



# 1 Einleitung

---

Die motorische Verbrennung von Chemikalien ist weit mehr als die Wandlung von chemischer Energie in Bewegungsenergie. Kraftstoff, Motor und Abgasnachbehandlung bilden eine Einheit mit wechselseitigen Abhängigkeiten und Optimierungspotenzialen.

Während schon Rudolph Diesel Biokraftstoffe und Pflanzenöle in seinen Motoren einsetzte, gelang der Durchbruch der Biokraftstoffe in Deutschland und in der Europäischen Union erst zur letzten Jahrhundertwende.

Hochtechnisierte Aggregate der motorischen Neuzeit erfordern heute maßgeschneiderte Kraftstoffe, die auch mit der Abgasnachbehandlung harmonisieren und zudem Nachhaltigkeitskriterien erfüllen müssen.

In Deutschland begann die Geschichte der alternativen Kraftstoffe mit dem Durchbruch des Biodiesels gegen Mitte der 1990er Jahre, der seit seinen Anfängen von der Union für Oel- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP) begleitet wird. Die UFOP bezieht seit 2005 einen Teil ihrer Expertise aus ihrer Fachkommission „Biokraftstoffe und Nachwachsende Rohstoffe“, in der 22 Vertreter aus der Motoren-, Mineralöl-, Biokraftstoff-, Additiv- und Automotivindustrie gemeinsam mit Wissenschaftlern aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen sowie Verbandsvertretern die Potenziale und Anforderungen an Biokraftstoffe der Zukunft erörtern, Strategien beraten und Projektvorhaben initiieren. Wenn möglich, werden gezielt Nachwuchswissenschaftler gefördert.

In den Jahren 2016 bis 2018 wurden intensiv die zukünftigen Herausforderungen an Biokraftstoffe als Reinkraftstoff und Blendkomponente aus Sicht von Wirtschaft und Wissenschaft diskutiert. Im Ergebnis ist das vorliegende Papier entstanden, das aus Sicht der UFOP-Fachkommission, den Forschungs- und Handlungsbedarf zur Sicherstellung der Forschungsförderung, einschließlich der Gewinnung des wissenschaftlichen Nachwuchses, für diesen bedeutenden Wirtschaftssektor der nächsten Jahre zusammenfasst.<sup>i</sup>

---

<sup>i</sup> Die Ergebnisse der UFOP-Fachkommission sollen in reduzierter Form als internationaler Zeitschriftenbeitrag veröffentlicht werden.



## 2 Motivation und Hintergrund

---

Mit dem Klimaschutzabkommen von Paris stimmten die Unterzeichnerstaaten der völkerrechtlich verbindlichen Zielsetzung zu, den Anstieg der globalen Erderwärmung bis 2050 auf maximal zwei Grad Celsius zu begrenzen. Angestrebt werden soll möglichst die Begrenzung dieses Anstiegs auf maximal 1,5 Grad. Diese Zielsetzungen bedeuten zugleich, dass das globale „Gesambudget“ aller Klimagase noch etwa 750 Gigatonnen (für das 2-Grad-Ziel) beträgt, die global in dem verbleibenden Zeitraum noch in die Atmosphäre abgegeben werden dürfen. Global werden aktuell jährlich etwa 40 Gigatonnen Klimagase emittiert. Die Zeit wird also knapp. Grundsätzliches Ziel ist es, die schon sichtbaren Folgen des Klimawandels zu beschränken. Es ist daher die Hypothek und damit die besondere Verantwortung der Industrieländer, mit ambitionierten Maßnahmen und innovativen Technologien den Transformationsprozess beschleunigt zu begleiten. Eine zentrale Herausforderung ist bei einer im Jahr 2050 auf mehr als neun Milliarden Menschen gewachsenen Bevölkerung der steigende globale Verkehr, der insbesondere in den Schwellenländern zunimmt. Klimawissenschaftler schlagen Alarm und mahnen mit Nachdruck eine Verkehrswende an. Derzeit liegt der Anteil des Verkehrs an den globalen Klimagasemissionen bei mehr als 14 Prozent, hierzulande mit etwa 170,6 Mio. t bei ca. 19 Prozent. Je Einwohner liegt in den OECD-Staaten laut Internationalem Transport Forum (ITF) der mobilitätsbedingte CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei drei Tonnen je Einwohner. Vor diesem Hintergrund verpflichteten sich die Unterzeichnerstaaten des Klimaschutzabkommens spätestens im Jahr 2019/2020 verbindliche nationale Klimaschutzaktionspläne vorzulegen. Deutschland stellte den nationalen Klimaschutzplan 2050 zur Klimaschutzkonferenz in Marrakesch (COP22) im November 2016 vor. Die Bundesregierung kündigte in ihrem Koalitionsvertrag an, mit dem Klimaschutzgesetz die im Klimaschutzplan vorgegebenen sektoralen Treibhausgasziele verbindlich festzuzurren. Im Lichte dieser Herausforderungen stellt sich naturgemäß die Frage nach der Gestaltung des sogenannten Transformationsprozesses, also der Umstieg auf effiziente und bezahlbare treibhausgasneutrale alternative Kraftstoffe und Antriebe. Politik und die betroffene Wirtschaft stehen jeweils unter massivem Handlungs- bzw. Innovationsdruck.

Umstellungsprozesse, die zudem noch als Maßstab für den Erfolg das gewohnte Nachfrageverhalten der Verbraucher berühren, sind zeitraubend und müssen deshalb mit Blick auf die vielfältigen Herausforderungen der unterschiedlichen Handlungsfelder ideologiefrei und technologieoffen gestaltet sein. Der vorgegebene Zeithorizont bis 2050 macht deutlich, dass die Dekarbonisierung des globalen Verkehrs für die Zielerreichung die Weiterentwicklung vorhandener sowie die Prüfung und Nutzung innovativer Technologien erfordert. Global ist und bleibt in diesem Prozess der Verbrennungsmotor der wichtigste Antrieb. Mit Biokraftstoffen beginnt global der Prozess zur Defossilisierung der Kraftstoffe und damit des Verkehrs. Dieser Prozess wird regional durch das Potenzial der Ressourcenverfügbarkeit und durch die national gesetzlich vorgegebenen Beimischungsvorgaben getrieben. Hier muss der Grundsatz

Seite | 6

gelten, dass ausschließlich treibhausgasoptimierte und zertifizierte nachhaltige Biomasserohstoffe bzw. Biokraftstoffe eingesetzt werden. Diese Anforderungen sehen grundsätzlich die europäische Erneuerbare Energien-Richtlinie (2009/28/EG) und die verschärfte Nachfolgerichtlinie (RED II: 2018/2001/EG) als Voraussetzung für den Marktzugang in die EU vor. Diese gesetzlichen Anforderungen müssen daher im Falle von Drittlandsimporten (Biomasserohstoff bzw. Biokraftstoff) auch außerhalb der EU nicht nur umgesetzt, sondern ambitioniert im Gleichklang weiterentwickelt und überwacht werden.

Vor allem die Zusammensetzung der Dieselmotoren mit unterschiedlichen Biodieselanteilen, Biokomponenten (Hydrotreated Vegetable Oil, HVO) und Rohstoffprovenienzen entwickelt sich global gesehen zu den größten Herausforderungen für die Mineralöl- und Fahrzeugindustrie. Die Motorenentwicklung und die zunehmend komplexer werdenden Systeme für die Abgasnachbehandlung stehen hier angesichts stetig steigender und datiert vorgegebenen emissionsrechtlichen Anforderungen richtungsweisend im Mittelpunkt. Gleichzeitig wird nicht nur gesetzlich, sondern auch kundenseitig das Angebot verbrauchsreduzierter, klimafreundlicher Motoren eingefordert.

Deutschland hat mit dem nationalen Klimaschutzplan 2050 das Treibhausgas-minderungsziel für den Verkehrssektor für den Zeitraum bis 2030 konkret vorgegeben. Als Ergebnis der Koalitionsverhandlungen werden alle Sektorziele gesetzlich und verbindlich verankert. Mit den auf EU-Ebene ab 2021 vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Grenzwerten für Neufahrzeuge (Pkw: 95 g CO<sub>2</sub>/km und leichte Nfz: 147 g CO<sub>2</sub>/km) in Verbindung mit weiteren bereits datierten Absenkungen ist der Einstieg in die Elektrifizierung durch Hybridisierung und durch rein elektrischen Antrieb vorgegeben. Auf EU-Ebene wurde für schwere Nutzfahrzeuge eine Einigung zur CO<sub>2</sub> Reduktion von 15 % bis 2025 und 30 % bis 2030 beschlossen. Die prozentuale Reduktion bezieht sich auf den CO<sub>2</sub> Ausstoß von 2019. Die Nichterfüllung führt andernfalls zu Strafzahlungen in Milliarden Höhe, die an die EU-Kommission abzuführen sind und folglich auf nationaler Ebene für die erforderlichen Investitionen nicht mehr zur Verfügung stehen. Nicht zuletzt die Androhung einer Pönale treibt die Innovationsentwicklungen in dem für die deutsche Volkswirtschaft so bedeutenden Wirtschaftssektor an.

Eine verantwortliche und vorausschauende Umweltpolitik muss hier zwischen den technologischen Herausforderungen und dem im Zeitrahmen Machbaren unterscheiden können, um das maximal erreichbare CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenzial bis 2030 zu erschließen.

Der Dieselskandal hat zu Unrecht den Verbrennungsmotor als Technologieträger diskreditiert. Eine unsägliche Vermischung der öffentlich getriebenen Diskussion über manipulierte Abgasnachbehandlungssysteme, Schadstoffbelastungen in Innenstädten, Fahrverbote usw. führte zu der Grundsatzfrage nach der Perspektive des Verbrennungsmotors bis hin zu einer Verbotsdiskussion.



Es bleibt unbestritten, dass emissionsrechtliche Anforderungen erfüllt werden müssen. Deshalb muss die Zukunft des Verbrennungsmotors sich daran entscheiden, mit welchen Maßnahmenkonzepten die Motoren effizienter, noch schadstoffärmer und abhängig von der Entwicklung alternativer Kraftstoffe möglichst treibhausgasneutral betrieben werden können. Hier kommt dem Potenzial der wechselseitigen Optimierung von Motor, Kraftstoff und Abgasmachbehandlung eine bedeutende Rolle zu. Die Vielfalt der dazu benötigten Kompetenzen kann nur in einem großen interdisziplinären Ansatz erfolgreich sein.

Innerstädtische Emissionsbelastungen müssen vor dem Hintergrund der gesundheitlichen Wirkungen aber vor allem auch angesichts der in Europa unterschiedlichen Messszenarien bewertet werden. Ideologische oder technologiefeindliche Ansätze sind dabei abzulehnen. Gesundheits- und Klimaschutz müssen vor dem Hintergrund der Ressourceneffizienz, der Arbeitsplatzsicherheit und sozialer Aspekte bewertet werden. Dazu tragen verlässliche motorische Technologien und klimaefiziente Kraftstoffe in erheblichem Maße bei.

Vorschnelle Fahrverbote mögen politisch in einschlägigen Kreisen opportun sein. Für viele unmittelbar und mittelbar Betroffene (Pendler, Betriebe, Kunden) sind die Folgen nicht absehbar.

In jedem Fall führt eine unsachliche Kritik an der Zukunftsfähigkeit des Verbrennungsmotors dazu, dass junge Menschen in diesem umfassenden Fachgebiet nicht mehr studieren wollen. Damit fehlen der Wirtschaft mittelfristig Nachwuchsingenieurinnen und -ingenieure, die am Wirtschaftsstandort Deutschland dringend zur Zukunftssicherung benötigt werden.

Die Autoren dieses Aufsatzes motiviert die Frage nach der Zukunftsfähigkeit des Verbrennungsmotors unter Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe. Im Folgenden wird der Fokus auf Biokraftstoffe gelegt und dabei herausgearbeitet, welche zukünftigen Herausforderungen bestehen, damit diese einen Beitrag zur nachhaltigen Mobilität leisten können.

## 2.1 Verfügbarkeit fossiler Ressourcen

Zu den für Kraftstoffe wichtigen fossilen Energierohstoffen Erdöl und Erdgas formuliert die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe u. a. folgende Kernaussagen:<sup>[1]</sup>

- Erdöl bleibt auf absehbare Zeit weltweit mit ca. 31 % die wichtigste Energiequelle (Abbildung 1: Energieverbrauch, Produktion).
- Die Versorgung gilt auch bei moderat zunehmendem Bedarf als gesichert, Reserven und Ressourcen steigen aufgrund des nichtkonventionellen Erdöls (Schieferöl- und Schwerstölreserven).

- Die für die Mineralölversorgung wichtigen konventionellen Reserven bleiben nahezu konstant.
- Neufunde konventioneller Erdöllagerstätten gehen deutlich zurück (Abbildung 2).
- Für die Versorgungssicherheit ist ein funktionierender Erdölweltmarkt unerlässlich.
- Erdgas ist der drittwichtigste Energieträger.
- Erdgas ist für viele Jahrzehnte in ausreichender Menge vorhanden, auch bei steigendem Bedarf, der mittelfristig zu erwarten ist.
- Sowohl bei Erdöl als auch bei Erdgas gehört Europa zu den größten Importeuren.

Eine mangelnde Verfügbarkeit konventioneller, fossiler Energien für Kraftstoffe ist aus geologischer Sicht nicht abzusehen und damit kein entscheidender Grund, alternative Kraftstoffe zu entwickeln. Entscheidend sind hierfür die länderspezifischen, europäischen und weltweiten CO<sub>2</sub>-Ziele, die geforderte Schadstoffreduktion und eine geringere Importabhängigkeit.

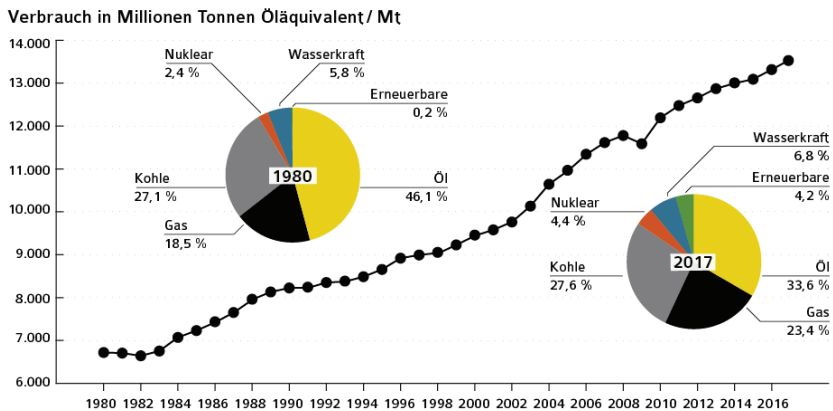


Abbildung 1: Weltweiter Primärenergieverbrauch von 1980 bis 2017 und Anteile aller Energie und Energieträger am Verbrauch der Jahre 1980 und 2017.<sup>[2][3]</sup>

Die erneuerbaren Energien erreichen beim Verbrauch einen Anteil von fast 18 %, dabei sind die klassischen erneuerbaren Energien, wie biogenen Energieträger und Wasserkraft mit über 90 % dominierend. Mit knapp 10 % tragen Wind- und Sonnenenergie zur Bedarfsdeckung bei. Biokraftstoffe für den Verkehrssektor tragen zum globalen Energieverbrauch mit 0,8 % nur sehr geringfügig bei. Die Produktion hat

sich allerdings seit 2004 von 30 Mrd. Liter auf 135 Mrd. Liter vervierfacht und steigt weiter an. <sup>[1]</sup>

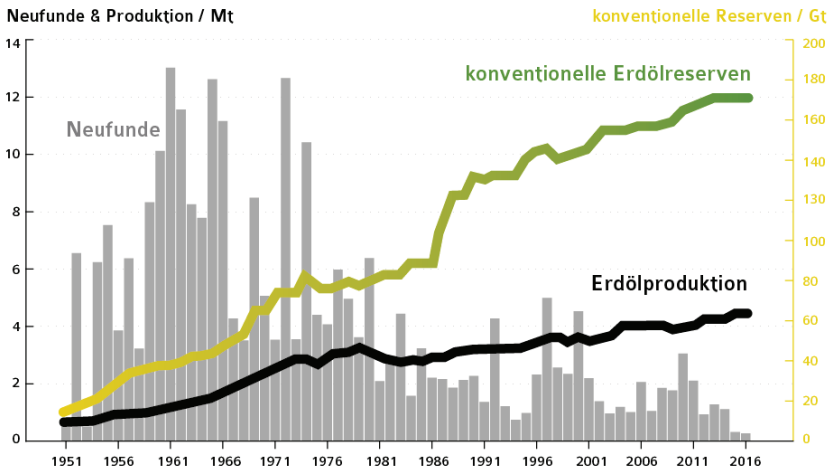


Abbildung 2: Neufunde, Erdölförderung und -reserven. <sup>[1]</sup>

## 2.2 Erwartete Entwicklung der Mobilität

Die Anzahl der Fahrzeuge (Pkw und leichten Nutzfahrzeugen (< 6 t)) wird sich in den nächsten 20 bis 25 Jahren weltweit von etwa 1 Mrd. auf etwa 2 Mrd. verdoppeln. Bei der weltweiten Produktion wird 2030 der Anteil der rein oder überwiegend (48V Hybrid) verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge ca. 80% betragen, insgesamt wird er Verbrennungsmotor noch bei ca. 90% der Antriebe beteiligt sein, Abbildung 3. Das Wachstum findet überwiegend in den Entwicklungs- und Schwellenländern statt. Die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge, inklusive Hybride, werden 2040 weltweit einen Anteil von etwa 15 % am gesamten Fahrzeugbestand haben.

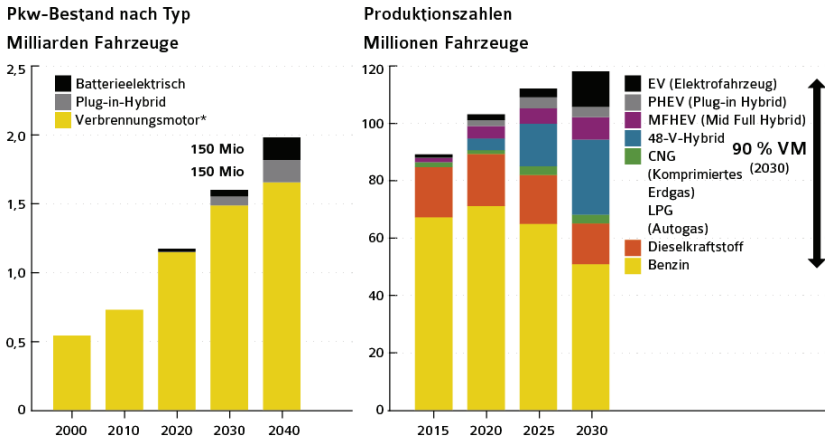


Abbildung 3: Fahrzeugbestand weltweit und Fahrzeugproduktion (Pkw und LCV).<sup>[4][5]</sup>

Die Gütertransportleistung nimmt weltweit stark zu, in Deutschland wird mit einer Zunahme von 30-35% im Zeitraum zwischen 2000 und 2040 gerechnet, die überwiegend auf der Straße stattfindet, Abbildung 4.

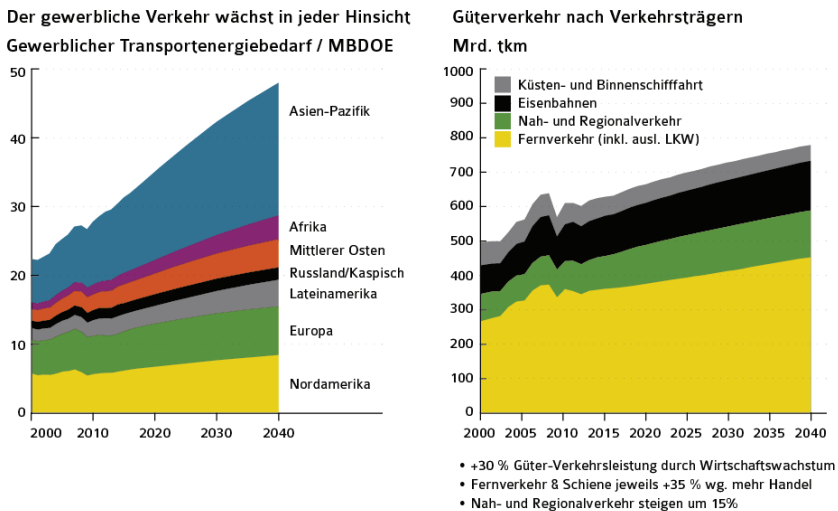


Abbildung 4: Entwicklung des Gütertransports weltweit und in Deutschland.<sup>[6][7]</sup>

Insgesamt steigt deshalb die für alle Transportleistungen erforderliche Energie: besonders stark für den kommerziellen Gütertransport auf der Straße aber ebenso in den Bereichen Schifffahrt, Bahn- und Flugverkehr.

Der dafür eingesetzte Kraftstoff ist dabei nach dieser Prognose immer noch zu etwa 85% erdölbasiert. Dies ist jedoch mit den gesetzten CO<sub>2</sub>-Zielen nicht vereinbar (Abbildung 5 rechts).

Aus diesen Daten leitet sich ab, dass mit der Elektromobilität, auch wenn die dafür erforderliche elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen gewonnen wird, eine CO<sub>2</sub>-neutrale Mobilität bis 2050 nicht erreichbar ist.

Grundsätzlich muss jedes Antriebskonzept von der Herstellung über die Betriebsphase bis zum Recycling im Zuge eines umfassenden Life-Cycle-Assessments auf seine Klimateffizienz bewertet werden. Die heutige ausschließliche CO<sub>2</sub>-Bewertung der Betriebsphase ist nicht ausreichend für einen Vergleich verschiedener Konzepte.

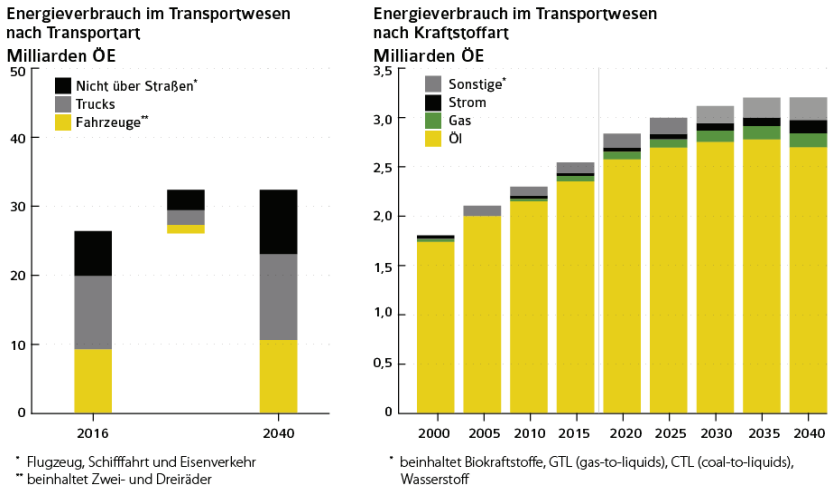


Abbildung 5: Energieverbrauch und Energiemix für den Personen- und Gütertransport.<sup>[4][6]</sup>

## 2.3 Antriebe und Kraftstoffe der Zukunft

Die Elektrifizierung des Antriebs ist – abhängig vom Mobilitätsbedarf und der lokalen Luftqualität – eine Notwendigkeit für eine belastungsfreie Umwelt. Aber auch der Verbrennungsmotor hat ebenso seine Berechtigung. Bei der Wahl des Antriebs gib es daher kein „entweder -oder“, sondern nur ein den Bedürfnissen und den regionalen Verhältnissen angepassten optimalen Antrieb.





Während in Großstädten und dichtbesiedelten Regionen wie z.B. Europa eine Infrastruktur für die Ladung von Batterien einigermaßen wirtschaftlich und logistisch vorstellbar ist, bleibt sie insbesondere in den Schwellen- und Entwicklungsländern noch auf lange Sicht nicht realisierbar. Hier muss auch langfristig ein verfügbarer, leicht handhabbarer sowie wirtschaftlicher und emissionsarmer Kraftstoff die Mobilität für Menschen und Güter sicherstellen. Zunächst werden das die erdölbasierten Kraftstoffe Benzin, Dieselmotorkraftstoff und Erdgas (CNG, LNG), aber auch biogene flüssige und gasförmige Kraftstoffe der sogenannten ersten und zweiten Generation sein. Mittelfristig kommen wahrscheinlich auch neue synthetische Kraftstoffe und sogenannte E-Fuels auf den Markt.

Schon aufgrund der langfristigen Verfügbarkeit der Vielzahl dieser Kraftstoffe, den Gegebenheiten der Infrastruktur und vor allem aus Wirtschaftlichkeitsaspekten wird der Verbrennungsmotor global noch Jahrzehnte die Mobilität sichern. Die Schadstoffemissionen, insbesondere die Stickoxide sind schon heute beim Otto- und Dieselmotor auf ein extrem niedriges Niveau reduzierbar. Das Problem Partikelemission ist seit der breiten Einführung des Partikelfilters etwa 2003/2004 beim Dieselantrieb und der kommenden Anwendung bei Benzinmotoren mit Direkteinspritzung gelöst.

Aufgrund des starken Wachstums der Mobilität werden in den nächsten fünf bis zehn Jahren weltweit mehr Verbrennungsmotoren pro Jahr produziert als jemals zuvor.

Geht man davon aus, dass die Elektrifizierung der Antriebe verstärkt über den Hybridantrieb erfolgt, dann wird zunächst besonders der Pkw mit Benzinmotor „elektrifiziert“. Dieselmotoren werden das Marktsegment des Güterverkehrs (Lkw, Schiff, Bahn), des Off-Road Bereiches (Land- und Baumaschinen sowie Industriemotoren) nach wie vor beherrschen und aus dem Sektor der kleinen und mittleren Pkw aus Kostengründen zurückgezogen. Grundsätzlich wird sich das Antriebskonzept jedoch, mehr als in der Vergangenheit, am Mobilitätsbedarf orientieren.

Überall dort wo schwere Güter weit zu transportieren sind und die Betriebskosten die Investitionskosten übertreffen, wird der Dieselmotor erste Wahl bleiben. Er ist der beste Kompromiss bezüglich Kosten, CO<sub>2</sub>, Robustheit, Flexibilität, Verfügbarkeit und Schadstoffen.

### 3 Biokraftstoffe

---

Regenerative Kraftstoffe werden im Sprachgebrauch sogenannten unterschiedlichen „Generationen“ (Kraftstoffe der ersten oder zweiten Generation) zugeordnet und bestimmte Kraftstoffe werden auch als „fortschrittlich resp. advanced“ eingestuft. Bei der Einordnung in Generationen wird häufig unterstellt, dass Folgegenerationen der vorausgehenden Generation überlegen und damit „fortschrittlicher“ sind. Da keine allgemeingültige Definition der Begrifflichkeiten existiert, werden häufig unterschiedliche Bewertungskriterien für die Zuordnung der Kraftstoffe herangezogen, die letztlich zum Teil zu unterschiedlichen Zuordnungsergebnissen führen.

Verwendete Bewertungskriterien sind beispielsweise:

- die Nachhaltigkeit und ethische Unbedenklichkeit des Rohstoffs, der bei der Kraftstoffherzeugung Verwendung findet (Nahrungsmittelkonkurrenz, Flächeneffizienz, Anbaubiomasse versus Reststoff oder Überschussstrom, direkte- und indirekte Landnutzungsänderung, Treibhausgasemission, etc.)
- spezifische Kraftstoffeigenschaften (z. B. maßgeschneiderte Synthesekraftstoffe für neuartige Brennverfahren)

Unter dem Dach der konventionellen Biokraftstoffe, sprich Biokraftstoffe der ersten Generation, werden die anbaubiomassebasierten Kraftstoffe wie Pflanzenöle, Biodiesel aus Pflanzenölen, hydrierte Pflanzenöle und Bioethanol zusammengefasst, die in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen. Biodiesel oder Fettsäuremethylester (fatty acid methyl ester – FAME) wird aus den entsprechenden Pflanzenölen über eine Umesterung mit Methanol hergestellt. Dadurch entstehen bspw. Rapsölmethylester (RME), Sojaölmethylester (SME) und Palmölmethylester (PME). Glycerin fällt bei dem Prozess als Kuppelprodukt an. Hydrierte Pflanzenöle (HVO) werden durch Hydrierung von Pflanzenölen mit Wasserstoff hergestellt, wobei auch Propan (Bio-LPG) entsteht. Bioethanol wird aus Stärke oder Zucker haltigen Rohstoffen, wie Weizen, Mais, Zuckerrübe oder Zuckerrohr über einen Vergärungsprozess gewonnen.

Die fortschrittlichen Biokraftstoffe spalten sich wiederum in drei Untergruppen auf. Biokraftstoffe aus Alt- und Reststoffen, wie Biodiesel aus Altspesiefetten (UCOME) oder Tierfetten (TME), werden bereits in großem Umfang in Deutschland und Europa eingesetzt.<sup>[8]</sup>

Ebenso fallen Bioethanol aus Lignocellulose sowie hydrierte Altspesiefette und hydrierte freie Fettsäuren (HFFA) darunter. Auch das aus der anaeroben Zersetzung von Gülle, Stroh und Reststoffen erzeugte Biomethan fällt in diese Kategorie.

Die zweite Gruppe der fortschrittlichen Biokraftstoffe umfasst alle synthetisch produzierten Kraftstoffe. Darunter fallen überwiegend Kraftstoffe, die mittels Fischer-