

In der Forschungsinitiative „reFuels – Kraftstoffe neu denken“ befassen sich verschiedene Institute des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) gemeinsam mit dem Land Baden-Württemberg und über 20 Partnern aus der Automobil-, Automobilzuliefer- und Mineralölindustrie mit der effizienten Herstellung und Nutzung von regenerativen Kraftstoffen. Ziel ist, dass alle Fahrzeuge – inklusive der Bestandsflotte – regenerative Kraft-

stoffe tanken können, um eine schnelle ergänzende Lösung für eine CO₂-neutrale Mobilität zu schaffen. Sieben Institute des KIT sind an diesem Projekt beteiligt, das ein breites Spektrum an Themen abdeckt. Das Projekt gliedert sich in drei Cluster mit dem Ziel, regenerative CO₂-neutrale Kraftstoffe bereitzustellen und die Akzeptanz in der Gesellschaft zu fördern. Cluster A befasst sich mit der Herstellung und Bereitstellung von Kraftstoffen sowie den

energiewirtschaftlichen Aspekten. Aus diesem Grund befinden sich auf dem Campus Nord des KIT die Bioliq-Anlage für die Herstellung von regenerativem Benzin und das Energy Lab 2.0 für die Bereitstellung von Dieselmotorkraftstoff. In diesen Anlagen können Biomass-to-Liquid(BtL)- und Power-to-Liquid(PtL)-Kraftstoffe hergestellt werden. Im Cluster B werden die Kraftstoffe auf ihr Verhalten im Motor untersucht. Dabei wird

G40 – Ein Schritt zu einem CO₂-neutralen Benzinkraftstoff

Unmittelbar wirksame CO₂-Einsparungen können nur in der bestehenden Fahrzeugflotte erzielt werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, Drop-in-Kraftstoffe nach der aktuellen Norm EN228 herzustellen, die einen hohen regenerativ erzeugten Anteil aufweisen. Im Rahmen des Projekts „reFuels – Kraftstoffe neu denken“ wurde ein erster Schritt in diese Richtung getan: mit G40, einem Kraftstoff, der einen regenerativen Anteil von 40 Vol.-% sowie eine Oktanzahl größer 100 besitzt und innerhalb der EN228 liegt.



© KIT | Markus Breig | Amadeus Bramsiepe

Thomas Weyhing, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher
Mitarbeiter am Institut für
Kolbenmaschinen (IFKM)
am Karlsruher Institut für
Technologie (KIT).

**Prof. Dr. sc. techn.
Thomas Koch**
ist Leiter des Instituts für
Kolbenmaschinen (IFKM)
am Karlsruher Institut für
Technologie (KIT).

Dr.-Ing Uwe Wagner
ist Leiter in den Bereichen
Motorsystem, AGN und Alternative
Kraftstoffe am Institut für Kolben-
maschinen (IFKM) am Karlsruher
Institut für Technologie (KIT).

Prof. Dr. Nicolaus Dahmen
ist Abteilungsleiter der Thermochemi-
schen Umwandlung von Biomasse
des Instituts für Katalysatorforschung
und -technologie (IKFT) am Karlsru-
her Institut für Technologie (KIT).

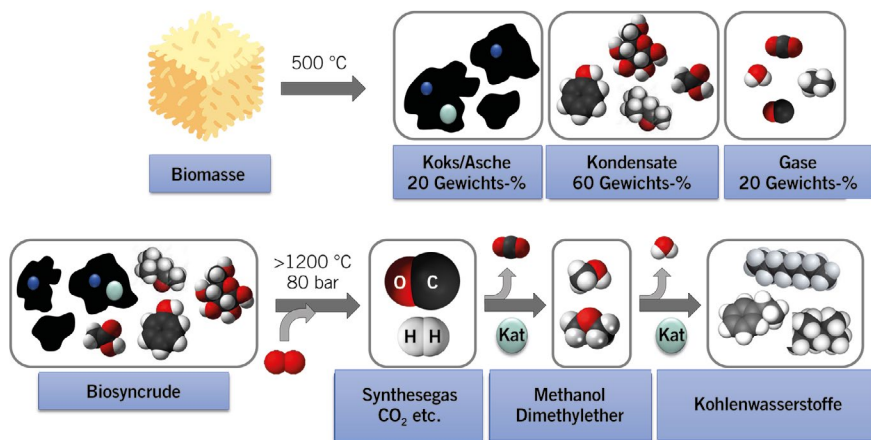


BILD 1 Schematisierte Abläufe zur Umwandlung von Biomasse in Kohlenwasserstoffe im Bioliq-Prozess (© IKFT | KIT)

die komplette Bandbreite an Untersuchungen abgedeckt: Komponentenprüfstände zum Beispiel für Einspritzversuche, Einzylindermotorprüfstände für grundlegende thermodynamische Untersuchungen, Vollmotorenprüfstände für transiente Fahrbedingungen unter Randbedingungen mit Temperaturen bis zu -20 °C und Fahrzeugtests mit portablem Emissionsmesssystem (Portable Emission Measurement System, PEMS). Cluster C schließt das Projekt mit der Technologiebewertung und der Systemanalyse ab. Eine Umweltbilanzierung der Synthese und der Nutzung dieser Kraftstoffe (Lebenszyklusanalyse) stellt eine ganzheitliche Betrachtung sicher. Daraus ergeben sich trotz Nutzung von Energie und Material aus regenerativen Quellen verbleibende CO₂-Äquivalente oder andere Wirkungsfaktoren wie Landnutzung und Wasserverbrauch. Die Ergebnisse der Bewertungen zur Kraftstoffherstellung und -anwendung werden mit Vertreterinnen und Vertretern der Zivilgesellschaft erörtert, beispielsweise mit Gewerkschaften, Arbeitgeber-, Verbraucher- und Umweltverbänden. Ziel ist es, die Öffentlichkeit über Rahmenbedingungen und Chancen der Herstellung und Nutzung von reFuels zu informieren, um so gesellschaftliche Akzeptanz für diese Kraftstoffe zu schaffen. Unterschiedliche Kraftstoffe wurden im Rahmen des Projekts untersucht, der Fokus liegt auf die Erfüllung der bestehenden Kraftstoffnormen. Regenerativer Diesel kann innerhalb der Norm EN590 oder EN15940 liegen. Entsprechende Kraftstoffe, wie zum Beispiel hydrierte Pflanzenöle (Hydrogenated Vegetable Oils, HVO) in Reinform oder als Blend, kön-

nen in der bestehenden Fahrzeugflotte eingesetzt werden. Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts zeigen keinen negativen Einfluss auf das thermodynamische beziehungsweise auf das Emissionsverhalten [1].

Ottomotorischer Kraftstoff muss innerhalb der Norm EN228 liegen. Dort liegen die Herausforderungen unter anderem in der Einhaltung des Aromatenanteils, der Dichte und der Siedekurve.

KRAFTSTOFF AUS DEM BIOLIQ-PROZESS

Der am KIT entwickelte, mehrstufige Bioliq-Prozess dient der Herstellung von synthetischem Benzin aus Biomasse. Haupteinsatzstoffe sind lignozellulosehaltige Biomassen wie Stroh oder Waldrestholz, die als Neben- und Koppelprodukte in der Land- und Forstwirtschaft anfallen

	Einheit	Referenzkraftstoff	reFuel
Name	-	E5	G40
Norm	-	EN228	EN228
Ethanol	% (v/v)	4,8	9,33
E70	% (v/v)	32,9	36
E100	% (v/v)	51,9	47,8
E150	% (v/v)	86,4	92,4
Siedeende	°C	193,9	178,8
Dichte	kg/m ³	748,1	751,1
ROZ	-	95,3	101,4
MOZ	-	85	90,9

TABELLE 1 Kraftstoffspezifikationen (© IFKM | KIT)

und nicht unmittelbar in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelherstellung stehen. Zur Demonstration des Prozesses und als Plattform für die weitere Forschung, Entwicklung und Optimierung der einzelnen Technologien als auch des kombinierten Prozesses wurde zwischen 2006 und 2013 eine Pilotanlage mit einer Leistung von 2 bis 5 MWth aufgebaut und seitdem betrieben. Zusätzliche Aufgabe ist die Bereitstellung von technisch relevanten Synthesegasmengen für Gasreinigungs- und weitere Syntheseverfahren sowie von Kraftstoffkomponenten für Anwendungstests in Motorenprüfständen oder Fahrversuchen.

Die Prozesskette, **BILD 1**, besteht aus vier technologischen Stufen: Zunächst wird Biomasse in einer bisher für Weizenstroh genutzten Schnellpyrolyse, in einer sehr schnellen Reaktion bei 500 °C zu einem energiedichten Zwischenprodukt umgewandelt. Die dabei entstehende Biokohle wird mit den flüssigen Produkten zu Suspensions-Brennstoffen aufgearbeitet, die lagerstabil und gut transportierbar sind. Anschließend erfolgt die Umsetzung dieser Brennstoffe in einem Flugstromvergaser bei über 1000 °C und bei Drücken von bis zu 80 bar, die auf die nachfolgende chemische Synthese eingestellt sind. Seit 2013 wurden so über 1000 t unterschiedlicher Slurrys umgesetzt. Vor der Synthese durchläuft das Rohsynthesegas eine trockene Hochdruck-Heißgasreinigung bis 800 °C, welche die Reinheitsanforderungen für Sauregase (HCl, H₂S) durch Festbetsorption erfüllt. Nach der Abtrennung von CO₂ und Wasser erfolgen die Methanol/Dimethylether- und nachfolgend die Kraftstoffsynthese. In der Syntheseanlage wurden seit 2017 in drei besonderen Betriebskampagnen rund 2100 l biobasiertes Rohbenzin produziert, die zu normgerechten Kraftstoffen aufbereitet wurden.

G40 – ZU 40 % REGENERATIVER BENZINKRAFTSTOFF

Mit der ersten Bioliq-Charge aus dem Jahr 2017 wurde ein Stichversuch an einem Einzylindermotorschiff durchgeföhrt [2]. Dort zeigte bereits eine Blendrate von 10 % eine Erhöhung der Partikelanzahlmissionen. Da diese Bioliq-Charge reich an Aromaten >C9 war, wurde der Prozess optimiert. Die

nächsten Blindversuche zeigten den gewünschten Effekt, der Blind erfüllte aber noch nicht die Norm EN228.

Mit G40 konnte die Kraftstoffnorm erreicht und die Blendrate erhöht werden. Das Bioliq-Leichtbenzin konnte mit 60 % fossilen Bestandteilen und 10 % Ethanol zu einem 40 % regenerativen G40-Benzinkraftstoff innerhalb der EN228 geblindet werden. Ein limitierender Faktor ist weiterhin der hohe Aromatenanteil des Bioliq-Leichtbenzins. Verglichen wurde der Kraftstoff in den folgenden Untersuchungen mit standardmäßigem E5-Kraftstoff, folgend als Referenzkraftstoff bezeichnet. Einen Auszug der Kraftstoffspezifikationen können **TABELLE 1** entnommen werden.

Drei wesentliche Unterschiede sind zwischen den Kraftstoffen zu erkennen, die zu unterschiedlichen Verhalten führen können: der erhöhte Ethanolanteil, die höhere Oktanzahl sowie das niedrigere Siedende bei G40. Vor allem mit der Oktanzahl von 101,4 kann der Verbrennungsmotor wirkungsgradoptimaler betrieben und ein zusätzliches Verbrauchspotenzial ausgeschöpft werden.

VERSUCHSAUFBAU

Als Versuchsmotor kam ein seriennaher Dreizylinder-Ottomotor mit 1 l Hubraum zum Einsatz. Dieser war auf allen Zylinder indiziert sowie mit Abgasmesstechnik versehen. Für die gasförmigen Emissionen wurde eine AMA4000 sowie ein Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) genutzt, für die festen Bestandteile ein DMS500. Der Prüfaufbau ist in **BILD 2** dargestellt. Die Emissionen werden vor Abgasnachbehandlung entnommen. Nach einer Versuchsreihe mit einem Kraftstoff wurde das komplette Kraftstoffsystem gespült sowie der Motor warmgefahren. Der Prüfstand bietet die Möglichkeit, die Prüfstandszellentemperatur auf bis zu -20 °C sowie einzelne Flüssigkeiten auf -35 °C zu konditionieren. Der Fokus der Untersuchungen lag

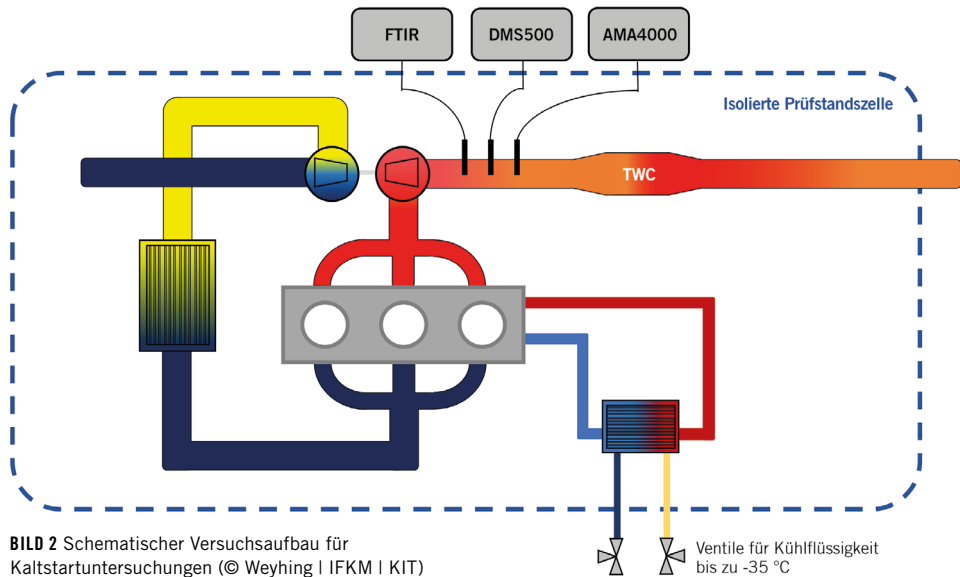


BILD 2 Schematischer Versuchsaufbau für Kaltstartuntersuchungen (© Weyhing | IFKM | KIT)

Kraftstoff	E5	G40
Δ-Kraftstoffverdünnung	2,90 %	2,70 %
Δ-Viskosität 40 °C	-6,76 mm ² /s	-7,29 mm ² /s
Δ-Viskosität 100 °C	-0,89 mm ² /s	-0,9 mm ² /s

TABELLE 2 Ergebnisse der Ölverdünnung (Δ = Verdünnungsprobe – Referenzprobe) (© IFKM | KIT)

auf dem transienten Kaltstartverhalten. Weiterhin wurden auch Untersuchungen am Einzylinderforschungsmotor durchgeführt, die die Ergebnisse der Kaltstartversuche bestätigen.

EINFLUSS AUF DIE ÖLVERDÜNNUNG

Um den Einfluss auf das Tribologiesystem zu sehen, wurde eine Testreihe zur Ölverdünnung durchgeführt. Nach einem Ölwechsel und einer kurzen Einlaufphase wurde die Referenzprobe gezogen. Die Ölverdünnung hat über drei WLTC mit jeweils einer Dauer von 30 min stattgefunden. Die Starttemperaturen betragen einmal -15 °C und zwei-

mal -7 °C. Nach dem letzten Zyklus wurde die Verdünnungsölprobe gezogen und anschließend im Labor analysiert. In **TABELLE 2** sind die Ergebnisse der Ölverdünnung zu sehen. Die Kraftstoffe verhalten sich in allen Eigenschaften sehr ähnlich, sodass mit keinen Schwierigkeiten für das Tribologiesystem gerechnet werden kann. Ein Quervergleich mit weiteren Motorölen und Motoren wäre zudem sinnvoll.

KALTSTARTUNTERSUCHUNGEN

Für die Untersuchungen bei kalten Temperaturen wurde ein kompletter WLTC mit einer Dauer von 30 min gefahren. Um weitere fahrdynamischere Bedingungen abzubilden, wurde ein gekürzter 13-minütiger aggressiver RDE-Zyklus untersucht [3, 4]. Die Leistungsprofile können **BILD 3** entnommen werden. Als Starttemperaturen wurden 20 °C, 0 °C, -7 °C und -15 °C gewählt. Die Prüfstandszelle sowie der Motor haben sich während des Prüflaufs erwärmt.

In **BILD 4** sind die gasförmigen spezifischen Emissionen über unterschiedliche Starttemperaturen über den WLTC dargestellt. Bei Kohlenstoffmonoxid

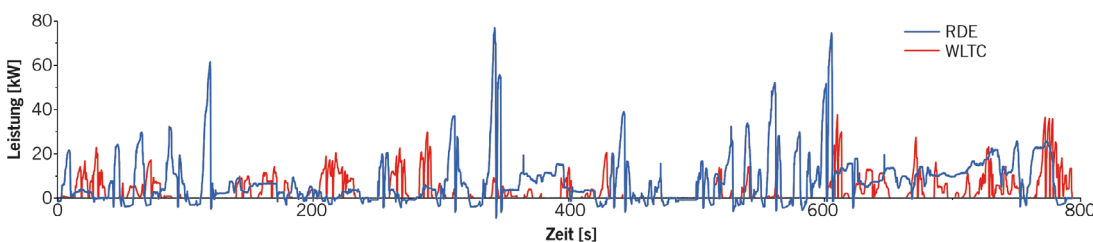


BILD 3 Leistungsprofil der verwendeten Testzyklen (WLTC gekürzt dargestellt) (© Weyhing | IFKM | KIT)

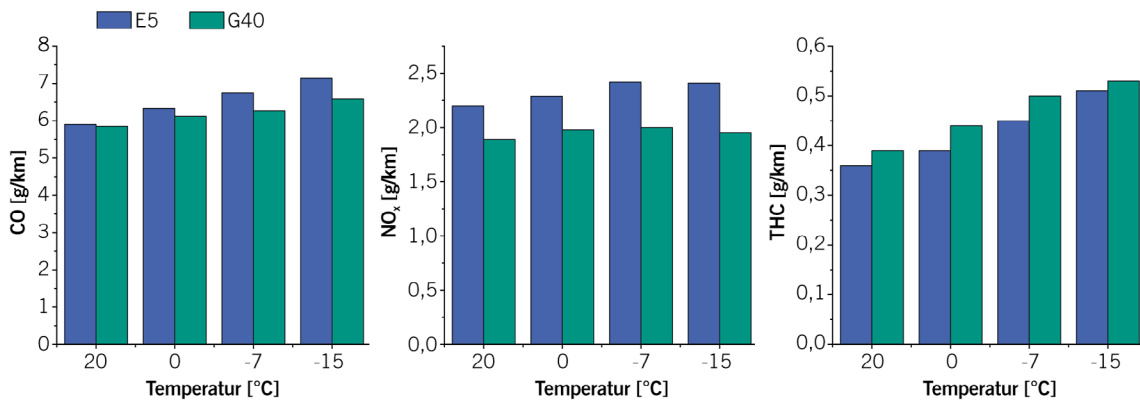


BILD 4 Gasförmige Emissionen des WLTC-Zyklus bei unterschiedlichen Starttemperaturen (© Weyhing | IFKM | KIT)

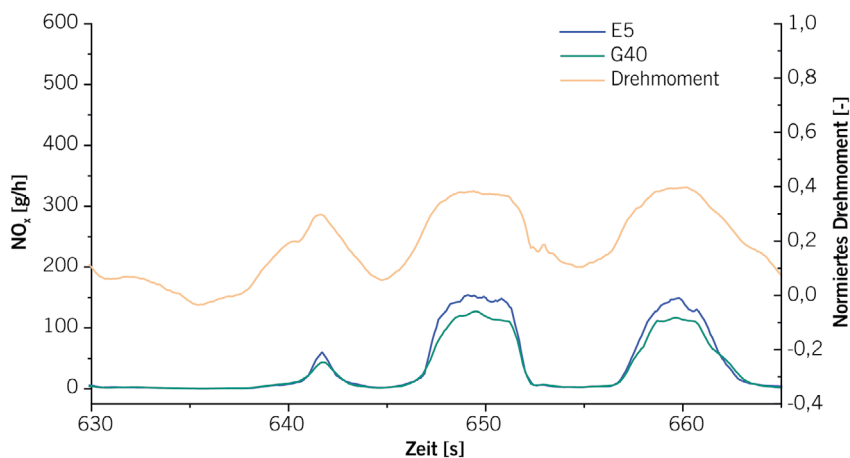


BILD 5 Ausschnitt der Stickoxidemissionen eines WLTC-Zyklus bei -7 °C Starttemperatur (© Weyhing | IFKM | KIT)

sind bei 20 °C keine Unterschiede zwischen den Kraftstoffen zu erkennen. Erst bei niedrigeren Temperaturen wird der Unterschied zwischen E5 und G40 größer, jedoch nicht nennenswert. Bei den Stickoxiden liegt der Referenzkraftstoff über alle Temperaturen gesehen ober-

halb von G40. In BILD 5 ist ein Ausschnitt der Stickoxidemissionen eines WLTC mit -7 °C Starttemperatur dargestellt. Dort ist zu erkennen, dass die NO_x-Emissionen vor allem in niedrigen und mittleren Lastbereichen unterhalb von E5 liegen. Dieses Verhalten ist mit

auf den höheren Ethanolgehalt (9,3 zu 4,8 %) zurückzuführen, der eine bessere Innenkühlung verursacht. Dieses Verhalten ist auch im stationären Kennfeld zu erkennen.

Die Erwartung, mit einer höheren Oktanzahl auch höhere Stickoxidkonzentrationen zu erhalten, da wirkungsgradoptimaler gezündet werden kann, ist im niedriglastigen WLTC nicht gegeben.

Bei den unverbrannten Kohlenwasserstoffen verhalten sich die Kraftstoffe über den Temperaturverlauf gesehen identisch. G40 liegt bei jedem Temperaturniveau leicht über dem Referenzkraftstoff.

Alle aufgezeigten Rohemissionen zeigen keine relevanten Unterschiede zwischen den beiden Kraftstoffen. Mit einer nachgeschalteten Abgasnachbehandlung werden die Unterschiede keine Relevanz mehr haben.

Um stärker transiente Bedingungen abzubilden, wurde ein aggressiver RDE-Zyklus gewählt. Auch hier wurden Starttemperaturen bis zu -15 °C

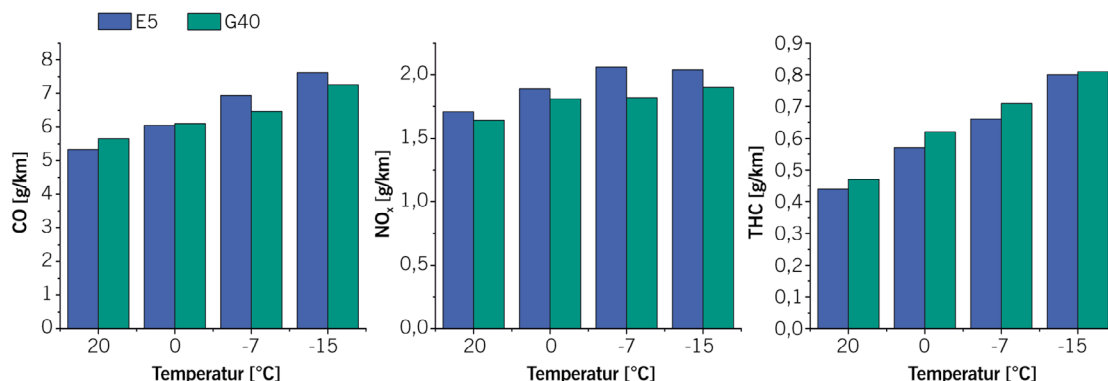


BILD 6 Gasförmige Emissionen des RDE-Zyklus bei unterschiedlichen Starttemperaturen (© Weyhing | IFKM | KIT)

untersucht. In **BILD 6** sind die gasförmigen Emissionen über den RDE-Zyklus aufgetragen. Der Trend der Ergebnisse des WLTC zeigen sich ebenfalls in den RDE-Testläufen. Bei Kohlenstoffmonoxid und den Stickoxiden liegt G40 vor allem bei niedrigen Temperaturen unterhalb von E5. Bei den unverbrannten Kohlenwasserstoffen ist G40 wieder minimal oberhalb von E5. Die Kraftstoffe verhalten sich jedoch sehr ähnlich, und die Unterschiede würden wie bereits erwähnt mit einem nachgeschalteten Dreiwegekatalysator sehr klein werden. Beim Motorstart konnten vor allem bei den sehr niedrigen Temperaturen keine Unterschiede betrachtet werden. Es gab keine Startschwierigkeiten, und auch die Rohemissionen verhielten sich in den ersten 30 s nach Start sehr ähnlich.

Aufgrund der Siedekurve und des 15 K tieferen Siedeendes von G40 sind Vorteile bei den Partikelemissionen zu erwarten. In **BILD 7** ist die Partikelanzahl über verschiedene Starttemperaturen innerhalb des RDE-Zyklus dargestellt. G40 verhält sich wie erwartet etwas besser als der Referenzkraftstoff. In **BILD 8** ist ein Ausschnitt eines -15-°C-RDE-Zyklus zu sehen. Der Verlauf der Emissionen der einzelnen Kurven liegen sehr nah beieinander, und auch die Lastspitzen werden von beiden Kraftstoffen ähnlich gut abgebildet. Die Partikelanzahl verhält sich allgemein bei niedrigen Temperaturen sehr ähnlich. Um die Partikel genauer zu charakterisieren, wurde bei einer Lastaufschaltung die Partikelverteilung betrachtet, **BILD 8** (roter Kreis). Dabei wurde das Maximum der Partikelanzahlkonzentration für den jeweiligen Kraftstoff gewählt. Die Partikelverteilung ist in **BILD 9** dargestellt und zeigt sehr kleine Unterschiede zwischen E5 und G40. Dieses Partikel-

verhalten konnte auch über weiterführende generische Lastsprungversuche bestätigt werden [5].

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziel dieser Untersuchungen war es, einen drop-in-fähigen Benzinkraftstoff

herzustellen, der einen hohen regenerativen Anteil hat. Mit G40 ist dieser Schritt gelungen: Mit 30 % BtL-Kraftstoff und 10 % Ethanol kann direkt und effektiv CO₂ eingespart werden. Die Verwendung des in der Norm EN228 liegenden Kraftstoffs wurde an einem Einzylinderforschungsmotor untersucht, wobei keine negativen Aus-

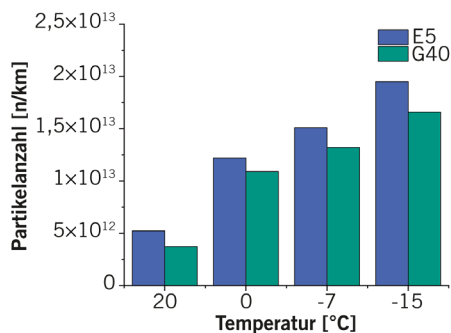


BILD 7 Partikelanzahlemissionen des RDE-Zyklus bei unterschiedlichen Starttemperaturen
(© Weyhing | IFKM | KIT)

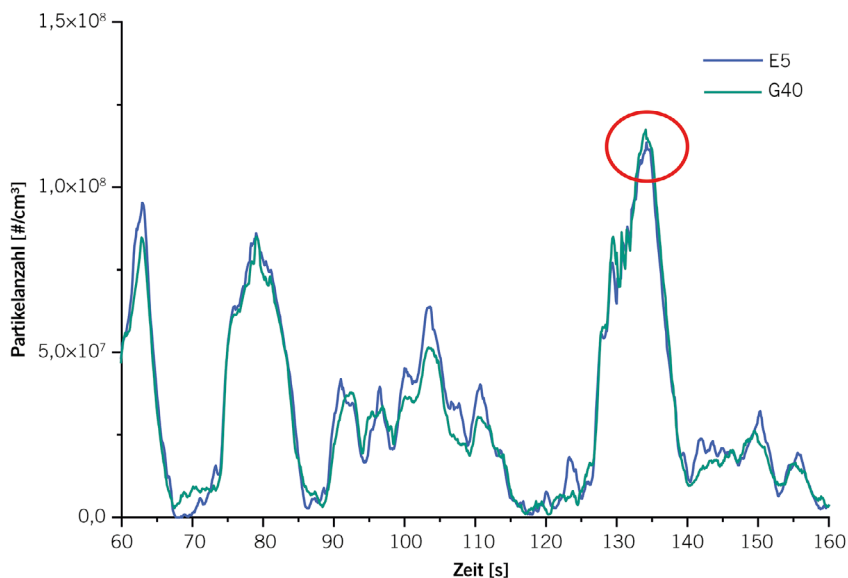


BILD 8 Verlauf der Partikelanzahlmissionen eines RDE-Zyklus bei -15 °C Starttemperatur
 (© Weyhing | IFKM | KIT)

LITERATURHINWEISE

- [1] Weyhing, T. et al.: reFuels – rethinking fuels: Performance of regenerative fuels. In: Liebl, J.; Beidl, C.; Maus, W. (Hrsg.): Internationaler Motorenkongress 2021. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2021
- [2] Michler, T. et al.: Gasoline from the bioliq process: Production, characterization and performance. In: Fuel Processing Technology, Volume 206 (2020)
- [3] Appel, D. et al.: Influence of Low Ambient Temperatures on the Exhaust Gas and Deposit Composition of Gasoline Engines. In: Journal of energy resources technology, 8/2021, Band 143
- [4] Moradi, M. et al.: Modeling the emissions of a gasoline engine during high-transient operation using machine learning approaches. In: International journal of engine research, SAGE Publications, 2021
- [5] Weyhing, T. et al.: Fulfilling fuel specifications and resulting challenges of reFuels. 9. Internationaler Motorenkongress, Baden-Baden, 2022

wirkungen festgestellt worden sind. Auch Kaltstartuntersuchungen zeigten keine Probleme mit dem G40-Kraftstoff auf. Dieser verhält sich sowohl bei der Ölverdünnung als auch bei den gasförmigen Emissionen dem Referenzkraftstoff E5 sehr ähnlich. Bei der Partikelanzahl kann ein leichter Vorteil von G40 beobachtet werden. In Fahrzeugversuchen mit PEMS-Messsystem wurde zudem die Tauglichkeit auf der Straße bewiesen. Dort spiegeln sich die Ergebnisse der Prüfstandsuntersuchungen wider [1].

Kraftstoffführende Komponenten wie Einspritzventile oder Dichtungen fielen in keiner der durchgeführten Messreihen aus. Als Resümee kann gezogen werden, dass G40 als erster

Schritt zu einem CO₂-neutralem Kraftstoff in der Bestandsflotte ohne negativen Effekte eingesetzt werden kann.

Im Bioliq-Syntheseprozess entsteht zu etwa zwei Dritteln das hier untersuchte Bioliq-Leichtbenzin, das weitere Drittel ist das sogenannte Bioliq-Schwerbenzin. Dieses besteht zum größten Teil aus Aromaten, die in einem weiteren Prozessschritt aufgearbeitet werden müssen. Mit dem aufgearbeiteten Schwerbenzin und dem Leichtbenzin lässt sich der regenerative Anteil eines Blends weiter steigern. Ziel ist es, einen möglichst zu 100 % regenerativen, in der EN228 liegenden Kraftstoff herzustellen, um die CO₂-Emissionen der Bestandsflotte direkt zu reduzieren.

DANKE

Diese Arbeiten entstanden dank der Förderung des Strategiedialogs Automobilwirtschaft SDA und des Verkehrsministeriums Baden Württemberg im Rahmen des Projekts „reFuels- Kraftstoffe neu denken“. Weiterhin danken die Autoren Projektleiter Dr.-Ing. Olaf Toedter, Mitra Zabihigivi, M. Sc., Jonathan Ziegler, M. Sc., und Jakob König, B. Sc., vom Institut für Kolbenmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie.

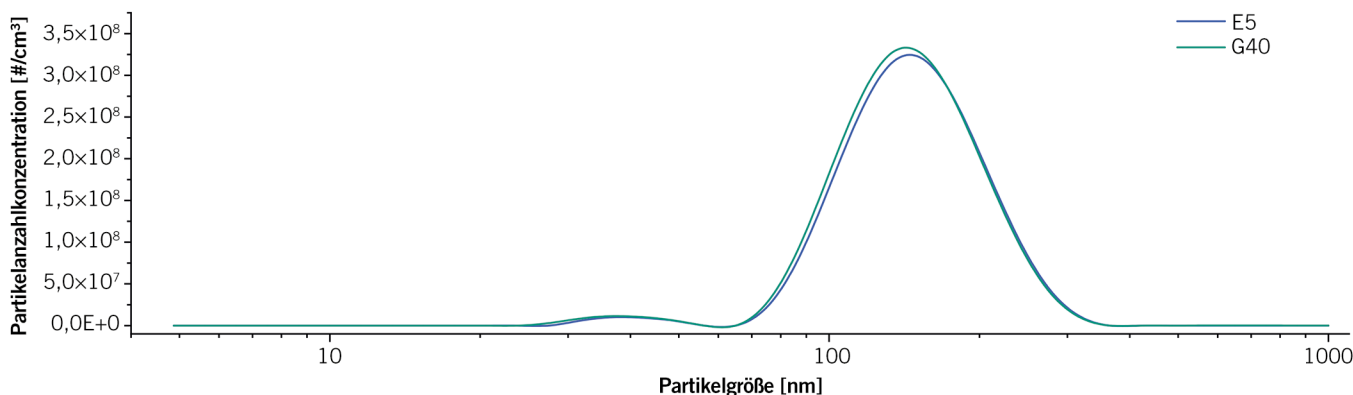


BILD 9 Partikelverteilung zum Zeitpunkt der maximalen Partikelanzahl beider Kraftstoffe (siehe roter Kreis **BILD 8**) (© Weyhing | IFKM | KIT)