-co2-reduzierten-diesel-kraftstoff-\(r33\).html](https://www.dkv-mobility.com/de/news-und-presse/mobilit%C3%A4tswende-dkv-mobility-erweitert-angebot-um-co2-reduzierten-diesel-kraftstoff-(r33).html). Accessed 12 Apr 2023
33. Ebbeg J (2018) Bosch-Geschäftsführer fahren mit 100 Prozent regenerativem Diesel. <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/bosch-geschaeftsfuehrer-fahren-mit-100-prozent-regenerativem-diesel-178240.html>. Accessed 12 Apr 2023
34. Krämer H Drop-in renewable gasoline fuels for CO2 reduction: Evaluation and demonstration of functional potentials. In: *9th International Engine Congress 2022, vol 9*
35. Albrecht M (2020) Investigations of the Emissions of Fuels with different Compositions and Renewable Fuel Components in a GDI Engine. *SAE Technical Paper*
36. Storch M Functional Evaluation of Drop-In Renewable Gasoline Fuels with Significant CO2 Reduction Potentials. In: *Conference Powertrains for Renewable Fuels, vol 1*
37. Wiese W Effects of Fuel Composition, Additives and Injection Parameters on Particulate Formation of Gasoline DI Engines. In: *International Vienna Motor Symposium, 2018, vol 39*
38. Weyhing T, Zabihigivi M, Moradi M et al. (2021) reFuels – rethinking fuels: Performance of regenerative fuels. In: Liebl J, Beidl C, Maus W (eds) *Internationaler Motorenkongress 2021*. Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg, pp 569–577
39. Wiese W, Laidig C, Schünemann E et al. (2018) Einfluss von Kraftstoffeigenschaften, Additivierung und Einspritzung auf die Partikelentstehung bei DI Ottomotoren /Effects of Fuel Composition, Additives and Injection Parameters on Particulate Forma. In: Geringer B, Lenz H-P (eds) *39. Internationales Wiener Motorensymposium 26.-27. April 2018*. VDI Verlag, pp 556–574
40. Weyhing T, Koch T, Wagner U et al. (2022) G40 - Ein Schritt zu einem CO2-neutralen Benzinkraftstoff. *MTZ Motortech Z* 83:30–37. <https://doi.org/10.1007/s35146-022-0852-4>
41. Morhard B (2021) Aufbau und Inbetriebnahmemessungen eines CFR-Motors zur Bestimmung von Oktanzahlen. Masterarbeit
42. Verordnung (EU) 2016/427 der Kommission vom 10. März 2016 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 6)
43. Orth M (2022) Born to be Wald: Nationalpark-Runde. *Magazin Motorrad Ride*:36–49
44. Schmieder L, Scheer D (2021) Regenerative Kraftstoffe im System betrachtet: zur Rolle von reFuels in Energiesystemanalysen. *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*





45. Hobohm J, Maur A auf der, Kemmler A et al. (2018) Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende. Prognos AG, Basel
46. Kasten P, Mottschall M, Köppel W et al. (2016) Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. UBA-Texte, Dessau-Roßlau
47. Zimmer W, Blanck R, Bergmann T et al. (2016) Renewability III, Berlin, Darmstadt, Freiburg, Heidelberg, Zürich
48. Gerhardt N, Sandau F, Scholz A et al. (2015) Interaktion EE-Strom, Wärme, Verkehr: Endbericht, Kassel, Heidelberg, Würzburg
49. Erhard J, Reh W, Treber M et al. (2014) Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland: Weichenstellungen bis 2050
50. Bergk F, Biemann K, Heidt C et al. (2016) Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. UBA-Texte, Dessau-Roßlau
51. Pfluger B, Tersteegen B, Franke B (2017) Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario, Karlsruhe, Aachen, Heidelberg
52. Gerbert P, Herhold P, Burchardt J et al. (2018) Klimapfade für Deutschland, München, Berlin, Hamburg, Basel
53. Repenning J, Emele L, Blanck R et al. (2015) Klimaschutzszenario 2050: 2. Endbericht, Berlin, Karlsruhe
54. Kramer U, Ortloff F, Stollenwerk S et al. (2019) Defossilisierung des Transportsektors: Optionen und Voraussetzungen in Deutschland, Frankfurt am Main
55. Klein S, Klein SW, Steinert T et al. (2017) Erneuerbare Gase - ein System-update der Energiewende, Berlin
56. Bründlinger T, König JE, Gründing D et al. (2018) dena-Leitstudie Integrierte Energiewende.: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Teil A: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen (dena), Teil B: Gutachterbericht (ewi Energy Research & Scenarios gGmbH), Berlin
57. Ausfelder F, Drake F-D, Erlach B et al. (2017) Sektorkopplung – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, München
58. Schnülle C, Gleich A von, Gössling-Reisemann S et al. (2016) Optionen für die Integration von Power-to-Fuel in den Energiewendeprozess aus einer sozioökonomischen Perspektive. Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung
59. (2019) Umweltmanagement- Ökobilanz- Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO_14040:2006): Deutsche und Englische Fassung(14040:2009-11)
60. (2019) Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017): Deutsche Fassung EN_ISO_14044:2006_ + A1:2018(14044:2018-05)
61. BMWi (o.J.) Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi: Energiedaten: Gesamtausgabe. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.xlsx?__blob=publicationFile&v=131. Accessed 22 Jun 2020
62. Meier D (2003) Session III: Neue Forschungs- und Entwicklungs-Ansätze für die Kraftstoffherstellung aus erneuerbaren Ressourcen, Haburg
63. Trippe F (2013) Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen und Chemikalien, Karlsruhe
64. Andresh M, Patyk A, Haase M et al. (2021) Ökobilanzen im Projekt reFuels – Kraftstoffe neu denken 2021
65. Agora Energiewende (2020) Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2020., Berlin
66. Agora Energiewende, Sandbag (2020) The European Power Sector in 2019: Up-to-Date Analysis on the Electricity Transition, Berlin



67. AG Energiebilanzen e.V. (2022) Strommix - Stromerzeugung nach Energieträgern (Strommix) von 1990 bis 2021 (in TWh) Deutschland insgesamt. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/12/STRERZ_2021Febr2022_web.pdf. Accessed März 2022
68. Pfenninger S, Staffell I (2016) Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. *Energy Bd.* 114, Nov. 2016:1251–1265. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.060>
69. Staffell I, Pfenninger S (2016) Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *Energy Bd.* 114, Nov. 2016:1224–1239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068>.
70. Vázquez F, Koponen J, Ruuskanen V et al. (2018) Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: SOLETAIR proof-of-concept and improved process concept. *J. CO2 Util.* Bd. 28 Dez. 2018:235–246. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.09.026>
71. Haase M, Rösch C (2018) Life Cycle Assessment of the Thermochemical Conversion of Biomass for the Production of Fuel, Electricity and Heat. *Proc. 26th Eur. Biomass Conf. Exhib.* Bd. 14-17, Mai 2018. <https://doi.org/10.5071/26THEUBCE2018-4BV.6.6>
72. Haase M, Rösch C (2019) Sustainability Assessment of Innovative Energy Technologies - Integrated Biomass-based Production of Fuel, Electricity and Heat. *Proc. 27th Eur. Biomass Conf. Exhib.* Bd. 27-30, Mai 2019. <https://doi.org/10.5071/27THEUBCE2019-4AV.1.13>
73. Hennig M, Haase M (2021) Techno-economic analysis of hydrogen enhanced methanol to gasoline process from biomass-derived synthesis gas. *Fuel Processing Technology* 216. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106776>
74. Wulf C, Reuß M, Grube T et al. (2018) Life Cycle Assessment of hydrogen transport and distribution options. *Journal of Cleaner Production* 199:431–443. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.180>
75. Wulf C, Zapp P (2021) Sustainability Assessment of Innovative Energy Technologies – Hydrogen from Wind Power as a Fuel for Mobility Applications. *J sustain dev energy water environ syst* 9:1–21. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d8.0371>
76. Haase M, Wulf C, Baumann M et al. (2022) Prospective assessment of energy technologies: a comprehensive approach for sustainability assessment. *Energy, Sustainability and Society* 12. <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00344-6>
77. BMWi (2020) Die Nationale Wasserstoffstrategie. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20. Accessed 03 Jan 2021
78. FNR (2021) Kraftstoffverbrauch in Deutschland
79. FNR (2015) Biomassepotenziale von Rest und Abfallstoffen: Status quo in Deutschland
80. Scheer D, Nabitz L, Narasinghe N (2021) reFuels im Stakeholder-Diskurs: Eine Positionsanalyse von Verbänden aus Wirtschaft, Umwelt und Zivilgesellschaft
81. Scheer D, Schmieder L, Pfeiffer J (2021) Gesellschaftliche Implikationen von regenerativen Kraftstoffen im Expertendiskurs
82. Schulz M, Renn O (2009) Gruppendelphi: Konzept und Fragebogenkonstruktion. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden
83. Renn O, Kotte U (1984) Umfassende Bewertung der vier Pfade der Enquete-Kommission auf der Basis eines Indikatorkatalogs. In: Albrecht G, Steghelmann U (eds) *Energie im Brennpunkt: Zwischenbilanz der Energiedebatte*. HTV, München, pp 190–232
84. Webler T, Levine D, Rakel H et al. (1991) The Group Delphi: A Novel Attempt at Reducing Uncertainty. *Technological Forecasting and Social Change*:253–263
85. Renn O, Webler T (1998) Der kooperative Diskurs - Theoretische Grundlagen, Anforderungen, Möglichkeiten. In: Renn O, Kastenholz H, Schild P et al. (eds) *Abfallpolitik im kooperativen Diskurs: Bürgerbeteiligung bei der Standortsuche für eine Deponie im Kanton Aargau*. Hochschulverlag AG an der ETH Zürich



