

Synthetische Kraftstoffe

Konventionelle und neuartige Kraftstoffe für Personenwagen

Flüssige synthetische Kraftstoffe haben einen vergleichbar hohen Energiegehalt wie klassische mineralölstämmige Kraftstoffe. Sie lassen sich kompakt, langfristig und ohne unüberwindbare Risiken lagern, transportieren und tanken. Aufgrund der chemischen Strukturen sind grundsätzlich niedrigere Schadstoff-Rohemissionen zu erwarten. Klassische Abgasnachbehandlungsverfahren (Katalysatoren, Partikelfilter usw.) werden aber auch mit synthetischen Kraftstoffen nicht entbehrlich, sondern müssen voraussichtlich den veränderten Rohemissionen angepasst werden. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften der flüssigen, synthetischen Kraftstoffe entsprechen grundsätzlich nicht den Anforderungen der althergebrachten Kraftstoffnormen DIN EN 590 für Diesel und DIN EN 228 für Ottokraftstoffe. Für synthetische beziehungsweise paraffinische Dieselmotorkraftstoffe wurde deshalb die spezielle Norm DIN EN 15940 in den letzten Jahren entwickelt, da diese typisch über eine signifikant geringe Dichte verfügen. Bei einer Herstellerbefragung durch den ADAC im Frühsommer 2019 hat kein Pkw-Hersteller eine allgemeine Freigabe für Kraftstoffe gemäß DIN EN 15940 erteilt. Einige Hersteller (BMW, Ford, Opel) prüfen angeblich noch (Stand Oktober 2019) die Tauglichkeit ihrer Modelle für diesen Kraftstoff. Etwaige konkrete Freigaben sind aber ungewiss. Möglicherweise werden erst künftige Pkw-Modelle für DIN EN 15940 Kraftstoffe ausgelegt und abgestimmt.



Forschungseinrichtung für synthetische Kraftstoffe des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Foto: Laila Tkotz, KIT.

Aktuelle Kraftstoffe und deren Randbedingungen

Kraftstoffe sind Brennstoffe, die im Wesentlichen aus Kohlenwasserstoffverbindungen bestehen. Ihre chemisch gebundene Energie kann durch Verbrennung mit Luft in mechanische Arbeit (Prinzip der Verbrennungskraftmaschinen) umgewandelt werden. Dabei wirken die Verbrennungsgase als Kraftüberträger. Kraftstoffe können bei üblichen atmosphärischen Drücken und Temperaturen flüssig (beispielsweise Benzin und Diesel) oder gasförmig (beispielsweise Erdgas) sein. Ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal liegt im Arbeitsverfahren der üblichen Automotoren: Selbst- bzw. Kompressionszündung (Dieselmotor) oder Fremdzündung (Ottomotor). Im Verdichtungstakt des Dieselmotors wird infolge der starken Verdichtung die Luft stark erhitzt, sodass der eingespritzte Kraftstoff sich von selbst entzündet. Eine bedeutende Eigenschaft des Dieselmotorkraftstoffes ist daher seine Zündwilligkeit (Cetanzahl). Beim Ottomotor darf sich hingegen das Benzin-Luft-Gemisch im Verdichtungstakt nicht selbst entzünden, sondern wird zu einem definierten Zündzeitpunkt von einem elektrischen Zündfunken entflammt. Im Gegensatz zu Dieselmotorkraftstoff sollte Ottomotorkraftstoff eine geringe Zündwilligkeit aufweisen. Diese Eigenschaft wird Klopfestigkeit genannt und durch die Oktanzahl klassifiziert. Darüber hinaus müssen Kraftstoffe viele weitere wichtige Eigenschaften für die Nutzung im Kraftfahrzeug besitzen.

Handelsübliche Ottomotorkraftstoffe sind auch noch heute grundsätzlich Erdöl-Verschnitte niedrigoktaniger Destillatbenzine mit hochoktanigen, aus Veredlungsverfahren (Isomerisierung, Reformierung) stammenden Benzinen. Üblich ist auch die Vermischung mit sauerstoffhaltigen Substanzen, wie Alkoholen (beispielsweise Ethanol, Isopropanol) oder Ether (etwa ETBE, MTBE). Ethyl-tert-butylether (ETBE) wird analog zu Methyl-tert-butylether (MTBE) zur Verbesserung der Klopfestigkeit dem Ottomotorkraftstoff zugesetzt. MTBE wird aus fossilen Rohstoffen erzeugt bzw. synthetisiert. ETBE dagegen kann z.B. aus fossilem Isobuten (Kohlenwasserstoffverbindung) und Ethanol aus nachwachsenden Rohstoffen (Bioethanol) erzeugt werden.

Dieselmotoren werden in den Raffinerien etwas einfacher produziert. Wiederum handelt es sich grundsätzlich um Erdöl-Destillate, die sogenannten Mitteldestillate bzw. Gasöle. Die gewünschten Eigenschaften erhält die Raffinerie durch passende Schnitte, also definierte Siedefraktionen, und Additiven zur Erhöhung der Cetanzahl und zur Verbesserung des Kälteverhaltens.

Heutige Kraftstoffe sind also veredelte Naturprodukte. Die Produktionsverfahren der Raffinerien sind sehr stark auf die üblicherweise per Pipeline angelieferten Rohöle spezialisiert und optimiert.

Schrittmacher für die Weiterentwicklung der Kraftstoffe waren stets die Fahrzeughersteller und indirekt die Legislative mit Gesetzen zur Minderung der Emissionen.

Der Wildwuchs an unterschiedlichen Kraftstoffmarken und Sorten war für Verbraucher unübersichtlich und erschwerte auch eine wirtschaftliche flächendeckende Versorgung. Bis zu den ersten Kraftstoffnormen dauerte es erstaunlich lange: Erst 1976 erschien die erste DIN-Norm (Deutsches Institut für Normung e. V.) für Ottokraftstoff, die 1992 durch eine europäische Norm, die EN 228, ersetzt wurde. Die erste DIN-Norm für Dieselmotoren wurde 1954 veröffentlicht, auch sie wurde 1992 durch eine europäische Norm, die EN 590, ersetzt.

Bedeutende Meilensteine waren in letzten Jahrzehnten wegen der Einführung der Katalysatortechnik das Verbot des Zumischens von Bleitetraäthyl (umweltschädlich, giftig und ein Katalysatorgift) in den Ottokraftstoff als Antiklopfmittel, welches durch MTBE oder ETBE ersetzt werden konnte. Weitere vom Gesetzgeber eingeforderte Minderungen der Abgasemissionen ab etwa 2006, die nur mit weiterentwickelten Schadstoffreduzierungstechniken möglich sind, setzten schwefelarme- bzw. schwefelfreie Otto- und Dieselmotoren voraus. Die Aufwendungen in den Raffinerien waren dafür erheblich: Eine weiterer Prozessschritt – das Claus-Verfahren – wurde zur Entschwefelung erforderlich und beim Dieselmotoren musste auch die Minderung der Schmierfähigkeit infolge fehlenden Schwefels etwa durch Additivierung kompensiert werden.

Fahrzeughersteller orientieren sich naturgemäß bei der Entwicklung neuer Fahrzeugmotoren primär an den Erwartungen des Marktes, den Umwelt- und Abgasgesetzen und den verfügbaren Kraftstoffqualitäten der Zielmärkte. Die Fahrzeugherstellerverbände ACEA (European Automobile Manufacturers), AUTO ALLIANCE (Alliance of Automobile Manufacturers/USA), EMA (Truck and Engine Manufacturers Association/USA) und JAMA (Japan Automobile Manufacturers Association) publizieren regelmäßig seit 1998 die „WORLDWIDE FUEL CHARTER“. Das umfangreiche Werk dient nicht nur zur Information der Fahrzeughersteller, sondern soll auch den nationalen Gesetzgebern Impulse für die Qualität der zukünftig anzubietenden Kraftstoffe aufzeigen.

In Deutschland werden die zulässigen Kraftstoffe vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) mit der „Zehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen – 10. BImSchV)“ vorgeschrieben. Die 10. BImSchV stützt sich wiederum auf die nationalen bzw. europäischen Kraftstoffnormen, z.B. DIN EN 228 und DIN EN 590.

Bei jeder Weiterentwicklung der Kraftstoffe bzw. der gesetzlichen Vorgaben und der Norm ist die Abwärtskompatibilität dringend zu beachten; d.h. die Versorgung der Fahrzeuge des Bestandes und auch historischer Fahrzeuge muss sichergestellt sein.

Anforderungen an zukünftige Kraftstoffe:

Für die Verwendung von neuartigen flüssigen Kraftstoffen in Reinform oder bei Mischungen von neuartigen Kraftstoffen mit derzeit verfügbaren und genutzten Kraftstoffen sollten hinreichende Bedingungen erfüllt sein:

- günstig und in großen Mengen herstellbar
- möglichst kohlendioxidneutrale Herstellung
- Gewinnung und Herstellung unter Einhaltung allgemeiner ökologischer und ethischer Standards
- Handhabungssicherheit – etwa hinsichtlich Toxizität und Explosionsschutz
- Lagerungs- und Alterungsstabilität
- Kompatibilität mit den üblichen Materialien (etwa Schläuchen, Kunststoffen, Metallen)
- Kompatibilität mit den üblichen Motoren und Abgasnachbehandlungssystemen
- Mischbarkeit mit konventionellen Kraftstoffen
- Keine negativen Effekte auf die Abgasrohmissionen

- Keine unerwünschten Wirkungen auf das Motorenöl
- Betriebssicherheit bei den üblichen Temperaturen (etwa Filterverstopfung, Dampfblasen)
- Ohne Umbaumaßnahmen im Fahrzeug verwendbar (Drop-in)

Kurzgesagt: Fahrzeuge müssen auch mit neuen Kraftstoffen uneingeschränkt für den bestimmungsgemäßen Betrieb tauglich sein. Aus Gründen der Sachmangelhaftung, Produkthaftung und der Sicherheit (Verkehrs- und Betriebssicherheit) sind konkrete Freigaben der Fahrzeughersteller daher praktisch unverzichtbar.

Gewinnung und Herstellung zukünftiger Kraftstoffe

Kraftstoffe sind grundsätzlich Energieträger, d.h. die in chemischer Form gespeicherte Energie kann durch Verbrennung – also die Oxidation mit Sauerstoff – in Wärme und als Wirkung in mechanische Energie gewandelt werden. Bisherige Kraftstoffe – etwa Mineralöle, Pflanzenöle und Erdgas – werden bereits als Energieträger gefördert oder gewonnen und mit relativ einfachen Prozessen in verkehrstaugliche Produkte veredelt.

Was sind synthetische Kraftstoffe? Die Verbindung von Elementen und einfachen Verbindungen zu neuen Stoffen wird Synthese genannt. Ein klassisches Verfahren zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen wurde von den deutschen Chemikern Franz Fischer und Hans Tropsch 1925 am Kaiser-Wilhelm-Institut für Kohlenforschung erfunden. Ziel war die vom Mineralöl unabhängige Versorgung Deutschlands mit Kraftstoffen. Bei der Fischer-Tropsch-Synthese werden mithilfe von Katalysatoren das Element Wasserstoff H mit der Verbindung Kohlenmonoxid CO (zusammen auch Synthesegas genannt) in Kohlenwasserstoff-Moleküle verwandelt. Bei dieser Hydrierung von Kohlenstoffmonoxid entstehen primär – und abhängig vom Katalysatormaterial Eisen, Kobalt usw. – überwiegend lange, gesättigte Kettenmoleküle, auch Paraffine oder aliphatische Verbindungen genannt. Je nach Güte der Fischer-Tropsch-Synthese können die Produkte direkt als Treibstoff (z.B. für Düsentriebwerke) oder für die Herstellung von Otto- und Dieselmotorkraftstoffen für Straßenfahrzeuge verwendet werden. Neben einer Raffination – ähnlich von Mineralölen – sind Additive für die gewünschten Eigenschaften grundsätzlich notwendig.

Ursprünglich lieferte verschwelte bzw. vergaste Braun- oder Steinkohle das für die Fischer-Tropsch-Synthese notwendige Synthesegas.

CtL (Coal-to-Liquids)

Die Fischer-Tropsch-Synthese (FT) machte nach dem Krieg zunächst in Südafrika Furore. Das Land war aus politischen Motiven mit Sanktionen belegt und deshalb praktisch von Erdöllieferungen ausgeschlossen. Dafür gab es dort in großen Mengen hochwertige Steinkohle. Die Regierung investierte daher ab dem Jahr 1950 in das Fischer-Tropsch-Verfahren und entwickelte es stetig weiter. Es entstand das Unternehmen South African Synthetic Oil Limited (Sasol). Noch heute liefert das Unternehmen rund ein Drittel der in Republik Südafrika verkauften Kraftstoffe und bietet weltweit Wachse und chemische Grundstoffe aus der FT-Synthese an. Zusätzlich verarbeitet Sasol heute neben Kohle auch Erdgas.

GtL (Gas-to-Liquids)

Shell nutzt die Fischer-Tropsch-Synthese, um das bei der Erdölförderung zwangsläufig freigesetzte Erdgas zu höherwertigeren und flüssigen Produkten umzuwandeln. Shell beschreibt ihre Produktion von GtL wie folgt:

Das Herstellungsverfahren für Shell GTL Fuel trägt die Bezeichnung SMDS (Shell Middle Distillate Synthesis) und umfasst drei Hauptschritte:

1. *Gasifizierung*
Aus Erdgas wird durch partielle Oxidation Synthesegas (CO und H₂) hergestellt.
2. *Synthese*
Synthesegas wird in einem Niedrigtemperatur-Fischer-Tropsch-Verfahren zu flüssigen Kohlenwasserstoffen, einem „synthetischen Rohöl“, umgewandelt.
3. *Hydrocracken*
Umwandlung in Produkte

Das synthetische Rohöl wird weiterverarbeitet und zu hochwertigen paraffinischen Produkten wie Kraftstoffen, Flugtreibstoffen und chemischen Grundstoffen fraktioniert.

Shell hat das SMDS-Verfahren zunächst 1993 in der ersten kommerziellen GTL Anlage der Welt, die in Bintulu in Malaysia eröffnet wurde, implementiert. Inzwischen produziert Bintulu 14.700 Barrel GTL Produkte am Tag. Die in Bintulu gesammelten Erfahrungen waren ausschlaggebend für den Erfolg der zweiten kommerziellen, von

Shell und Qatar Petroleum gemeinsam entwickelten GTL-Anlage in Katar, die unter dem Namen „Pearl“ bekannt ist. Pearl, die größte GTL-Anlage der Welt, ist ein vollintegriertes Upstream/Downstream-Projekt. Bei vollständiger Auslastung produziert die Anlage 140.000 Barrel GTL-Produkte am Tag sowie 120.000 Barrel Öläquivalent an Kondensaten und anderen Produkten aus der Gasverarbeitung. Die Produktpalette von Pearl umfasst GTL-Gasöl, GTL-Naphtha, GTL-Kerosin, GTL-Normalparaffine und GTL-Grundöle. Shell GTL Fuel wird vornehmlich aus der „Gasöl“-Fraktion gewonnen, deren Eigenschaften herkömmlichem Diesel ähneln.

Laut Shell wird dem Premium-Dieselmotorenkraftstoff V-Power etwas GtL beigemischt. Den genauen prozentualen Anteil hat Shell auf konkrete Anfrage der ADAC Fahrzeugtechnik nicht benannt. Zudem sollen bei einigen Shell-Motorenölen Anteile von GtL-Grundölen beigemischt werden.

BtL (Biomass-to-Liquid)

Ähnlich der Kohle eignen sich auch trockene Biomasse, beispielsweise Stroh, Holz, Energiepflanzen, für die Synthesegaserzeugung. Die zerkleinerte Biomasse wird in einen Vergasungsreaktor eingetragen und unter Zuführung von Wärme, Druck und einem Vergasungsmittel, zum Beispiel Sauerstoff, zu einem Synthesegas umgesetzt. Dieses setzt sich vor allem aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid zusammen. Nach einer Gasreinigung und -konditionierung werden daraus CO und H₂, die man mittels Fischer-Tropsch-Verfahren zum BtL-Kraftstoff synthetisiert.

Mehrere Forschungsprojekte beschäftigen sich mit unterschiedlichen Verfahren zur BtL-Synthese (basierend auf den Beschreibungen der Unternehmen bzw. Institute):

Carbo-V-Verfahren

Die Carbo-V[®]-Vergasung ist ein für alle organischen Stoffe universelles Vergasungsverfahren, welches auf einem „Flugstromprinzip“ basiert. Dieses Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass es ein Vergasungsverfahren für Biomasse ist, welches ein teerfreies Gas liefert, das unmittelbar in einem Gasmotor verstrombar oder auch zur Herstellung von Synthesegas verwendbar ist.

Anmerkung: Die inzwischen insolvente CHOREN Industries GmbH in Freiberg/Sachsen verfügt bzw. verfügte über das patentierte Carbo-V[®]-Vergasungsverfahren.

Bioliq-Verfahren

Das bioliq[®]-Verfahren wird vom Institut für Katalyseforschung und -technologie (IKFT) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt, um aus trockener Biomasse synthetische Kraftstoffe und chemische Grundprodukte herzustellen. Strom und Wärme dienen als Nebenprodukte zur Deckung des Prozessenergiebedarfs. Die Entwicklung ist primär auf die Nutzung von relativ preisgünstiger, bisher weitgehend ungenutzter Restbiomasse ausgerichtet. Diese enthalten mehr Asche und Heteroatome als etwa rindenfreies Holz und machen die Entwicklung entsprechender Verfahren notwendig. Derartige Stoffe weisen zudem meist eine niedrige Energiedichte auf. Um teure Transportwege einzusparen, kombiniert das Karlsruher BtL-Konzept die dezentrale Erzeugung des energiereichen Biosyncrude durch Schnellpyrolyse mit dessen zentraler Umwandlung zu Synthesegas und anschließender Veredelung im industriellen Maßstab zum gewünschten Endprodukt. Da die Energiedichte des Biosyncrude bezogen auf das Volumen von trockenem Stroh um mehr als eine Größenordnung höher ist, trägt die dezentrale Energieverdichtung zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens bei. Als Nebenprodukte entstehen Wärme und Strom, die einen großen Teil der Prozessenergie decken und damit zu dem geforderten hohen CO₂-Reduktionspotenzial beitragen. Die Biomasse kann so stofflich bzw. energetisch vollständig verwertet und genutzt werden. Die gesamte Prozesskette wurde im KIT in Form einer Pilotanlage errichtet und wird mit Partnern aus der Industrie gemeinsam betrieben.

Fraunhofer TCR-Verfahren

Beim „thermo-katalytischen Reforming“ (TCR-Verfahren) wird Biomasse in einem mehrstufigen, thermischen Verfahren in hochwertige Energie- und Nährstoffträger umgewandelt. Das Verfahren kann vielfältige Biomassen und Reststoffe ab einem Trockengehalt ab 70 Prozent und darüber effizient verarbeiten – insbesondere Reststoffe wie:

- Gärreste aus Biogas- und Bioethanolverfahren
- Holzreste und Landschaftspflegematerial
- Industrielle Biomassereststoffe wie beim Biertreber oder Schlempen aus dem Papierrecycling
- Klärschlämme
- Stroh und andere landwirtschaftliche Reststoffe
- Tierexkremente

In einem Verfahren bei dem in einer ersten Stufe der Einsatzstoff bei mittleren Temperaturen (<500 °C) unter Sauerstoffabschluss schonend in feste und flüchtige Bestandteile aufgeteilt wird, werden schließlich drei qualitativ hochwertige Produkte erzeugt:

- Staubfreies Produktgas bestehend aus Wasserstoff (bis zu 50 Volumenprozent)
- TCR-Produktöl mit einem hohen Heizwert und sehr niedrigen Säurewerten
- Biokohle mit hohem Kohlenstoffanteil und hohem Potenzial für Düngersatzmittel

Mittels Hydrodeoxygenierung (HDO) in einem HDO-Reaktor ist eine Veredelung des TCR-Produktöls unter Zugabe von Wasserstoff in ein Hydrotreat TCR Bio-Öl möglich, das als Kraftstoff einsetzbar ist.

Anmerkung: Bis zu einer wirtschaftlichen „Serienreife“ hat es derzeit noch kein BtL-Verfahren geschafft, einzelne Ansätze sind indes erfolversprechend.

HVO (Hydrotreat Vegetable Oils)

Native Pflanzenöle – beispielsweise Raps-, Palm-, Sojaöle – sind aufgrund ungenügender Alterungsstabilität, hoher Viskosität und schlechter Brenneigenschaften als Kraftstoffe weniger geeignet. Eine aktuell praktizierte Veredelungsmöglichkeit ist die Umesterung in Fettsäuremethylester (FAME) mit Methanol. Dabei wird der dreiwertige Alkohol Glycerin gegen Methanol ausgetauscht. FAME ist im engeren Sinne kein synthetischer Kraftstoff und sollte nur im begrenzten Umfang dem Kraftstoff für aktuelle Fahrzeuge beigemischt werden, um typische Nachteile (etwa Degression der Motorenölqualität) zu vermeiden.

Eine fortgeschrittene Veredelung von Pflanzenölen ist die katalytische Reaktion mit Wasserstoff (Hydrierung) in Kohlenwasserstoffe. Die Hydrierung von Pflanzenölen kann neben der Verarbeitung in der Mineralö Raffinerie auch in speziell für Pflanzenöle konstruierten Anlagen erfolgen.

Eine weit fortgeschrittene Technologie ist das Verfahren zur Herstellung des auf beispielsweise Palmöl basierenden Kraftstoffs NExBTL des finnischen Unternehmens Neste Oil.

Neste bezeichnet sein eigenes Produkt als „Neste Renewable Diesel“. Der Begriff „Paraffinischer Dieselkraftstoff“ wird ebenfalls häufig verwendet, da dies aus chemischer Sicht die richtige Definition der Produktqualität ist. Allerdings bezieht sich diese Bezeichnung auch auf Kraftstoffe, die durch Biomasseverflüssigung mittels der Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt werden und sie definiert daher nicht den Rohstoff und Prozess für die Herstellung von HVO.

PtL (Power-to-Liquid)

Synthetischer Kraftstoff nur aus elektrischer oder direkter Sonnenenergie und Kohlendioxid ist keine Illusion. Mehrere Forschungsinstitute arbeiten an unterschiedlichen Lösungsansätzen. Bereits weit vorangeschritten sind etwa die Pilotanlagen von Ineratec und Sunfire:

Sunfire stellte zunächst in einer ersten Pilotanlage in Dresden seit 2014 synthetischen Dieselkraftstoff in einem dreistufigen Prozess her. Die Grundlage hierfür bildete eine Hochtemperatur-Elektrolyse „Sunfire-HyLink“. Mit dieser wurde Wasserstoff hergestellt, womit in einem zweiten Schritt per Reverser-Wassergas-Shift-Reaktor (RWGS) zusammen mit CO₂ ein Synthesegas (H₂+CO) erzeugt wurde. In einer Fischer-Tropsch-Synthese wurde aus dem Synthesegas ein Kohlenwasserstoffprodukt, aus dem Diesel, Naphtha und Wachs gewonnen werden konnte. Der Dampfbedarf der Elektrolyse wurde dabei aus der Abwärme der exothermen Fischer-Tropsch-Synthese gedeckt. Mit der weiterentwickelten CO-Elektrolyse „Sunfire-SynLink“ konnten die ersten beiden Prozessschritte verheiratet werden. Wasser und CO₂ werden direkt in der CO-Elektrolyse zu Synthesegas umgesetzt, ohne dass eine RWGS erforderlich ist. Im aktuellen BMBF-Projekt „Kopernikus“ wird dieses Verfahren in einer voll integrierten Anlage demonstriert getestet. Die CO-Elektrolyse ist hierbei direkt mit einer Fischer-Tropsch-Synthese und einer Direct-Air-Capture Anlage verbunden. Die „Direct-Air-Capture-Technologie“ der Firma Climeworks ermöglicht, CO₂ und Wasser direkt aus der Luft zu gewinnen. Der nächste Meilenstein soll mit einer deutlich größeren Produktionsstätte mit dem Unternehmen „Nordic Blue Crude“ im Industriepark Heroya (Finnland) in den nächsten Jahren erreicht werden.

Ineratec ist eine Ausgründung des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und hat gemeinsam mit den Partnern Audi AG und Energiedienst Holding AG in Laufenburg im Schweizer Kanton Aargau eine neue Pilotanlage zur Produktion von synthetischen Kohlenwasserstoffprodukten errichtet. Die dafür notwendige Energie aus erneuerbaren Quellen kommt dabei erstmals aus Wasserkraft. Die errichtete Anlage hat eine Kapazität von rund 400.000 Litern pro Jahr. Für die Entstehung der Kohlenwasserstoffprodukte transformiert die Power-to-Liquid-Anlage überschüssigen Strom aus Wasserkraft zu synthetischem Treibstoff. Der vor Ort im Wasserkraftwerk produzierte Ökostrom erzeugt aus Wasser mittels Elektrolyse Wasserstoff und Sauerstoff. Im nächsten Schritt reagiert der Wasserstoff mit CO₂, hier kommt eine neuartige und sehr kompakte Mikroverfahrenstechnik von Ineratec zum Einsatz. Das CO₂ kann aus der Luft oder

biogenen Abgasen nahe gelegener Anlagen gewonnen werden und ist die einzige Kohlenstoffquelle. Es entstehen langkettige Kohlenwasserstoffverbindungen. Diese werden im letzten Verfahrensschritt separiert, in das Endprodukt Dieselmotorkraftstoff sowie in Wachse, die in anderen Industriezweigen Verwendung finden.

StL (Sun-to-Liquid)

Der vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) im Projekt Sun-to-Liquid verfolgte Ansatz nutzt konzentrierte Solarenergie, um flüssige Treibstoffe primär für die Luftfahrt auf Basis von Kohlenwasserstoffen aus H₂O und CO₂ zu synthetisieren. Diese „umgekehrte Verbrennung“ wird durch einen thermochemischen Hochtemperatur-Kreisprozess erreicht, bei dem die Redoxreaktion eines Metalloxids genutzt wird, um H₂O und CO₂ in Synthesegas umzuwandeln. Produkt des Kreisprozesses ist ein Synthesegas, das mittels Fischer-Tropsch-Synthese zu einem flüssigen Treibstoff weiterverarbeitet wird. Die Hauptziele von Sun-to-Liquid sind die Hochskalierung und experimentelle Demonstration der gesamten Prozesskette zur solaren Erzeugung von flüssigen Treibstoffen in marktreifer Größenordnung. Dazu wurde zunächst ein 4 kW Reaktor an der ETH Zürich experimentell erprobt und ab 2016 eine größere 50 kW Anlage in Móstoles bei Madrid unter realistischen Bedingungen getestet.

PtG (Power-to-Gas)

Als Pionier für Power-to-Gas hat sich Audi betätigt und auch gleich seinem Produkt einen geschmeidigen Namen aufgeprägt: „Audi e-gas“. Die Anlage im norddeutschen Werlte, die der Anlagenbauer ETOGAS (vormals SolarFuel) im Auftrag der AUDI AG errichtet hat ist die weltweit erste Anlage im industriellen Maßstab, die aus CO₂ und elektrischer Energie einspeisefähiges, synthetisches Erdgas generiert. Zu ihrem Betrieb dient regenerativer Strom, zum Beispiel aus Wind, Sonnenenergie oder Biomasse. In der Anlage in Werlte wird der erneuerbare Strom in einem ersten Schritt mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt. Durch Kombination des Wasserstoffs mit CO₂ entsteht in der Methanisierungsanlage, die der Elektrolyse nachgeschaltet ist, synthetisches erneuerbares Erdgas – das Audi e-gas. Es lässt sich vor Ort in das Erdgasnetz einspeisen und dort speichern. Das CO₂ stammt aus einer Biogasanlage. Sie wird nicht aus Energiepflanzen, sondern aus organischen Abfällen gespeist. Das CO₂ ist ein Abfallprodukt, das ansonsten die Atmosphäre belasten würde. Die Audi e-gas-Anlage bindet das CO₂ in den Treibstoff ein. Somit ist das Audi e-gas ein klimaneutraler Treibstoff – bei der Verbrennung im Motor wird praktisch die Menge CO₂ frei, die vorher in der Anlage gebunden wurde.

Die Verwendung des Wasserstoffs ist freilich auch direkt in einem Brennstoffzellenfahrzeug möglich.

OME (Oxymethylenether)

Der Begriff Oxymethylenether (OME) steht für eine Gruppe von chemischen Molekülen aus Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff. Die Herstellung von OME ist auf Basis verschiedener Prozessabläufe möglich. Idealerweise wird die Synthese ausschließlich mit regenerativer Energie bzw. Strom sowie CO₂ und Wasser als Rohstoffe möglich. Wenn das benötigte CO₂ aus der Umgebungsluft abgeschieden wird, ergibt sich mit der Nutzung des Kraftstoffs im Verbrennungsmotor praktisch ein geschlossener CO₂-Kreislauf. Zudem bietet OME als Kraftstoff weitere Vorteile: Im Kraftstoffmolekül sind keine direkten Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen vorhanden. Zusätzlich dazu besitzt jedes Kraftstoffmolekül einen hohen Anteil an Sauerstoff. OME kann daher grundsätzlich rußfrei verbrennen. Da OME mit konventionellen Dieselmotorkraftstoffen mischbar ist, werden derartige Blends für den Einsatz in Fahrzeugen favorisiert, weil voraussichtlich nur mäßige Anpassungen am Kraftstoffsystem und der Motorabstimmung erwartet werden.

Die Technische Universität Darmstadt hat zum Wiener Motorensymposium 2017 ein OME-Versuchsfahrzeug – einem modifizierten Volvo XC 60 – vorgestellt. Auch aus der Industrie sind entsprechende Forschungsprojekte bekannt geworden.

DME (Dimethylether)

Auch Dimethylether kann mittels eines katalytischen Prozesses aus Wasserstoff-Kohlenoxidsynthesegas gewonnen werden. In der Fachliteratur sind Direktsyntheseverfahren oder über Methanol-Dehydratisierung beschrieben. DME ist in seinen physikalischen Eigenschaften den Gasen Propan oder Butan ähnlich, hat eine niedrige Selbstentzündungstemperatur und eine hohe Cetanzahl. Volvo hat DME als Ersatz für Dieselmotorkraftstoff intensiv untersucht und es zahlreiche weitere Studien, etwa auch als Blend-Komponente. DME kann zu OME synthetisiert werden.

H₂ (Wasserstoff)

Wasserstoff ist per Definition kein synthetischer Kraftstoff, dient aber bei vielen als notwendiges Syntheseelement. Zudem kann Wasserstoff als gasförmiger Kraftstoff in Kraftfahrzeugen direkt eingesetzt werden.

BMW hat in den 90er Jahren entsprechende Experimente mit modifizierten Ottomotoren durchgeführt. Inzwischen scheint die Umwandlung des Wasserstoffes in Methan (e-gas) der unproblematischere Weg zu sein. Energetisch vorteilhafter sind Fahrzeuge mit Brennstoffzelle: Hier wird Wasserstoff als Energieträger direkt in elektrischen Strom umgewandelt.

Einsatzmöglichkeiten der synthetischen Kraftstoffe

Flüssige synthetische Kraftstoffe haben einen vergleichbar hohen Energiegehalt wie klassische mineral-ölstämmige Kraftstoffe. Sie lassen sich kompakt, langfristig und ohne unüberwindbare Risiken lagern, transportieren und tanken. Aufgrund der chemischen Strukturen sind grundsätzlich niedrigere Schadstoff-Rohemissionen zu erwarten. Klassische Abgasnachbehandlungsverfahren (Katalysatoren, Partikelfilter usw.) werden aber auch mit synthetischen Kraftstoffen nicht entbehrlich, sondern müssen voraussichtlich den veränderten Rohemissionen angepasst werden. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften der flüssigen, synthetischen Kraftstoffe entsprechen grundsätzlich nicht den Anforderungen der althergebrachten Kraftstoffnormen DIN EN 590 für Diesel und DIN EN 228 für Ottokraftstoffe. Für paraffinische Dieselmotoren wurde deshalb die spezielle Norm DIN EN 15940 in den letzten Jahren entwickelt, da diese typisch über eine signifikant geringere Dichte verfügen.

Nicht unkritisch scheint die Einwirkung synthetischer Dieselmotoren auf Dichtungswerkstoffe des Kraftstoffsystems zu sein. Die Firma Deutz – ein renommierter Hersteller für Motoren – teilt in einem Technischen Rundschreiben 0199-99-01218/4 mit: *„Es ist bekannt, dass es bei Motoren, die längere Zeit mit handelsüblichen Dieselmotoren betrieben und dann auf paraffinische Kraftstoffe umgestellt wurden, gegebenenfalls zu Kraftstoffleckagen kommen kann. Der Grund für dieses Verhalten ist das geänderte Quellungsverhalten von NBR-Polymerdichtungen in paraffinischen Dieselmotoren gegenüber herkömmlichem Diesel aufgrund seiner Aromaten-Freiheit“*.

Bei einer Herstellerbefragung durch den ADAC hat kein Pkw-Hersteller eine allgemeine Freigabe für Kraftstoffe gemäß DIN EN 15940 erteilt. Einige Hersteller (BMW, Opel, Ford) prüfen angeblich noch (Stand Oktober 2019) die Tauglichkeit ihrer Modelle für diesen Kraftstoff. Etwaige Freigaben sind aber ungewiss. Möglicherweise werden künftige Pkw-Modelle für DIN EN 15940 Kraftstoffe ausgelegt und abgestimmt.

Die „Zehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen – 10. BImSchV)“ definiert die in Deutschland verkehrsfähigen Kraftstoffe. Für Straßenfahrzeuge sind derzeit grundsätzlich nur Dieselmotoren gemäß DIN EN 590 und Ottokraftstoffe gemäß DIN EN 228 erlaubt. Als Blendkomponente für Dieselmotoren sind synthetischen bzw. paraffinischen Kraftstoffe zulässig, solange das finale Produkt die DIN EN 590 erfüllt.

Derartige Mischkraftstoffe wurden bereits in den letzten Jahren vom Technologietransferzentrum Automotive der Hochschule Coburg in Zusammenarbeit mit Firmen der Fahrzeugindustrie in umfangreichen Versuchsserien erprobt. Aus dem Abschlussbericht zum Projektvorhaben: *Die Wahl fiel auf einen Kraftstoff, der zu sieben Prozent aus Altspeiseölmethylester, zu 26 % aus HVO sowie aus einem qualitativ hochwertig additivierten Dieselmotoren besteht und im Dichtebereich für Dieselmotoren liegt. Diese neue Kraftstoffformulierung erhielt den Namen Diesel R33 und erfüllt die DIN EN 590 und die 10. BImSchV. Der Begriff Diesel R33 drückt den Regenerativitätsgrad von 33 Prozent aus. Maßgebende Entwicklungsziele waren die Normkonformität und die Ermöglichung nachhaltiger Mobilität bei uneingeschränkter technischer Kompatibilität. Mit Blick auf die Nachhaltigkeit wurde Biodiesel in Form von Altspeiseölmethylester verwendet. Dieser wurde überwiegend aus gebrauchtem Speiseöl hergestellt, das in der Region Coburg eingesammelt wurde. Das HVO wurde aus Rapsöl und nachhaltigem Palmöl produziert.*

Das technische Ziel bestand in der Eignungsprüfung von Diesel R33. Dafür wurde der neue Kraftstoff in Coburg in einem Flottenversuch getestet. Die Flotte bestand aus rund 280 Fahrzeugen (Lkw, Pkw, Busse und mobile Arbeitsmaschinen) der Abgasklassen Euro 0 bis Euro 6. Neben der Eignungsprüfung für den gesamten deutschen Fahrzeugbestand war auch die Abgasanalyse ein Projektziel. Im Flottentest wurden fünf Fahrzeuge auf ihre Emissionen geprüft. An je einem Euro 3-, Euro 5- und Euro 6-Pkw wurden zusätzlich die nicht limitierten Emissionen und die Mutagenität des Abgases untersucht. Bei allen Tests wurde Diesel R33 mit fossilem Dieselmotoren verglichen. Diese Vergleichsmessungen erfolgten jeweils zu Projektbeginn und wurden alle zum Projektende erneut durchgeführt, um zu überprüfen, ob Diesel R33 überproportional zur Alterung der Fahrzeuge beiträgt.

Diesel R33 wurde in allen Fahrzeugen störungsfrei eingesetzt. Der hohe Biogenitätsgehalt stellt kein Problem dar. Ein durch Diesel R33 hervorgerufener Alterungseffekt war nicht zu beobachten.

Diesel R33 führt zu:

- einer Treibhausgasmindering von ca. 17 %,
- einer Reduzierung der limitierten gasförmigen Abgaskomponenten,
- aber einem leichten Anstieg der Stickoxidemissionen – allerdings ohne Grenzwertüberschreitung,
- einer deutlichen Aldehydminderung von bis zu 60 %,
- einer Minderung der PAK-Emissionen und
- deutlicher Reduzierung der Mutagenität bei älteren Fahrzeugkonzepten (Euro 3).

Die Interpretation weiterer Studien erlaubt die Vermutung, dass auch mit synthetischen Dieselmotoren anderer Provenienz als Blend-Komponente – etwa GtL, PtL usw. – anstelle von HVO ähnliche Ergebnisse zu erwarten sind.

Ökologische und ökonomische Aspekte synthetischer Kraftstoffe

Zu den Produktionskosten gibt es aus vielfältigen Gründen nur vage Informationen. Relativ günstig und fast auf dem Niveau des Mineralöls dürfte Herstellung von GtL sein, da die gespeicherte Energie des Erdgases per Synthese umgewandelt wird. Allerdings ist GtL kein Beitrag zur Dekarbonisierung, also zur Vermeidung von klimaschädlichem Kohlendioxid.

Bei regenerativ hergestellten synthetischen Kraftstoffen – etwa aus regenerativer gewonnener Elektrizität – ist ein bedeutsamer Nutzen zum Klimaschutz gegeben. Allerdings sind die Wirkungsgradketten wenig günstig: Die dafür notwendige Produktion von Wasserstoff per Elektrolyse hat einen Wirkungsgrad von bestenfalls 70 Prozent. Auch die Fischer-Tropsch-Synthese inklusive des Synthesegas-Reformers liegt auf diesem Niveau. Zusammengerechnet mit dem Wirkungsgrad eines guten Dieselmotors bleiben schlussendlich rund 15 Prozent der ursprünglich eingesetzten elektrischen Energie als Antriebsenergie übrig.

Eine bessere Effizienz kann bei der Produktion von BtL vorliegen, ist aber mangels Datenmaterials nicht quantifizierbar. Hinsichtlich des Herstellungspreises kann HVO schon in die Nähe von Mineralölprodukten kommen.

Auch für jegliche Kraftstoffe aus biologischen Quellen gilt ein wichtiger Grundsatz des ADAC: „Alle Energieträger im Straßenverkehr müssen hinsichtlich der Nachhaltigkeit strenge Anforderung erfüllen, so dürfen etwa sensible Ökosysteme nicht beeinträchtigt werden, Anbauflächen dürfen nicht auf Kosten der Lebensmittelproduktion ausgeweitet werden und bei der Herstellung müssen angemessene soziale Standards erfüllt sein.“

ADAC Empfehlungen

- Fahrzeughersteller sollten neue Fahrzeugmodelle für die Verwendung von neuartigen Kraftstoffen auslegen oder zumindest vorbereiten.
- Fahrzeughersteller sollten aktuelle und ältere Fahrzeugmodelle hinsichtlich neuartiger Kraftstoffe prüfen und ggf. die Betriebsstoffempfehlungen belastbar ergänzen. Dies gilt insbesondere für paraffinische Dieselmotoren gemäß DIN EN 15940.
- Mineralölgesellschaften sollten bei synthetischen Kraftstoffanteilen diese hinsichtlich Herkunft, Mengenanteilen und Nachhaltigkeitskriterien transparent deklarieren.

Tipps für Verbraucher

- Beim Autokauf sollte zukünftig auf die Verwendbarkeit neuartiger bzw. alternativer Kraftstoffe Wert gelegt werden.
- Autofahrer sollten keine eigenen „Experimente“ riskieren, sondern nur konkret vom Fahrzeughersteller freigegebene Kraftstoffe tanken.
- Bei angeblich sauberen Premiumkraftstoffen sollten sie auf klare Angaben zur Menge, zum Ursprung und der Nachhaltigkeit etwaiger synthetischer Anteile (etwa GtL, HVO, BtL) bestehen.

Herausgeber/Impressum

ADAC e.V.
Test und Technik
81360 München
E-Mail tet@adac.de