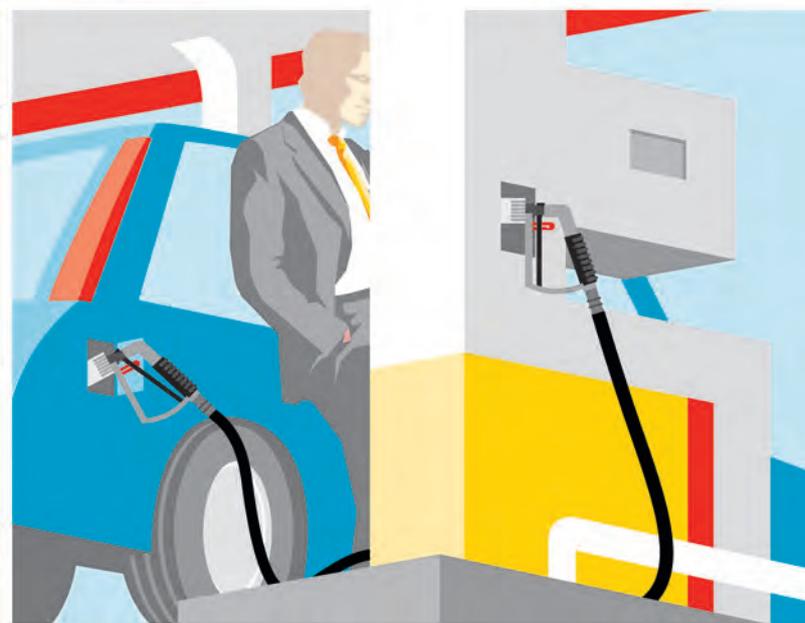


SHELL FLÜSSIGGAS-STUDIE



LPG als Energieträger und Kraftstoff
Fakten, Trends und Perspektiven



SHELL FLÜSSIGGAS-STUDIE

LPG als Energieträger und Kraftstoff. Fakten, Trends und Perspektiven



Shell Deutschland

Dr. Jörg Adolf (Projektleitung)
Dr. Christoph Balzer, Dipl.-Ing. Arndt Joedicke,
Dipl.-Ing. Uwe Schabla
www.shell.de



Prognos AG

Dipl.-Physiker Samuel Straßburg
www.prognos.com



OWI

Dip.-Soz. Michael Ehring, Winfried Koch, M.Sc.,
Dr. Klaus Lucka
www.owi-aachen.de



fka mbH

Dr. Bruno Gnörich
Dipl.-Ing. Markus Thoennes
www.fka.de

KURZFASSUNG

Ein bislang eher wenig beachteter Energieträger ist Flüssiggas. Tatsächlich wird Flüssiggas jedoch in allen Verbrauchssektoren für unterschiedlichste Anwendungen – als Energieträger, aber auch als Ausgangsstoff für weitere Produkte – verwendet. Dabei nehmen sowohl die Verfügbarkeit als auch der Einsatz von Flüssiggas – weltweit und in Deutschland – zu. In einer Energieträger-Studie befasst sich Shell mit dem aktuellen Stand und den mittelfristigen Perspektiven der Flüssiggasnutzung, insbesondere für Energiezwecke.

Die Shell Flüssiggas-Studie behandelt zunächst die Zusammensetzung und die charakteristischen Eigenschaften der beiden Flüssiggase Propan und Butan. Anschließend werden die Vorkommen bzw. Herkunft und die jüngere Marktentwicklung von Flüssiggasen global sowie speziell für Deutschland betrachtet. Weiterhin werden Standards für Flüssiggas und Flüssiggasanwendungen sowie die wichtigsten Anwendungen in Industrie, Haushalten und Verkehr untersucht.

Schwerpunkt der Studie sind automobiler Anwendungen von Flüssiggas, insbesondere im Pkw-Bereich (Autogas). Dazu werden der Stand der Autogas-Fahrzeugtechnik sowie Energie-, Klima- und Umweltwirkungen von Autogasfahrzeugen und Autogaskraftstoffen diskutiert. Mit Hilfe eines vereinfachten Autokosten-Vergleichs wird die Wirtschaftlichkeit von Autogas-Pkw analysiert. Abschließend werden Autogas-Szenarien für den Pkw-Bestand in Deutschland entwickelt und mögliche Auswirkungen von Autogas-Pkw auf Kraftstoffverbrauch und Treibhausgasemissionen bis 2030 geprüft.

ABSTRACT

Liquefied petroleum gas (LPG) is a source of energy that until recently received little notice. However, LPG is used for all kinds of applications in almost all consumption sectors – as a source of energy, but also as a base material for other products. Furthermore, the availability and the use of LPG are growing – both worldwide and in Germany. In a study of energy sources, Shell looks at the current status and the medium-term prospects for the use of LPG, especially for energy purposes.

The Shell LPG study first deals with the composition and key characteristics of the two liquefied petroleum gases propane and butane. It then looks at the resources and origin of LPG and the latest market trends, both globally and specifically for Germany. In addition, the standards for LPG as such and LPG applications in industry, households and transport are studied.

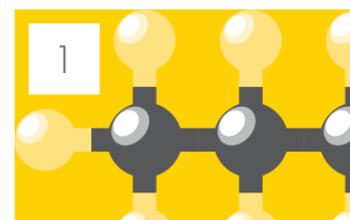
The focal point of the study is automotive applications for LPG, especially in passenger cars. The status of LPG vehicle technology and the energy, climate and environmental implications of LPG vehicles and LPG fuels are discussed. The economic viability of LPG cars is analysed through a simplified cost of ownership comparison. Lastly, LPG scenarios for the passenger car fleet in Germany are developed and possible implications of LPG for fuel consumption and greenhouse gas emissions until 2030 are examined.

HERAUSGEBER

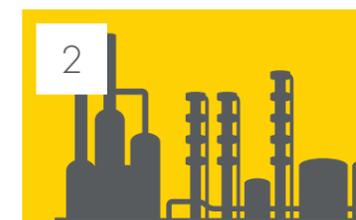
Shell Deutschland Oil GmbH
22284 Hamburg

INHALT

EINLEITUNG 4



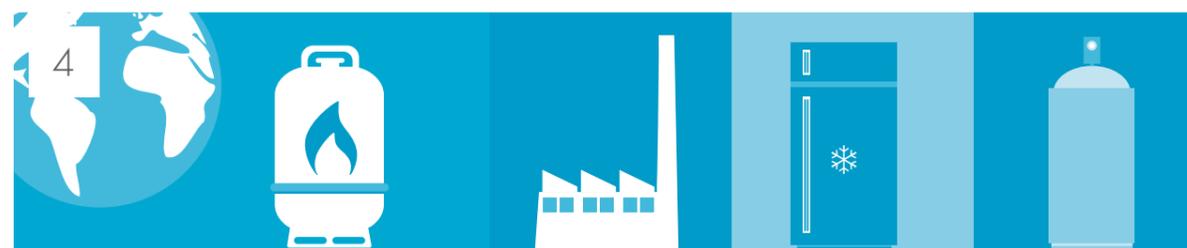
1 WAS IST FLÜSSIGGAS? 6



2 HERKUNFT & MÄRKTE 12



3 FLÜSSIGGAS-STANDARDS 16



4 NICHT-AUTOMOBILE ANWENDUNGEN 20



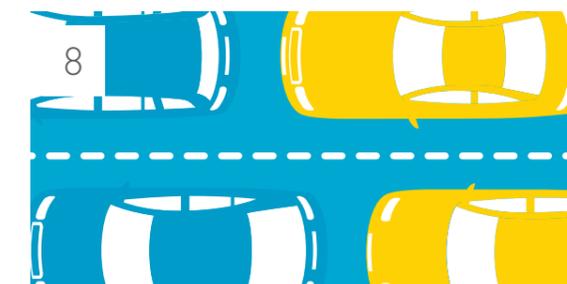
5 FLÜSSIGGAS IM VERKEHRSEKTOR 23



6 AUTOGAS UND UMWELT 31



7 AUTOKOSTEN-VERGLEICH 36



8 AUTOGAS-SZENARIEN 41

ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN 44

LITERATUR 48

EINLEITUNG

In den vergangenen Jahren hat Shell zum einen Szenario-Studien für die Energieverbrauchssektoren Pkw- und Lkw-Verkehr sowie die Hauswärmeversorgung privater Haushalte, zum anderen Studien über Stand und Perspektiven bestimmter Energieträger bzw. Kraftstoffe, insbesondere Biokraftstoffe und Erdgas, erstellt.

Ein bislang wenig beachteter Energieträger ist Flüssiggas. Flüssiggas wird in allen Verbrauchssektoren für unterschiedlichste Anwendungen – energetische wie stoffliche – eingesetzt. Dabei hat die Verwendung von Flüssiggas in der jüngeren Vergangenheit weltweit und in Deutschland stetig zugenommen. Gleichzeitig

verbessert sich die globale Versorgung mit Flüssiggas und damit seine Verfügbarkeit.

In einer weiteren Energieträger-Studie, der Shell Flüssiggas-Studie, befasst sich Shell daher mit dem aktuellen Stand der Flüssiggasnutzung und von Anwendungstechnologien sowie mit der Frage, welche Potenziale und Perspektiven Flüssiggas vor allem als Energieträger besitzt. Neben nicht-automobilen Anwendungen steht der Einsatz von Flüssiggas im Straßenverkehr, und hier speziell in Pkw, im Fokus.

FLÜSSIGGAS – VIELSEITIG, ABER OFT UNTERSCHÄTZT

Flüssiggas ist ein sehr nützlicher und ebenso viel genutzter „Stoff“. Millionen von Verbrauchern in Haushalten, Industrie, Gewerbe und Verkehr nutzen Flüssiggas.

So wird Flüssiggas als Kühlmittel für Kühlschränke eingesetzt. Es dient als Treibmittel in Spraydosen für Kosmetika, Farben und anderem. Der Flüssiggaskocher ist für Camping ebenso unabdingbar wie Flüssiggas für Kleinfahrzeuge. In Handwerk und Bauwirtschaft sind Flüssiggasflaschen als mobile Energiespender kaum zu ersetzen. Eine beträchtliche Zahl von Haushalten, die Landwirtschaft, aber auch Unternehmen nutzen Flüssiggas als Brennstoff zum Heizen, zur Warmwassererzeugung oder für Prozesswärme. Die Fertigung vieler Kunststoffe und anderer chemischer Produkte basiert auf dem Ausgangsstoff Flüssiggas; dabei wächst die Bedeutung des Feedstocks Flüssiggas für die Petrochemie.

Zudem haben im vergangenen Jahrzehnt bei steigenden Rohöl- und Kraftstoffpreisen viele Autofahrer auf alternative Antriebe gesetzt. Erste Wahl war oftmals der Autogas-Pkw. Rund eine halbe Million Autofahrer fährt

allein in Deutschland inzwischen mit Autogas. Damit ist Autogas nach Biokraftstoffen der wichtigste alternative Kraftstoff. Und Autogaszfahrzeuge sind hinter Benzin- und Dieselfahrzeugen die wichtigsten Antriebsalternativen im deutschen Pkw-Bestand – noch vor Elektromobilität.

Flüssiggas wird oft unterschätzt und nur als Nischenprodukt wahrgenommen. Ein Grund für die Unterschätzung von Flüssiggas mag sein, dass es kein Hauptprodukt, sondern in der Regel nur Nebenprodukt ist. Dennoch ist Flüssiggas in praktisch allen Lebens- und Wirtschaftsbereichen vorzufinden; schließlich besitzt Flüssiggas eine Reihe von Vorteilen:

Flüssiggas ist verfügbar und es ist bezahlbar; die globale Versorgung mit Flüssiggas hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. Flüssiggas hat besondere chemisch-physikalische Eigenschaften – darunter die vergleichsweise leichte Verflüssigung, Speicherbarkeit und Energiedichte. Flüssiggas ist leitungsungebunden und als mobiler bzw. gut transportabler Energieträger in Flaschen oder Tanks einsetzbar. Und Flüssiggas gilt vielfach als nachhaltigere Alternative – zum Beispiel als ozonschonendes Treibgas und Kühlmittel, als sauberer hauslicher Brennstoff,

insbesondere im Vergleich zu traditioneller Biomasse, als kostengünstiger Ausgangsstoff für die Petrochemie oder als billiger und zugleich emissionsarmer Kraftstoff für den Straßenverkehr. Eine Vielzahl von Argumenten also, um sich näher mit dem „Stoff“ bzw. Energieträger Flüssiggas zu befassen.

FORSCHUNGSZIELE UND LEITFRAGEN

Die Shell Flüssiggas-Studie 2015 trägt den Untertitel „Fakten, Trends und Perspektiven“. Wie schon in den vorangegangenen Shell Studien zu den Themen Pkw, Lkw, Hauswärme und den Energieträgern Erdgas und Biokraftstoffe steht zunächst die fachliche Analyse und Aufbereitung des Themas Flüssiggas im Vordergrund.

So wird Flüssiggas zwar viel genutzt und ist gewissermaßen ein alltäglich erfahrenes Produkt. Nicht selten wird Flüssiggas – auch Liquefied Petroleum Gas (LPG) genannt – mit den Erdgasderivaten verflüssigtes Erdgas (LNG) oder komprimiertes Erdgas (CNG) verwechselt. Ein erstes Ziel ist daher eine Aufarbeitung der Definition und der Eigenschaften und Vorteile von Flüssiggas. Da Flüssiggas anders als die Energieträger Kohle, Öl



Exemplare der Shell Lkw-Studie, der Shell/Biokraftstoff-Studie, der Shell/Biokraftstoff-Studie und der Shell Pkw-Szenarien bis 2040 können per E-Mail bestellt werden. Schreiben Sie an: shellpresse@shell.com

und Gas oder auch erneuerbare Energien kein Hauptprodukt ist, stellt sich die Frage, woher das Flüssiggas letztendlich kommt. Was sind eigentlich flüssiggasrelevante Ressourcen? Wie groß sind sie bzw. können sie eine steigende Nachfrage nach Flüssiggas abdecken?

Weiterhin setzt die Shell Flüssiggas-Studie ihren Untersuchungsschwerpunkt auf **LPG als Energieträger und Kraftstoff**.

Flüssiggas wird sowohl für energetische als auch für nicht-energetische Zwecke verwendet. Die nicht-energetische bzw. stoffliche Verwendung von Flüssiggas in der Petrochemie ist zwar global ihr zweitgrößter Anwendungsbereich. In Summe dominieren jedoch die Energieanwendungen von Flüssiggas in Haushalten, Industrie und Verkehr. In der Shell Flüssiggas-Studie werden alle wichtigen Anwendungen von Flüssiggas und deren Perspektiven und Potenziale diskutiert; im Vordergrund des Interesses stehen jedoch Anwendungen von Flüssiggas als Energieträger.

Sehr dynamisch hat sich der Einsatz von Flüssiggas im Straßenverkehr, insbesondere bei Pkw, in den vergangenen Jahren entwickelt. Ein besonderer Schwerpunkt der Shell Flüssiggas-Studie ist daher das Thema Flüssiggas im Straßenverkehr, dort auch als Autogas bezeichnet. Hier wird der Stand der Autogas-Kfz-Technik und von Autogas als Kraftstoff aufbereitet sowie eine Abschätzung der technischen Einsatzpotenziale von Autogas in modernen Pkw vorgenommen.

Für die automobilen Zukunft stellt sich die Frage, wie nachhaltig der Aufschwung von Autogas im Pkw-Verkehr ist. Die Dauerhaftigkeit von

Autogas im Straßenverkehr ist eng mit seinen ökologischen und ökonomischen Vorteilen verknüpft. Daher werden die Umweltwirkungen von Autogas-Pkw und Autogas als Kraftstoff – auf Basis wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse, Untersuchungen und Veröffentlichungen – diskutiert und bewertet.

Dazu werden im Besonderen die technischen und energieträgerspezifischen Vorteile von Autogas im Hinblick auf Energieverbrauch, Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen herausgearbeitet. Da für den Nutzer von Autogaszfahrzeugen ökonomische Kriterien eine wichtige Rolle bei der Antriebswahl spielen, werden die Autokosten von Autogas-Pkw

in einer vereinfachten Autokosten-Rechnung – sowohl für die Umrüstung als auch für die Neuwagenanschaffung – mit konkurrierenden Alternativen verglichen.

Neben der technischen Abschätzung kommt der Szenariotechnik eine wichtige Rolle für die Erforschung künftiger Entwicklungspfade von Anwendungstechnologien wie auch von Energieträgern zu. Auf Basis des Trendszenarios der Shell Pkw-Szenarien (Shell 2014) werden zwei mögliche Zukunftspfade (Szenarien) für Autogas-Automobilität in Deutschland bis 2030 entwickelt sowie ihre potenziellen Auswirkungen auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen ermittelt.

AUTOREN-TEAM UND DATENQUELLEN

Bei der Erstellung der Shell Flüssiggas-Studie, insbesondere bei der Abschätzung von LPG-Anwendungstechnologien und der Szenarien-Erstellung, wurde Shell von einer Reihe externer wissenschaftlicher Experten unterstützt: So wurden die Abschnitte zu Flüssiggas-Chemie (Kapitel 1), Flüssiggas-Standards (Kapitel 3) und nicht-automobilen Anwendungen (Kapitel 4) von Michael Ehring, Winfried Koch und Dr. Klaus Lucka vom OWI Oel-Waerme-Institut GmbH, Aachen, bearbeitet und verfasst. An der Erstellung der Kapitel 5 zu Flüssiggas im Verkehrssektor und Kapitel 6 zu Autogas und Umwelt haben Dr. Bruno Gnörich und Markus Thoennes, beide fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH, Aachen, maßgeblich mitgewirkt. Die Erstellung quantitativer Szenarioprognosen für Autogas-Pkw und deren Beschreibung (Kapitel 8) erfolgte durch Samuel Straßburg, Prognos AG, Basel. Die Autogas-Szenarien stützten sich zudem statistisch auf eine Individualauswertung des Pkw-Bestands zu Autogaszfahrzeugen durch das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA 2015b).

Die Projektleitung und Koordination der Shell Flüssiggas-Studie lag bei Dr. Jörg Adolf, Shell Deutschland. Darüber hinaus trugen folgende Autoren der Shell zur wissenschaftlichen Bearbeitung der Studie bei: Dr. Christoph Balzer, Arndt Joedicke und Uwe Schabla, alle Shell Deutschland, Hamburg.

Ferner wurde eine Vielzahl von weiteren Experten, Entscheidungsträgern und Stakeholdern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik befragt. Shell dankt allen Befragten für Information und Zusammenarbeit. Eine Auswahl relevanter Quellen befindet sich am Ende der Shell Flüssiggas-Studie.

KAP 1

WAS IST FLÜSSIGGAS?

Unter dem Begriff Flüssiggas werden unterschiedliche flüssige bzw. verflüssigte Kohlenwasserstoffgemische subsumiert. Im engeren Sinne versteht man unter Flüssiggas aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften die beiden Gase Propan (C_3H_8) und Butan (C_4H_{10}) sowie deren Gemische. Beide Gase liegen schon bei geringem Druck von weniger als 9 bar bei Raumtemperatur flüssig vor.

Flüssiggas ist nicht gleichzusetzen mit verflüssigtem Erdgas (LNG, Liquefied Natural Gas) oder komprimiertem Erdgas (CNG, Compressed Natural Gas). Erdgas besteht hauptsächlich aus dem Gas Methan (CH_4). Methan hat eine geringe Energiedichte, ist sogar leichter als Luft. Erdgas wird daher für Transport und Lagerung entweder verflüssigt oder komprimiert. Aufgrund des sehr niedrigen Siedepunktes von Methan von $-161,5\text{ °C}$ kann Erdgas nur als tiefkalte Flüssigkeit (Kryogen) verflüssigt werden; komprimiertes Erdgas wird (bei Raumtemperatur) dagegen unter hohem Druck von etwa 200 bar gesetzt (Shell 2013).

Dem Flüssiggas ähnlich in molekularer Struktur und Eigenschaften ist das Gas Dimethylether (DME). DME kann aus Erdgas, Schwarzlauge, Biomasse oder organischen Abfällen durch Syntheseverfahren mit Hilfe von Katalysatoren über den Zwischenschritt Methanol gewonnen werden (EBTP 2011). DME ist der einfachste Ether; er lässt sich wie Flüssiggas bei Raumtemperatur und geringem Druck von etwa 5 bar verflüssigen (Wu/Yin 2008).

Im deutschsprachigen Raum werden anstelle von Flüssiggas auch je nach Anwendungsbereich häufig die Begriffe Autogas und Treibgas benutzt. International wird Flüssiggas als Liquefied Petroleum Gas (LPG) bezeichnet (Geitmann 2008).

1.1 ZUSAMMENSETZUNG VON FLÜSSIGGAS

Die Zusammensetzung von Flüssiggas variiert je nach Ursprung, Anwendungszweck, Einsatzland und Jahreszeit. Flüssiggase bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H_2) mit drei oder vier Kohlenstoffatomen (C_3 und C_4). Atome sind Bausteine aus denen alle festen, flüssigen und gasförmigen Stoffe aufgebaut sind.

Hauptbestandteile von Flüssiggas sind die beiden Kohlenwasserstoffe Propan mit der Summenformel (C_3H_8) und Butan (C_4H_{10}). Die Summenformel gibt die Art und Anzahl der Atome einer chemischen Verbindung (Molekül) an. Neben Propan und Butan kommen andere Kohlenwasserstoffmoleküle wie Propen (C_3H_6), Isobutan (C_4H_{10}) und diverse Butene (C_4H_8) (teilweise) in größeren Mengen im Flüssiggas vor.

Weiterhin liegen Spuren an Ethan (C_2H_6), höheren Alkanen wie Pentan (C_5H_{12}), schwerfällige Verbindungen und Wasser vor (Elvers 2008, Gruden 2008). Propan (C_3H_8) und Butan (C_4H_{10}) gehören zur Stoffgruppe der normal-Alkane (Paraffine), die nur aus den beiden Elementen Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) bestehen und nur Einfachbindungen (C-C) aufweisen.

Auskunft über die Verknüpfung der Atome gibt die Strukturformel im 3D-Modell. Hier stellen die großen grauen Kugeln die C-Atome und die kleinen gelben Kugeln die H-Atome dar. DME enthält noch ein Sauerstoffatom (hier rot dargestellt). Nach Methan (CH_4), dem einfachsten Alkan, folgen Ethan mit zwei Kohlenstoff- und sechs Wasserstoffatomen (C_2H_6), anschließend Propan (C_3H_8), Butan (C_4H_{10}), Pentan (C_5H_{12}), Hexan (C_6H_{14}) usw. Diese bilden eine so genannte homologe

Reihe, die in Abbildung 1 von C_1 bis C_{16} dargestellt ist. Eine homologe Reihe lässt sich über eine Summenformel darstellen, Alkane zum Beispiel durch $C_n H_{2n+2}$. Höhere Alkane wie Pentan kommen jedoch nur in kleineren Mengen im Flüssiggas vor.

Propan und Butan bestehen nur aus wenigen Atomen. Im Vergleich dazu bestehen Ottokraftstoffe (Beispiel-Komponente: n-Heptan C_7H_{16}) oder Dieseldieselkraftstoffe (Beispiel-Komponente: Hexadecan $C_{16}H_{34}$) aus deutlich mehr Bestandteilen, so dass deren gesamte Struktur weitaus komplexer ist. Die Struktur des Moleküls, also die räumliche Anordnung der Atome und ihre Kettenlänge, bestimmen die Eigenschaften des Moleküls – und damit auch ihre Eignung für technische Anwendungen.

Der Einfluss der räumlichen Anordnung der Atome auf die Moleküleigenschaften – insbesondere den Siedepunkt – wird an den Isomeren deutlich; Isomere haben die gleiche Summenformel, aber eine andere Strukturformel. Butan hat zwei Isomere: n-Butan mit einem Siedepunkt von $-0,5\text{ °C}$ und iso-Butan mit einem Siedepunkt von $-12,8\text{ °C}$. Ferner hat n-Heptan einen Siedepunkt von $98,4\text{ °C}$, 2,2-Dimethylpentan liegt bei 79 °C .

Neben Propan und Butan enthalten Flüssiggase Pentan mit drei möglichen Isomeren, Dieseldieselkraftstoffe enthalten dagegen zum Beispiel Hexadecan, das 10359 Isomere aufweist. Die Zahl der möglichen Isomere steigt mit zunehmender Zahl der C-Atome. Die Kettenlänge hat auch einen Einfluss auf den Siedepunkt, was man etwa bei Methan ($-161,5\text{ °C}$) im Vergleich zu Hexadecan ($+287\text{ °C}$) sehen kann. Kann man die Eigenschaften von Flüssiggasen anhand ihrer Zusammensetzung bestimmen, muss man sie hingegen etwa für Dieseldieselkraftstoffe aufwendig messen.

Höhere Alkane (ab Pentan) kommen nur zu kleinen Teilen im Flüssiggas vor; entsprechend gilt folglich auch für ihre zahlreichen Isomere. Flüssiggase aus Erdgasvorkommen enthalten hauptsächlich gesättigte Kohlenwasserstoffe (C-C). Flüssiggase aus Raffinerien können zudem auch noch kleinere Anteile ungesättigter Kohlenwasserstoffe mit Kohlenstoff-Doppelbindungen (C=C), auch Alkene oder Olefine genannt, enthalten. Alkene sind

reaktionsfreudiger als Alkane. Die schwache Doppelbindung bietet einen Angriffspunkt für Reagenzien wie Sauerstoff. Dies beeinflusst etwa die Lagerfähigkeit. Die wichtigsten Olefine, die teilweise auch im Flüssiggas vorkommen, sind Propen (C_3H_6) und Buten (C_4H_8). Schließlich sind Flüssiggase auch Treibhausgase; sie weisen jedoch ein sehr niedriges Treibhauspotenzial auf. Das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential,

GWP) ist eine Maßzahl für den relativen Beitrag eines in die Atmosphäre emittierten Gases im Vergleich zum Treibhauseffekt von Kohlenstoffdioxid (CO_2). Sie gibt an, wie viel eine festgelegte Masse (in kg) eines Treibhausgases im Vergleich zu CO_2 zur globalen Erwärmung beiträgt. Der Wert beschreibt die mittlere Erwärmungswirkung über einen bestimmten Zeitraum; in der Regel werden 100 Jahre betrachtet. Im Vergleich zu CO_2

1 HOMOLOGE REIHE DER GESÄTTIGTEN KOHLENWASSERSTOFFE (ALKANE)

GAS (C_1 - C_2)		FLÜSSIGGAS (C_2 - C_4)
VERWENDUNG BRENNSTOFF, KRAFTSTOFF, CHEMISCHES SYNTHESGAS		VERWENDUNG BRENN- & KRAFTSTOFF
METHAN CH_4 ISOMERE 1 SIEDEPUNKT $-161,5\text{ °C}$		PROPAN C_3H_8 ISOMERE 1 SIEDEPUNKT $-42,1\text{ °C}$
ETHAN C_2H_6 ISOMERE 1 SIEDEPUNKT -93 °C		
DIMETHYLETHER C_2H_6O ISOMERE 1 SIEDEPUNKT $-24,8\text{ °C}$		
PETROLETHER (C_5 - C_7)		
VERWENDUNG LÖSUNGSMITTEL		
n-PENTAN C_5H_{12} ISOMERE 3 SIEDEPUNKT 36 °C		BUTAN C_4H_{10} ISOMERE 2 n-BUTAN C_4H_{10} SIEDEPUNKT $-0,5\text{ °C}$
OTTOKRAFTSTOFF (C_7 - C_{12})		
VERWENDUNG KRAFTSTOFF		
z.B. n-HEPTAN / 2,2 DIMETHYLPENTAN C_7H_{16} ISOMERE 9 SIEDEPUNKT $98,4 / 79\text{ °C}$		ISO-BUTAN C_4H_{10} SIEDEPUNKT $-12,8\text{ °C}$
DIESELKRAFTSTOFF (C_{15} - C_{18})		
VERWENDUNG KRAFT- UND BRENNSTOFF		
z.B. HEXADECAN $C_{16}H_{34}$ ISOMERE 10359 SIEDEPUNKT 287 °C		

hat Propan ein 3,3-fach höheres Treibhauspotenzial, und der teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoff 1,1,1,2-Tetrafluorethan, der in einer Übergangszeit bis 2017 noch in Fahrzeugklimaanlagen als Kühlmittel eingesetzt werden darf, hat ein 1.430-fach erhöhtes Treibhauspotenzial als CO_2 , wie Tabelle 2 zeigt. Darin sind die GWP-Werte einiger Flüssiggase sowie derjenigen Treibhausgase aufgeführt, die im Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (Kyoto-Protokoll) reglementiert wurden.

Zudem tragen Flüssiggase nicht zum Abbau der Ozonschicht bei. Das Ozonabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential, ODP) eines Gases ist analog zum Treibhauspotenzial eine Maßzahl für dessen relativen Beitrag zum Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre. Für Flüssiggase wird der ODP mit 0 angegeben (EPA 2015). Da viele der ozonschädlichsten Stoffe inzwischen erfolgreich reduziert oder nicht mehr verwendet werden, richtet sich die Aufmerksamkeit unter anderem auf Distickstoffoxid (Lachgas), das mit einem ODP von 0,017 nun zu den bedeutendsten Quellen ozonschädlicher Emissionen gehört (Ravishankara et al. 2009).

1.2 EIGENSCHAFTEN

Die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Flüssiggasen werden von ihrer Zusammensetzung und den Eigenschaften ihrer jeweiligen Komponenten bestimmt. Die Darstellung wichtiger physikalisch-chemischer Grunddaten der Hauptkomponenten Propan und Butan wird nachfolgend unterteilt

in eine Beschreibung der stofflichen sowie der verbrennungstechnischen Eigenschaften und im Vergleich zu anderen Energieträgern dargestellt. Eine **Stoffeigenschaft** ist eine stoffspezifische, charakteristische Größe, die eine Komponente kennzeichnet. Flüssiggase sind Gemische aus verschiedenen Komponenten bzw. Reinstoffen. Reinstoffe zeichnen sich durch eine einzigartige Kombination von Stoffeigenschaften aus, anhand derer sie identifiziert werden können. Die **verbrennungstechnischen Eigenschaften** sind wichtige Parameter für den technischen Einsatz, zum Beispiel für den störungsfreien Betrieb von Verbrennungsmotoren, Heizkesseln oder Brennern.

Stoffliche Eigenschaften

Materie liegt in drei **Aggregatzuständen** vor: fest, flüssig und gasförmig. Gase füllen den zur Verfügung gestellten Raum ganz aus. Zustandsänderungen wie Schmelzen, Verdampfen oder Veränderung der äußeren Gestalt sind physikalische Vorgänge, bei denen keine neuen Verbindungen gebildet werden.

Bei chemischen Vorgängen werden hingegen Stoffe unter Bildung neuer Verbindungen umgewandelt, ein Beispiel ist die Verbrennung. Die chemischen und auch die physikalischen Eigenschaften sind Funktionen der physikalischen Bedingungen, das heißt sie hängen vom Aggregatzustand, von Druck und Temperatur, von der An- oder Abwesenheit anderer Stoffe, von der Einwirkung von Strahlung und anderem ab (Mortimer/Müller 2010). So hängt der Aggregatzustand eines Stoffes von seinem Schmelz- und Siedepunkt ab.

Der **Siedepunkt** bezeichnet die Temperatur, bei der ein Stoff vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht. Die Temperatur einer siedenden Flüssigkeit bleibt konstant bis die ganze Flüssigkeit verdampft ist. Um eine Flüssigkeit am Sieden zu halten, muss Wärme zugeführt werden, denn während des Siedens verliert die Flüssigkeit ihre energiereichen Moleküle. Der Siedepunkt einer Flüssigkeit hängt vom äußeren Druck ab. Wasser siedet zum Beispiel bei $96,7^\circ\text{C}$ bei einem Druck von $0,90\text{ bar}$ und bei $102,3^\circ\text{C}$ bei einem Druck von $1,1\text{ bar}$. Der Siedepunkt beim Normdruck von $1,013\text{ bar}$ ist der normale Siedepunkt einer Flüssigkeit. Siedepunktangaben in Tabellenwerken sind normale Siedepunkte. Der mittlere Atmosphärendruck auf der Höhe des Meeresspiegels beträgt $1,013\text{ bar}$. In höheren Lagen ist der mittlere Atmosphärendruck geringer. Bereits 280 Meter über dem Meeresspiegel (mittlerer Atmosphärendruck $0,97\text{ bar}$) siedet Wasser bei 99°C und auf dem Mount Everest (Höhe 8848 Meter , mittlerer Atmosphärendruck $0,326\text{ bar}$) siedet es bei 70°C . Der Siedepunkt hängt folglich vom Atmosphärendruck ab.

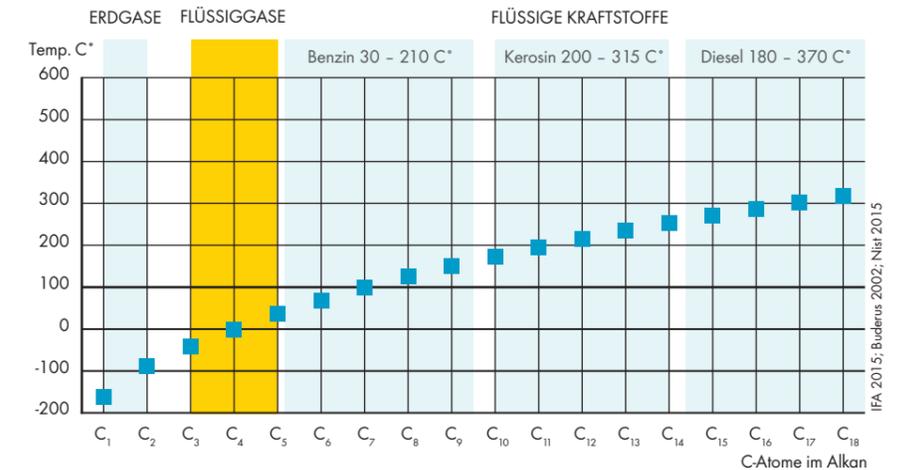
Die Siedepunkte sind für Alkane von Methan (C_1) bis Octadecan (C_{18}) in Abbildung 3 dargestellt. Der Siedepunkt eines Gases liegt umso niedriger, je geringer die Oberfläche eines Moleküls ist. Kurzkettige oder kompakte Alkane mit wenigen Kohlenstoffatomen haben folglich niedrige Siedepunkte. So liegt der Siedepunkt von Methan bei Normaldruck bei $-161,5^\circ\text{C}$. Alkane mit mehr Kohlenstoffatomen haben in der Regel deutlich höhere Siedepunkte. Ab fünf Kohlenstoffatomen sind

unverzweigte Alkane (C_{5+}) unter Normbedingungen (Temperatur 0°C ; Druck $1,013\text{ bar}$) flüssig. Der Siedepunkt für Propan liegt bei $-42,1^\circ\text{C}$ und für n-Butan bei $-0,5^\circ\text{C}$. Somit ist Butan einfacher zu verflüssigen und damit auch einfacher zu lagern (Mortimer/Müller 2010, Watkins 2011). Diesel- und Ottokraftstoffe bestehen aus so vielen Komponenten, dass sie keinen eindeutigen Siedepunkt, sondern einen **Siedeverlauf** aufweisen. Der Siedeverlauf für Dieseldieselkraftstoffe liegt im Bereich $180\text{ bis }370^\circ\text{C}$, für Ottokraftstoffe im Bereich $30\text{ bis }210^\circ\text{C}$ (Bosch 2014), Heizöle haben einen ähnlichen Siedeverlauf wie Dieseldieselkraftstoffe und Kerosine weisen einen Siedebereich von $200\text{ bis }315^\circ\text{C}$ (Mortimer/Müller 2010) auf, der durch den Raffinerieprozess, das Rohöl und die Produkthanforderung (Sommer- und Winterware) bestimmt wird.

Dampfdruck: Wenn eine Flüssigkeit in einem geschlossenen Gefäß verdampft, verbleiben die Moleküle in der Gasphase in der Nähe der Flüssigkeit. Wegen ihrer ungeordneten Bewegung kehren manche Moleküle in die Flüssigkeit zurück, während andere flüssige Moleküle verdampfen. Nach einiger Zeit wird der Zustand erreicht, bei dem die Verdampfungs- und die Kondensations-Geschwindigkeit gleich groß sind. Der Druck des Dampfes, der bei gegebener Temperatur mit der Flüssigkeit im Gleichgewicht steht, wird Dampfdruck genannt. Der Dampfdruck einer Flüssigkeit hängt von der Temperatur ab; er steigt mit zunehmender Temperatur.

In Abbildung 4 ist der Dampfdruck von Propan und Butan in Abhängigkeit von Temperatur und Druck dargestellt. Der Dampfdruck stellt den Hauptunterschied zwischen Propan und Butan dar. So liegt der Dampfdruck bei

3 SIEDEPUNKTE DER ALKANE



20°C von Butan bei etwa $1,5\text{ bar}$ und der von Propan bei etwa 8 bar . Die Dampfdruckkurven zeigen die Zunahme des Dampfdruckes mit der Temperatur. Jede Kurve kann bis zur kritischen Temperatur der jeweiligen Substanz fortgesetzt werden. Die **kritische Temperatur** ist die Temperatur, unterhalb derer ein Gas durch Druck verflüssigt werden kann; oberhalb der kritischen Temperatur ist das nicht mehr möglich.

Für Propan liegt die kritische Temperatur bei $96,8^\circ\text{C}$ und für Butan bei $152,0^\circ\text{C}$. Es zeigt sich, dass sich Propan und Butan auch bei höheren Temperaturen von nahezu 100°C oder mehr noch verflüssigen lassen. Anders dagegen Methan, das nur tiefkalt (kryogen) verflüssigt werden kann und selbst bei hohem Druck, zum Beispiel als komprimiertes Erdgas (CNG) bei rund 200 bar , noch in gasförmigem Zustand bleibt (Mortimer/Müller 2010).

Durch die **Verflüssigung** von Gasen lässt sich ihr Volumen drastisch reduzieren. Das Volumen flüssigen n-Butans schrumpft um den Faktor 228 und das vom flüssigen Propan um den Faktor 266 gegenüber seinem gasförmigen Zustand bei 15°C und atmosphärischem Druck von $1,013\text{ bar}$ (Hempel 2007). Das erleichtert den Transport etwa mit Tanklastwagen und die Speicherung etwa in Fahrzeugen mit Ottomotor, Feuerzeugen oder Camping-Gasflaschen erheblich (List 2008). Bei Methan (in Form von LNG) ist der Faktor sogar größer als 600 (Watkins 2011).

Jeder Punkt auf der Dampfdruckkurve von Propan bzw. Butan erfasst eine Temperatur und einen Druck, bei dem Flüssigkeit und

Dampf im Gleichgewicht miteinander sind. Der Siedepunkt für Propan liegt (bei Normdruck von $1,013\text{ bar}$) bei -42°C , für Butan bei $-0,5^\circ\text{C}$ und für Propan-Butan-Gemische läge ein Siedeverlauf aus den zwei Siedepunkten für Propan und Butan vor.

Flüssiggas ist also ein Gemisch aus unterschiedlichen Stoffen, die bei verschiedenen Temperaturen in die Gasphase übergehen und folglich einen Siedeverlauf mit eindeutigen Schwerpunkten bei den Hauptkomponenten Propan und Butan ausbilden. Bei Raumtemperatur (20°C) ließe sich Propan durch einen Druck von weniger als 9 bar verflüssigen (Mortimer/Müller 2010, Watkins 2011).

Relevant ist der Dampfdruck etwa bei Fahrzeugen mit gasförmiger Kraftstoffeinspritzung, weil Flüssiggas durch den ihm eigenen Dampfdruck vom Tank zum Motor befördert wird. Dieser Druck im Kraftstofftank ist bei Propan bei Temperaturen von über -42°C hoch genug, um den Kraftstoff bis zum Motor zu fördern, bei Butan aber nur über $-0,5^\circ\text{C}$. Unterhalb dieser Temperaturpunkte und atmosphärischen Drücke gehen Propan und Butan nicht mehr vom flüssigen in einen gasförmigen Zustand über. Höhere Butankonzentrationen reduzieren also den Dampfdruck (Bosch 2014). In warmen Regionen kann daher mehr Butan verwendet werden, da bei über $-0,5^\circ\text{C}$ nicht die Gefahr der Kondensation (Verflüssigung) des Butans besteht.

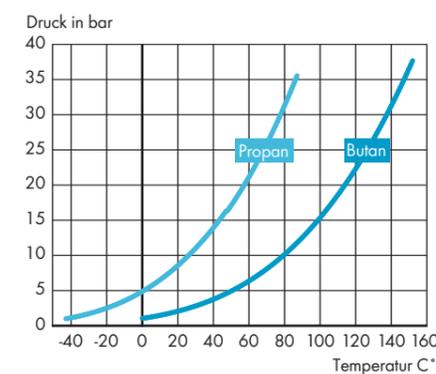
Die **Dichte** ist temperaturabhängig und wird für Diesel- und Ottokraftstoffe auf eine Temperatur von 15°C bezogen. Sie gibt Anhaltspunkte über die chemische Struktur und wird

2 TREIBHAUSPOTENZIALE AUSGEWÄHLTER FLÜSSIGGASE UND KYOTO-PROTOKOLL-TREIBHAUSGASE

	Treibhausgas	Summenformel	Treibhauspotenzial GWP über 100 Jahre
Flüssiggase	Propen / Propylen	C_3H_6	1,8
	Propan	C_3H_8	3,3
	Iso-Butan	C_4H_{10}	4
Kyoto-Protokoll-Treibhausgase	Kohlenstoffdioxid	CO_2	1
	Methan	CH_4	25
	Distickstoffoxid (Lachgas)	N_2O	298
	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe wie 1,1,1,2-Tetrafluorethan	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$	1.430
	Perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe wie Hexafluorethan	CF_3CF_3	9.300
	Schwefelhexafluorid	SF_6	22.800

Forster et al. 2007

4 DAMPFDRUCK IN RELATION ZUR TEMPERATUR



daher, gemeinsam mit anderen Stoffeigenschaften, auch zur Abschätzung der Zusammensetzung verwendet. Die Dichte bei 15 °C und 1,013 bar von gasförmigem Propan liegt bei 1,89 kg/m³ und Butan bei 2,54 kg/m³. Gasförmiges Propan und Butan sind anders als Methan (0,68 kg/m³) schwerer als Luft (1,22 kg/m³). Daher können Butan und Propan Luft verdrängen. Dies macht eine Gasüberwachung bei der Lagerung notwendig, da es durch unkontrollierten Gasaustritt zur Entzündung oder zur Reduzierung des Sauerstoffgehaltes in geschlossenen Räumen kommen kann (Watkins 2011).

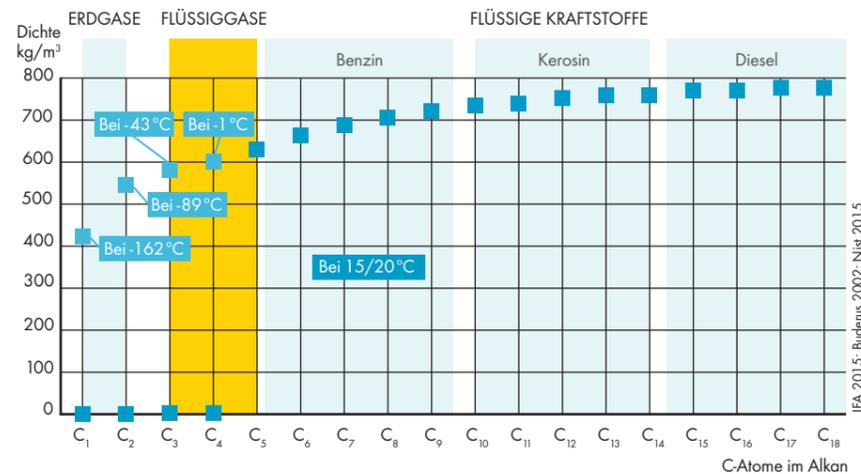
Die Dichte flüssigen Propan (bei 15 °C und Druck 7,3 bar) liegt hingegen bei 507 kg/m³ und von Butan (bei 15 °C und Druck 1,8 bar) bei 584 kg/m³. Der Druck zur Verflüssigung von Propan entspricht einem nicht voll aufgepumpten Rennradreifen und der von Butan in etwa dem eines stark gefüllten Traktorreifens. Flüssige Flüssiggase weisen somit eine geringere Dichte als flüssige Kraftstoffe auf. Denn die Dichte von Dieselmotorkraftstoffen muss nach DIN EN 590 820 bis 845 kg/m³ und die Dichte von Ottomotorkraftstoffen 720 bis 775 kg/m³ (jeweils 15 °C und 1,013 bar) betragen.

Die Dichte nimmt mit der Länge der Kohlenwasserstoffmoleküle zu (siehe Abbildung 5). Propan und Butan sind etwas schwerer als die einfachen Alkane Methan und Ethan. Die mittleren Alkane Pentan bis Octan sind leicht flüchtige Kohlenwasserstoffe, die vor allem als Kraftstoff für Ottomotoren eingesetzt werden. Höhere Alkane sind zähflüssiger bis fest. So finden Nonan bis etwa Hexadecan Verwendung in Diesel- und Flugturbinenkraftstoffen; Hexadecan und weitere höhere Alkane dagegen als Heizöl und Schmierstoffe.

Verbrennungstechnische Eigenschaften

Neben den stofflichen Eigenschaften von Flüssiggasen sind ihre verbrennungstechnischen Eigenschaften, wie Flammpunkt, Zündtemperatur und Heizwert wichtige Anhaltspunkte für ihre Beschreibung. Der Flammpunkt, die Zündtemperatur und der Heizwert der Alkane Methan (C₁) bis Octadecan (C₁₈) sind im Vergleich zu den Hauptkomponenten von Flüssiggas Propan (C₃) und Butan (C₄) in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt. Das Verhalten von Brennstoffen wird sowohl zu Beginn als auch während des Ablaufes der

5 DICHTEN DER ALKANE BEI 1,013 BAR



Verbrennung von verschiedenen Eigenschaften beeinflusst, die sich letztlich auf die Konstruktion und Güte eines Verbrennungssystems wie eines Motors oder Brenners auswirken.

Eine wichtige Charakteristik für die Verbrennung von Kraftstoffen ist das Verbrennungsluftverhältnis λ . λ ist definiert als die für eine Verbrennung zur Verfügung stehende Luftmasse im Verhältnis zu derjenigen Luftmasse, die für eine vollständige (stöchiometrische) Verbrennung erforderlich ist. Der für die Verbrennung (Oxidation) erforderliche Mindestluftbedarf kann aus der chemischen Reaktionsgleichung errechnet werden; er hängt unter anderem vom Kohlenstoffgehalt des Kraftstoffes ab. Für die vollständige Verbrennung eines Kilogramms Methan/Propan/Butan werden 9,56/32,31/24,36 m³ Luft benötigt; für flüssigen Ottomotorkraftstoff sind es etwa 11 m³ Luft.

Aus dem Verbrennungsluftverhältnis lassen sich Rückschlüsse auf den Verbrennungsverlauf, Temperaturen, Schadstoffentstehung, die benötigte Leistung des Gebläses und den Wirkungsgrad ziehen. Während Ottomotoren hauptsächlich im stöchiometrischen Betrieb (λ um 1) operieren, finden die meisten übrigen verbrennungstechnischen Anwendungen (Dieselmotor, Heizkessel, Turbinen) unter Luftüberschuss ($\lambda > 1$) statt (Buderus 2002).

Neben dem Luftbedarf ist die **Zündgrenze** ein wichtiges Kriterium für die Verbrennung und für die Sicherheitstechnik. Die Verbrennung eines Brennstoffes wird durch sein Entzünden eingeleitet. Die Grenzen, in denen das geschehen kann, die so genannten

Zündgrenzen bzw. die durch sie eingegrenzten Zündbereiche, sind identisch mit den Explosionsgrenzen brennbarer, fluidähnlicher Substanzen im Gemisch mit Luft. Zu den fluidähnlichen Substanzen zählen Kohlenstaub, verdunstungsfähige Flüssigkeiten und Gase. Diese Grenzen geben Aufschluss über die Höhe des Brennstoffanteiles in einem Staub/Luft-, Dampf/Luft- oder Gas/Luft-Gemisch, jeweils ausgedrückt in Vol.%, in deren Bereich eine Zündung oder Explosion eintreten kann.

Je geringer die Temperatur des Zündbereichs liegt, desto eher entzündet sich ein Brennstoffgemisch, und je weiter die Zündgrenzen auseinander rücken, desto leichter entzündet es sich. Da Flüssiggas im Bereich von etwa 1,8 bis 9,4 Vol.% zündet (Buderus 2002), ist es ein leicht entzündliches Gas, das mit besonderer Vorsicht zu handhaben ist. Methan entzündet sich über einen weiteren Bereich von 5 bis 15 Vol.%, kann aber erst später als Flüssiggas ab etwa 5 Vol.% zünden. Die Zündgrenzen sind temperatur- und druckabhängig und stark vom Messverfahren abhängig, so dass man in der Literatur verschiedene Daten findet und die Einsatzfähigkeit der Gase in Abhängigkeit des jeweiligen Einsatzzweckes prüfen muss (Hirsch/Brandes 2014).

Die **Zündtemperatur** ist ein weiteres Kriterium. Ein Kraftstoff ist erst brennfähig, wenn er auf Zündtemperatur erwärmt worden ist. Dies gilt auch für die Selbstzündung von brennbaren Stäuben, Dämpfen und Gasen innerhalb ihrer Zündgrenzen. Das Einhalten von Temperaturen unterhalb der Zündtemperatur vermeidet die Selbst-

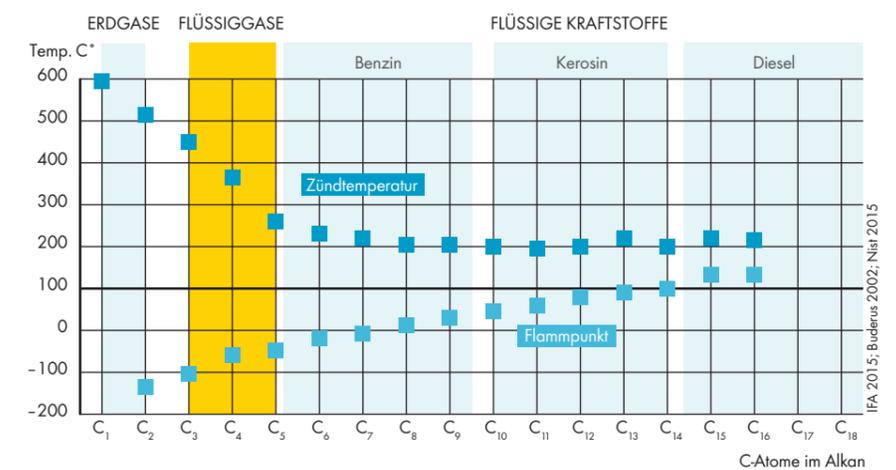
zündung, wenn keine externe Zündquelle vorliegt. Die Zündtemperatur wird auch mit Entzündungstemperatur oder Zündpunkt bezeichnet. In Abbildung 6 sind die Zündtemperaturen für einige Alkane zusammengestellt. Propan besitzt eine Zündtemperatur von 450 °C und Butan eine von 365 °C.

Die Zündtemperatur hängt von der Zusammensetzung des Brenn- bzw. Kraftstoffes ab. So kann über die Mischung von Propan und Butan auch die Zündtemperatur von Flüssiggas variiert werden. Ferner zünden Alkane vor Olefinen und Aromaten. Otto- und Dieselmotorkraftstoffe sind Vielstoffgemische, in denen auch Olefine und Aromaten vorkommen. Ihre Zündtemperatur variiert über einen größeren Temperaturbereich. Die Zündtemperatur von Ottomotorkraftstoffen beträgt im Mittel 500 °C, während Dieselmotorkraftstoffe im Mittel eine Zündtemperatur von 350 °C aufweisen (untere Grenze 220 °C). Im Ottomotor erfolgt eine Fremdzündung mittels Zündkerze des Kraftstoff-Luft-Gemisches, im Dieselmotor wird Dieselmotorkraftstoff unter Druck selbst gezündet (Todsien 2012, Bosch 2014).

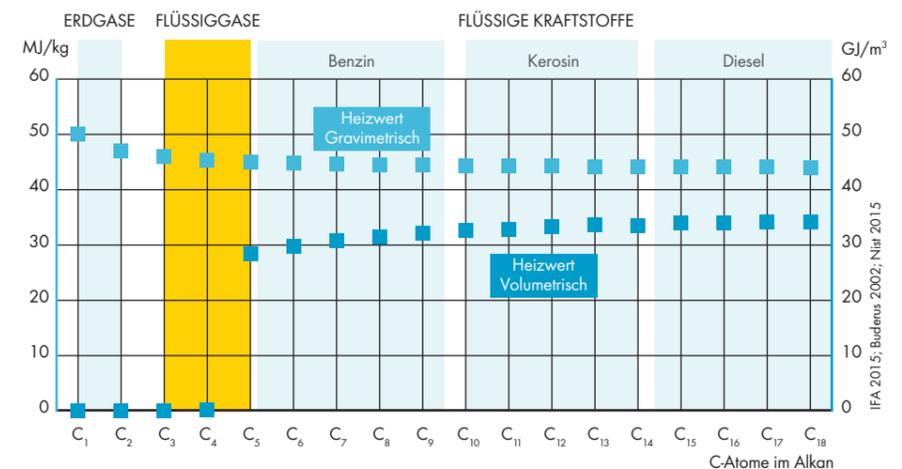
Im Gegensatz zur Zündtemperatur bezeichnet der **Flammpunkt** einer brennbaren Flüssigkeit die Temperatur, bei der so viele brennbare Dämpfe gebildet werden, dass sie mit der oberhalb des Flüssigkeitsspiegels befindlichen Luft ein zündfähiges Gemisch bilden und bei Annäherung einer Flamme (externe Zündquelle) kurz entzünden. Der Flammpunkt ist ein Kriterium für die Feuergefährlichkeit brennbarer Substanzen (Buderus 2002). Für die motorische Verbrennung sind die Zündtemperatur und der Flammpunkt bei atmosphärischem Druck weniger relevant, da die Verbrennung unter hohen Drücken abläuft, für Lagerung und Transport sind sie aber wichtig. Ottomotorkraftstoff hat einen Flammpunkt kleiner 20 °C und ist damit leichter entzündlich als Dieselmotorkraftstoff und auch Heizöl. Diese weisen einen Flammpunkt größer 55 °C auf. Wie Abbildung 6 zeigt, haben Propan und Butan weit niedrigere Flammpunkte von weniger als -50 °C.

Zur Bestimmung des Energieinhalts von Brenn- und Kraftstoffen wird üblicherweise der Heizwert verwendet. Der **Heizwert** ist die bei der vollkommenen Verbrennung frei werdende und nutzbare Wärmemenge, bezogen auf die Mengeneinheit des

6 ZÜNDTEMPERATUR UND FLAMMPUNKT DER ALKANE



7 HEIZWERTE DER ALKANE



Kraft- oder Brennstoffes. Beim Heizwert ist vorausgesetzt, dass das gesamte nach der Verbrennung im Abgas vorliegende Wasser gedanklich dampfförmig bleibt, also die im Wasserdampf gebundene Wärme nicht mehr zurückgewonnen wird. Wenn diese bei der Verbrennung ebenfalls genutzt wird, spricht man vom Brennwert. Im Heizungsbereich gibt es Kessel, die den Brennwert nutzen können. In Fahrzeugen kann der Brennwert dagegen nicht genutzt werden (Bosch 2014).

Mit der Kettenlänge der Alkane nimmt wie die Dichte in kg/m³ der volumetrische Heizwert in GJ/m³ (entspricht MJ/l) zu. Der gravimetrische Heizwert in MJ/kg nimmt demgegenüber mit der Kettenlänge bis Decan (C₁₀) ab und bleibt dann relativ konstant (Abb. 7).

Der volumetrische Heizwert berechnet sich durch die Multiplikation des gravimetrischen

Heizwertes mit der Dichte. Der volumetrische Heizwert von Propan beträgt 26,74 GJ/m³ bei einer Dichte im flüssigen Zustand von 581,95 kg/m³ (bei -43 °C und 1,013 bar); hieraus ergibt sich ein gravimetrischer Heizwert von 45,9 MJ/kg. Der volumetrische Heizwert gasförmigen Propan (15 °C und 1,013 bar) bei einer Dichte von 1,89 kg/m³ errechnet sich zu 0,087 GJ/m³.

Der volumenspezifische Heizwert bzw. der Energiegehalt eines flüssigen Liters Flüssiggas ist etwa 25 % kleiner als derjenige eines Liters Ottomotorkraftstoff. Beim Einsatz im Ottomotor ist der Mehrverbrauch (in Litern) jedoch etwas geringer, und zwar etwa 20 %. Dies wird unter anderem damit begründet, dass ein Flüssiggas/Luft-Gemisch im Motor besser durchmischt vorliegt als ein Ottomotorkraftstoff/Luft-Gemisch (Geitmann 2008) sowie auch an der höheren Oktanzahl von Flüssiggas.



LPG: HERKUNFT UND MÄRKTE

Flüssiggase gehören ebenso wie Erdöl und Erdgas zu den fossilen Kohlenwasserstoffen. Für Anwender stellt sich die Frage: Woher und aus welchen Quellen stammt Flüssiggas? Wie groß sind überhaupt die weltweiten „Flüssiggas-Vorkommen“? Und wie haben sich Angebot und Nachfrage auf den Flüssiggasmärkten – weltweit und in Deutschland – in den vergangenen Jahren entwickelt?

2.1 WOHER KOMMT FLÜSSIGGAS?

Wesentliches Merkmal von Flüssiggasen ist, dass sie in der Regel kein Hauptprodukt sind, sondern – zusammen mit anderen Gasen und Kohlenwasserstoffen – meist als Neben- oder Koppelprodukt vorkommen. Flüssiggase fallen zum einen bei der Rohöl- und Erdgasförderung, zum anderen bei der Rohölverarbeitung zu Mineralölprodukten an. Die Verfügbarkeit von Flüssiggasen hängt folglich mit der Öl- und Gasförderung sowie der Raffinerieerzeugung zusammen.

In Regionen mit eigener Öl- und Gasförderung, insbesondere so genannter Feuchtgase (wet gases), überwiegt der Upstream-Bereich als Quelle, in Regionen mit größeren Raffineriekapazitäten der Downstream-Sektor. Weltweit stammen rund 60% der Flüssiggase aus der Erdgasförderung und etwa 40% aus der Rohölverarbeitung bzw. Raffinerieerzeugung (WLPGA/Argus 2014). In Westeuropa dominiert die Rohölverarbeitung als Quelle der Flüssiggasbereitstellung. In Deutschland kann der Raffinerieanteil der Flüssiggasproduktion auf Basis der Amtlichen Mineralölstatistik auf sogar 95% geschätzt werden (MWV 2014).

LPG aus Rohöl- und Erdgasgewinnung

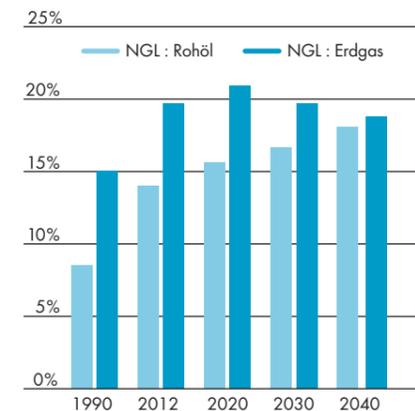
Bei der Rohölförderung anfallende Gase werden auch **Erdölbegleitgas (Associated Petroleum Gas)** genannt. Erdölbegleitgas kann flüssig im Rohöl gelöst oder gasförmig – zum Beispiel in einer Gasblase an der Spitze einer Erdölquelle – vorkommen. Begleitgase sind Feuchtgase und bestehen meist vornehmlich aus Methan; sie enthalten zudem Propan und Butan und auch länger-kettige Kohlenwasserstoffe bis hin zu Hexanen (C₆-Alkanen) sowie weitere nicht-kohlenwasserstoffhaltige Komponenten und Verunreinigungen. Die Zusammensetzung von Begleitgasen kann stark variieren. Auf eine Tonne Rohöl können je nach Förderstätte bis zu 800 Kubikmeter Begleitgase entfallen (BT/WD 2012).

Begleitgas muss gereinigt und aufbereitet werden, was in der Regel höhere Investitionen und größeren technischen Aufwand als bei der reinen Erdgasförderung erfordert. Insbesondere bei entlegenen oder kleineren Ölförderstätten wurde es daher bislang oftmals abgepackelt. Inzwischen regulieren Regierungen jedoch verstärkt das Abpackeln und Energieunternehmen versuchen, Associated Gas einer wirtschaftlichen Verwendung

zuzuführen, beispielsweise durch Verstromung in Blockheizkraftwerken zur Stromversorgung von Förderanlagen. Teilweise wird Begleitgas auch zur Erhöhung des Förderdrucks in die Ölquelle reinjiziert. Und schließlich kann Erdölbegleitgas über Reinigung, Kühlung und Kompression oder auch chemische Umwandlung verflüssigt werden – zu Liquefied Natural Gas (LNG), Gas-to-Liquids (GTL) oder Liquefied Petroleum Gas (BT/WD 2012).

Weiterhin fallen bei der Erdgasförderung so genannte **Natural Gas Liquids (NGLs)** an, teilweise auch als Erdölgase bezeichnet. Natural Gas Liquids sind flüssige Kohlenwasserstoffkomponenten, die zusammen mit dem Erdgas zutage gefördert werden. Dabei unterscheidet man zwischen Gaskondensaten und anderen „Gasflüssigkeiten“. Gaskondensate weisen fünf und mehr Kohlenstoffatome (C₅₊) auf (Pentan-plus), sind bei atmosphärischem Druck stabile Flüssigkeiten und besitzen leichtem Rohöl ähnliche Eigenschaften. Die übrigen Gasflüssigkeiten, darunter auch Flüssiggase, müssen vom Erdgas in einer Erdgasaufbereitungsanlage (Gas Processing Plant) – ähnlich wie in einer Raffinerie mit Hilfe von

8 NGLs VS. GLOBALE ROHÖL- UND GASFÖRDERUNG



Temperatur und Druck – durch Fraktionierung abgetrennt werden (IEA 2010, Brookings 2013).

Natural Gas Liquids fallen insbesondere bei der Förderung von Feuchtgas und unkonventionellem Erdgas an. Zusammen mit der globalen Erdgasförderung hat in den vergangenen Jahren auch die Natural Gas Liquids-Produktion deutlich zugenommen. Zum einen werden die flüssigen Bestandteile von Gasvorkommen immer besser genutzt. Zum anderen werden gezielt Feucht- bzw. Nassgasvorkommen erschlossen; denn NGLs können, insbesondere bei niedrigen Gaspreisen, einen wesentlichen Teil zur Amortisation der erforderlichen Upstream-Investition beitragen. So liegt der energetische Anteil von NGLs an der globalen Erdgasproduktion (liquids ratio) inzwischen bei rund 20% (IEA 2014).

Da Natural Gas Liquids auf der Verwendungsseite eher Rohöle ersetzen oder ergänzen, werden sie auch zu Rohöl in Beziehung gesetzt: Die weltweiten NGL-Vorkommen werden auf knapp 20% der konventionellen Erdölressourcen geschätzt. Die globale NGL-Produktion macht mit 12,5 Millionen Barrel pro Tag inzwischen rund ein Siebtel aller weltweit geförderten flüssigen Kohlenwasserstoffe aus. Aufgrund der steigenden Erdgasförderung wird für die Zukunft mit einem weiteren deutlichen Anstieg der globalen NGL-Produktion um 5,7 Millionen Barrel/Tag auf mehr als 18 Millionen Barrel/Tag 2040 gerechnet (IEA 2014). Die Bedeutung von NGLs für die globale Rohölversorgung wird folglich noch weiter wachsen und sich ebenfalls einem Anteil von 20% annähern. Der Anteil von Flüssiggas an der globalen

Förderung ist demgegenüber deutlich kleiner, nämlich in der Größenordnung von etwa 5%.

LPG aus Rohölverarbeitung

Rohöl ist im Wesentlichen eine Mischung von Kohlenwasserstoffen und anderer chemischer Verbindungen. In Raffinerien werden die im Rohöl enthaltenen Kohlenwasserstoffmoleküle durch Erhitzung und Druck in Abhängigkeit von ihrem Siedeverhalten in einzelne Fraktionen zerlegt und zu Mineralölprodukten verarbeitet. Die Fraktionen reichen von nicht kondensierten Raffineriegasen über Gasöle bis hin zu schweren Rückständen. Die Flüssiggase Propan und Butan gehören dabei mit zu den leichtesten Bestandteilen des Rohöls und werden mit als Erstes abgetrennt.

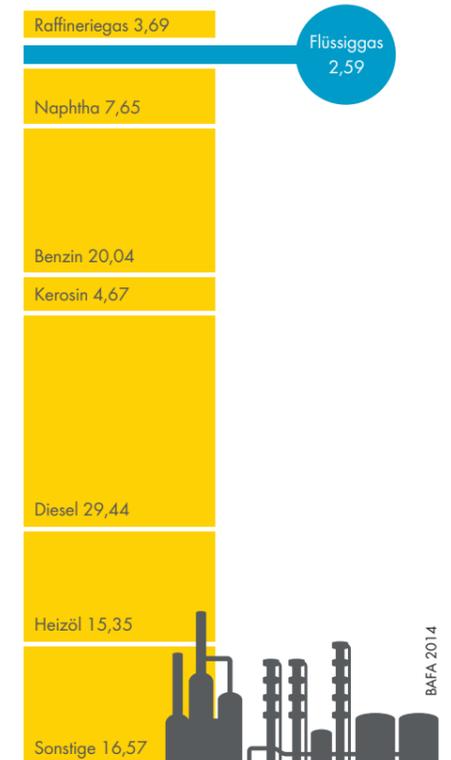
Die Ausbeutestruktur einzelner Raffinerien variiert in Abhängigkeit von der Komplexität der Rohölverarbeitung und von den angewandten Umwandlungsverfahren. Bei der Rohölverarbeitung zu Mineralölprodukten handelt es sich grundsätzlich um Koppelproduktion; das heißt, die Struktur des Outputs und damit die Anteile der einzelnen Mineralölprodukte stehen in einem mehr oder weniger festen Verhältnis zur Höhe des Raffinerie-Outputs. Daher lässt sich die Output-Struktur von Raffinerien (Produktenmix) – und damit auch der Anteil von Flüssiggas an der Raffinerieerzeugung – nur in begrenztem Maße verändern.

Bezogen auf die Raffinerieerzeugung machen Flüssiggase nur einen kleinen Anteil des Raffinerieausstoßes aus. Gemessen an der gesamten Brutto-Raffinerie-Erzeugung Deutschlands in Höhe von 101 Millionen Jahrestonnen (2013) lag der Anteil von Flüssiggas bei gut 2,5% (BAFA 2014). Die globale LPG-Erzeugung aus Raffinerien wird auf 110 Millionen Jahrestonnen geschätzt (WLPGA/Argus 2014) – bei einer globalen Raffinerieerzeugung von 4.000 Milliarden Jahrestonnen (IEA 2014) ergibt sich auch im globalen Durchschnitt ein Flüssiggas-Anteil von 2,5 bis 3% an der Welt-Raffinerieerzeugung.

LPG aus Biomasse

Flüssiggas wird unter anderem auch dafür verwendet, das Rohgas aus Biogasanlagen aufzubereiten. Durch die Zugabe von Flüssiggas als Konditionierungsgas kann Biogas auf die brenntechnischen Eigenschaften von Erdgas (H- oder L-Gasnetzqualität) eingestellt werden und anschließend in das Erdgasnetz eingespeist werden (Burmeister et al. 2008).

9 OUTPUTSTRUKTUR DEUTSCHER RAFFINERIEEN IN PROZENT



Flüssiggas kann aber auch selbst mit unterschiedlichen Verfahren aus regenerativen Energien (Biomasse) hergestellt werden.

So lässt sich Flüssiggas beispielsweise aus Glycerin durch thermisches Spalten gewinnen. Das dafür benötigte Glycerin fällt etwa bei der Produktion von Biodiesel oder Zellulose als Reststoff an. Entwickelt werden derzeit ferner auch Anlagen zur Biomassevergasung mit der Fischer-Tropsch-Synthese (Biomass-to-Liquid, BtL), in denen Flüssiggas aus Restholz oder anderen regenerativen Rohstoffen erzeugt werden kann.

Darüber hinaus werden in Laborexperimenten Mikroorganismen erforscht, die durch Stoffwechselprozesse Flüssiggas generieren könnten. Diese Versuche befinden sich aber noch im Stadium der Grundlagenforschung (DVFG 2011). Zudem entstehen bei der Hydrierung von Pflanzenölen zu Dieseleratzkraftstoffen gasförmige Nebenprodukte, die hauptsächlich aus Propan bestehen (DLR 2013). Eine erste kleinere Anlage zur Aufbereitung dieser Nebenprodukte zu Bio-Propan befindet sich im Bau (WLPGA 2015). Anders als bei flüssigen Biokraftstoffen oder

10 FLÜSSIGGAS GLOBAL

Die fünf größten
 ■ Produzenten
 ■ Verbraucher
 in Millionen Tonnen

WLPGA/Argus 2014



Biogas handelt es sich bei biogenem Flüssiggas jedoch meist um noch vorkommerzielle Projekte oder um vergleichsweise kleine Produktmengen.

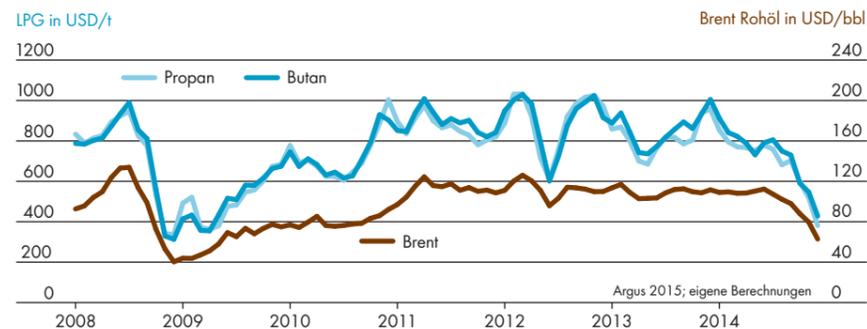
2.2 GLOBALE LPG-MÄRKTE

Die globale Flüssiggasproduktion aus der Öl- und Gasförderung sowie aus Raffinerien wird auf rund 280 Millionen Jahrestonnen und der weltweite Flüssiggasverbrauch auf 265 Millionen Jahrestonnen (2013) geschätzt – das entspricht gut 6% des Weltmineralölverbrauchs in Höhe von knapp 4.200 Millionen Tonnen.

Die größten Flüssiggasproduzenten sind vor allem Länder mit hoher Erdgasförderung oder hoher Raffinerieerzeugung. Der mit Abstand größte Flüssiggasproduzent sind die USA mit rund 60 Millionen Jahrestonnen; in den USA fallen substantielle LPG-Mengen bei der Förderung unkonventioneller Erdgase an. Den USA folgen Öl- und Gasproduzenten des Mittleren Ostens, China und Russland.

Ein Großteil der Flüssiggasproduktion wird vor Ort verbraucht, sodass die größten Produzenten meist auch zu den größten Flüssiggasverbrauchern gehören, namentlich die USA, China und Saudi-Arabien. Knapp ein Drittel der globalen Flüssiggasproduktion wird exportiert – insbesondere aus dem Mittleren Osten, zunehmend aber auch aus Nordamerika nach Europa und vor allem Asien. Unter den asiatischen Energiemärkten gehören Japan, Indien, Thailand und Südkorea mit zu den größten Flüssiggaskonsumenten.

11 FLÜSSIGGAS- UND ROHÖLPREISE



Flüssiggas ist ähnlich wie Rohöl oder andere Mineralölprodukte ein international gehandeltes Produkt (Commodity), welches auf Spotmärkten und an Warenterminbörsen gehandelt wird. Der wichtigste Handelsplatz für Flüssiggas in Europa ist der Rotterdam Spotmarkt.

Die Rotterdamer Großhandelspreise für Propan (C₃) und Butan (C₄) orientieren sich stark am Preis für die europäische Rohöl-Leitsorte Brent. Bezogen auf den Energiegehalt liegen die Flüssiggaspreise teilweise unter, teilweise über den Rohölpreisen. Auch können die Großhandelspreise für Propan und Butan untereinander variieren. So ist Propan im Winter oftmals teurer als Butan, weil Propan dann vorwiegend als Heizgas eingesetzt wird; bei kälteren Temperaturen ist Propan auch besser als Kraftstoff nutzbar.

Eine wichtige Rolle bei der Bildung von Großhandelspreisen für Flüssiggas spielt die **Petrochemie**. Zur Herstellung petrochemischer

Zwischenprodukte (wie Ethylen und Propylen) werden Flüssiggase als Vorprodukte (Feedstocks) eingesetzt. Dabei konkurrieren Flüssiggase wiederum mit anderen Feedstocks – insbesondere mit Ethan oder Rohbenzin (Naphtha). Oftmals sind die petrochemischen Verarbeitungsanlagen (Cracker) inzwischen in der Lage, unterschiedliche Feedstocks je nach Verfügbarkeit und relativen Feedstockpreisen zu nutzen. Von den fast 500 Millionen Tonnen petrochemischer Feedstocks weltweit entfallen heute gut 60 Millionen Tonnen auf Flüssiggase; die Hälfte dagegen auf Naphtha und gut ein Viertel auf Ethan (IEA 2014).

Die Großhandelspreise von Flüssiggasen hängen folglich auch von den jeweiligen Ethan- und Naphtha-Preisen ab. Während in der europäischen Petrochemie vorwiegend Naphtha als Feedstock eingesetzt wird, nutzen die USA vor allem Ethan. In den USA fallen große Mengen Ethan bei der Erdgasförderung an. Folglich ist Ethan in den USA

deutlich günstiger als Rohbenzin in Europa. Da Ethan ähnlich wie verflüssigtes Erdgas (LNG) jedoch schwerer zu exportieren ist als Flüssiggas, nahmen in der jüngeren Vergangenheit stattdessen die Flüssiggasexporte aus den USA zu (IEA 2014).

Die Petrochemie beansprucht etwa ein Viertel des globalen Flüssiggasangebotes. Noch mehr, nämlich fast die Hälfte des globalen Flüssiggasangebotes, wird vom Haushaltssektor für Kochen und Heizen verwendet. Der Verkehrssektor steht dagegen nur für rund ein Zehntel des weltweiten Flüssiggasverbrauchs.

Allerdings unterscheidet sich die sektorale Verbrauchsstruktur von Flüssiggas in den einzelnen Weltregionen zum Teil recht deutlich. Während Flüssiggas in Nordamerika sowie im Mittleren Osten vor allem in der Petrochemie eingesetzt wird, dominiert in Lateinamerika, Asien und vor allem in Afrika der Haushaltssektor. In Europa verteilt sich der Flüssiggasverbrauch hingegen relativ gleichmäßig auf die Sektoren Haushalte, Verkehr und Chemie. Verkehrsanwendungen von Flüssiggas (Autogas) erfolgen hauptsächlich in Asien und Europa.

Die Endverbraucherpreise für Flüssiggasprodukte, insbesondere für den Haushalts- und Verkehrssektor, werden stark von lokalen und regionalen Angebots- und Nachfragefaktoren beeinflusst. Bei der Verwendung von Flüssiggas als Energieerzeugnis, das heißt als Kraft- oder Brennstoff, spielt zudem die jeweilige nationale Energiesteuer oftmals eine wichtige Rolle.

2.3 FLÜSSIGGAS IN DEUTSCHLAND

In Deutschland wurden 2013 rund 3,4 Millionen Tonnen Flüssiggas abgesetzt. Dabei wurden in den deutschen Raffinerien rund 2,6 Millionen Tonnen Flüssiggas aus Rohöl produziert. Seit der Jahrtausendwende ist die inländische Flüssiggaserzeugung von gut drei Millionen Tonnen um knapp 500.000 Tonnen gesunken.

Aus der inländischen Flüssiggaserzeugung geht etwa ein Zehntel in den Export; allerdings haben sich die Flüssiggasexporte aus Deutschland in den letzten fünf Jahren etwa halbiert. Die Flüssiggasimporte sind seit 2000 um rund 50% auf rund eine Million Tonnen Flüssiggas gestiegen; die eingeführten Flüssiggasmengen stammen hauptsächlich aus

Belgien, den Niederlanden und Norwegen (BAFA 2014; MWV 2014).

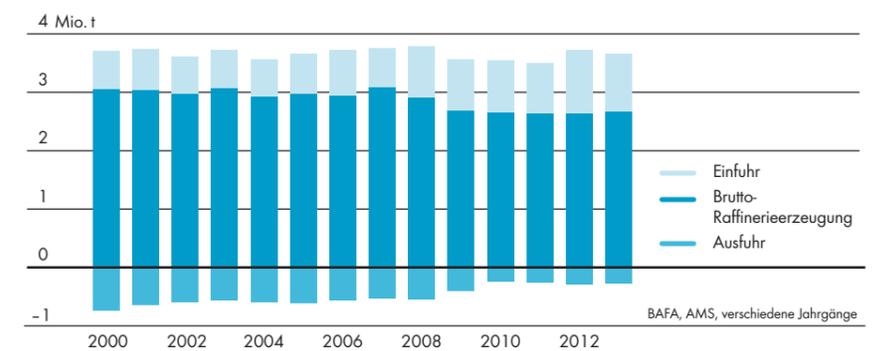
Trotz rückläufiger inländischer Raffinerieerzeugung stieg der Flüssiggasverbrauch seit 2000 relativ stetig um mehr als 20% an. Ein wichtiger Verbraucher ist die chemische Industrie, die ihren Flüssiggaseinsatz seit 2000 deutlich um etwa zwei Fünftel erhöht hat.

Neben der Petrochemie ist die wichtigste Verwendung von Flüssiggas in Deutschland die Bereitstellung von Energie. Aus der Energiesteuerstatistik ergibt sich, dass in Deutschland (2013) rund 1,8 Millionen Tonnen Flüssiggas als Energieerzeugnisse versteuert wurden; im Jahre 2000 waren es nur gut 1,4 Millionen Tonnen. Zwei Drittel des Flüssiggases für

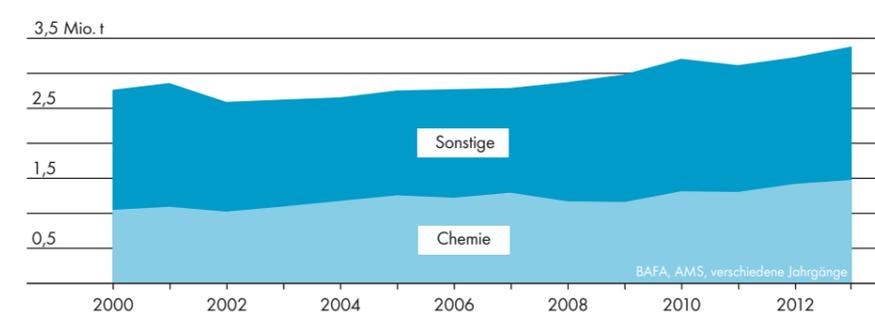
Energiezwecke wurden (gemäß §2 Absatz 3 EnergieStG) hauptsächlich zum Verheizen eingesetzt; ein Drittel bzw. 618.000 Tonnen (gemäß §2 Absatz 2 EnergieStG) für Verkehrszwecke (Destatis 2014).

Tatsächlich hat sich der Autogaskonsum in Deutschland seit Mitte des letzten Jahrzehnts fast vervierfacht. Unter den alternativen Kraftstoffen ist Flüssiggas damit hinter Biokraftstoffen der zweitwichtigste Kraftstoff im Straßenverkehr. Allerdings ist – ähnlich zu Biokraftstoffen – auch bei Flüssiggas eine gewisse Marktsättigung zu erkennen, und zwar bei 600.000 Tonnen. Zum jüngsten Absatzrückgang von Autogas im Jahre 2014 dürften schließlich rückläufige Rohöl- und Kraftstoffpreise beigetragen haben.

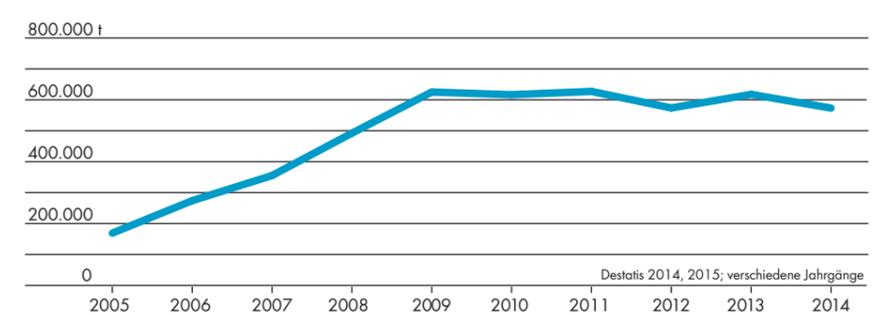
12 FLÜSSIGGAS-AUFKOMMEN IN DEUTSCHLAND



13 FLÜSSIGGAS-NACHFRAGE IN DEUTSCHLAND



14 AUTOGAS-ABSATZ IN DEUTSCHLAND





Für den Umgang mit Flüssiggasen gibt es, ähnlich wie für andere Produkte, eine Vielzahl von technischen Regeln, die Anforderungen an Produkte, Verfahren und Stoffe festlegen. Sie dienen der Sicherheit, dem Umweltschutz sowie der Qualitätssicherung von Produkten und halten allgemein anerkannte Regeln der Technik, den Stand der Technik und den Stand von Wissenschaft und Technik fest (HWK-München 2014).

Zu den technischen Regeln gehören auch Normen, die teilweise auch Standards genannt und von Standardisierungs- bzw. Normungsorganisationen herausgegeben werden. Technische Regeln und Normen haben grundsätzlich Empfehlungscharakter; sie sind somit allein keine rechtsverbindlichen und zwangsläufig anzuwendenden Vorschriften. Im Hinblick auf Produktbeschaffenheit, Produktsicherheit und Produkthaftung kommt ihnen jedoch eine große Bedeutung zu; dabei können sie als Maßstab für einwandfreies technisches Verhalten herangezogen werden. Zudem schreiben Anlagen-, Geräte- oder Fahrzeughersteller oftmals die Einhaltung bestimmter Normen vor und verankern diese in den jeweiligen Produktdatenblättern mit Bezug auf die Betriebssicherheit. Das gilt auch für Flüssiggas, insbesondere bei der Verwendung als Brenn- und Kraftstoff.

Verbindlich sind Normen immer dann, wenn Vertragsparteien oder der Gesetzgeber auf Normen Bezug nehmen – zum Beispiel definiert die deutsche Kraftstoffqualitätsverordnung Anforderungen an Flüssiggas als Kraftstoff unter Bezugnahme auf die Kraftstoffnorm DIN EN 589.

Grundsätzlich kann zwischen allgemeinen technischen Regeln und Normen für das Produkt Flüssiggas, speziellen Normen für

Flüssiggas als Kraftstoff und schließlich technischen Regeln für den Umgang mit Flüssiggas als Gefahrstoffen unterschieden werden. Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) werden vom Bundesamt für Arbeitsschutz und Medizin herausgegeben; diese werden im Folgenden nicht weiter behandelt.

3.1 INTERNATIONALE FLÜSSIGGAS-STANDARDS

Die wichtigsten internationalen Normungsorganisationen sind die International Standardisation Organisation (ISO) in Genf, ASTM International (American Society for Testing and Materials) in Washington sowie für die Europäische Union das Comité Européen de Normalisation (CEN) in Brüssel. Internationale Standards spielen vor allem für den grenzüberschreitenden Handel und Einsatz von Produkten (wie Flüssiggas) eine wichtige Rolle; europäische Standards sind dagegen in der Regel in nationale Normen umzusetzen, gegebenenfalls durch Anpassung oder gar den Rückzug entsprechender nationaler Normen.

Die ISO hat in Bezug auf Flüssiggas zwei Produktnormen verabschiedet: ISO 8216-3: 1987 nimmt eine Klassifikation von Flüssiggasen in der Gruppe ölbasierter Brenn- und Kraftstoffe (Petroleum Fuels) vor; ISO

9162:2013 enthält dagegen technische Produktspezifikationen für Flüssiggase. Die ISO Flüssiggasstandards zielen in erster Linie auf den internationalen Flüssiggashandel ab (IEA/AMF 2008), aber sie formulieren keine Standards für die unterschiedlichen Produktanwendungen von Flüssiggasen.

Der amerikanische Standard ASTM D1835 – 13 unterscheidet vier Kategorien von Flüssiggasprodukten: handelsübliches Propan, Propen, Butan und deren Gemische für den häuslichen, gewerblichen und industriellen Einsatz zu Heizzwecken sowie als Kraftstoff. Flüssiggaskraftstoff besteht in den USA hauptsächlich aus Propan, wobei je nach Propan-, Propen-, Butan- und Butengehalt variierende Qualitäten unterschieden werden.

Die wichtigste Kraftstoffqualität ist so genanntes HD-5 (Heavy Duty-5 %) – ein Flüssiggas, das mindestens 90 % Propan und maximal 5 % Propylen sowie bis zu 5 % Butan und Ethan enthalten darf. HD-5 hat einen hohen Propananteil, damit es sich durch seine guten Dampfdruckeigenschaften in geografischen Regionen mit saisonal niedrigen Umgebungstemperaturen als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren eignet.

Die Worldwide Fuel Charter der Automobilverbände setzt sich zwar die weltweite Harmonisierung von Kraftstoffqualitäten zum Ziel, macht aber keinerlei Aussagen zu gasförmigen Kraftstoffen und damit auch nicht zu Flüssiggas (WFCC 2013). Folglich kommen bei der Anwendung im Kraftverkehr regionale oder nationale Normen zur Anwendung. Die europäische Norm EN 589 bestimmt ausschließlich Anforderungen an LPG für den Einsatz als Kraftstoff in Kraftfahrzeugen; sie ist als europäische Norm auch in Deutschland umgesetzt. Für andere, nicht-automobile Anwendungen liegen bislang keine europäischen LPG-Standards vor. Hier muss daher Bezug auf nationale Standards genommen werden.

3.2 FLÜSSIGGAS-STANDARDS FÜR DEUTSCHLAND

Die wichtigsten deutschen regelgebenden Organisationen im Hinblick auf Flüssiggas sind das DIN (Deutsches Institut für Normung), die DVGW (Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfachs e.V.) sowie der DVG (Deutscher Verband Flüssiggas e.V.). Anforderungen an Flüssiggasanlagen werden durch die

Technischen Regeln Flüssiggas 2012 (TRF) aus den geltenden Vorschriften und Normen zusammengefasst und umgesetzt. Die Technischen Regeln Flüssiggas (TRF 2012) gelten für die Planung, Errichtung, Instandhaltung und Änderung sowie für die Prüfung von Anlagen, die mit Flüssiggas betrieben werden.

Die Technischen Regeln erfassen Flüssiggas-Versorgungsanlagen mit Flüssiggasflaschen oder einem ortsfesten Flüssiggasbehälter mit weniger als 3 Tonnen Fassungsvermögen (einschließlich eventuell notwendiger Behälter-Füllleitungen) und Betrieb aus der Gasphase oder Flüssiggas-Verbrauchsanlagen (unabhängig von der Behältergröße) in Gebäuden und auf Grundstücken (DVGW/DVGW-TRF 2012).

Qualitätsanforderungen für gasförmige Brennstoffe (Brenngase) ergeben sich aus der DVGW Technischen Regel – Arbeitsblatt G 260 (A) 2013. Die Technische Regel G 260 kommt allerdings nur dann zur Anwendung, wenn Flüssiggas in der öffentlichen Gasversorgung (zur allgemeinen Verwendung, insbesondere zur Wärmeversorgung) eingesetzt wird.

In der öffentlichen Gasversorgung werden Brenngase mit weitgehend übereinstimmenden Brenneigenschaften in Gasfamilien

zusammengefasst, um so eine annähernd gleichmäßige Wärmebelastung von Gasgeräten und damit Austauschbarkeit von Gasen zu gewährleisten. Die Flüssiggase Propan und Butan sowie deren Gemische werden aufgrund ihrer ähnlichen Eigenschaften – wie Dichte, Brennwert oder Wobbe-Index – in der dritten Gasfamilie zusammengefasst. Zur Einstellung gewünschter brenntechnischer Eigenschaften können Flüssiggase auch zur Konditionierung von Gasen der zweiten Gasfamilie (methanreiche Gase, insbesondere Erdgas und Biogas) in begrenztem Umfang eingesetzt werden.

Allgemeine Qualitätsanforderungen für Flüssiggase (Propan, Propen, Butan, Buten und deren Gemische) legt DIN 51622 (1985) fest. Der Einsatz von LPG als Kraftstoff wird von der DIN EN 589:2008 geregelt, die von der deutschen Normungsinstitution als nationale Norm übernommen wurde. DIN EN 589 ist durch die deutsche Kraftstoffqualitätsverordnung (10. Bundesimmissionsschutzverordnung) für LPG als Kraftstoff verbindlich anzuwenden.

Die Qualität ebenso wie die Zusammensetzung von Flüssiggasen kann – je nach Herkunft und Aufbereitung – schwanken; gleichzeitig gibt es sehr unterschiedliche Anwendungen für Flüssiggase. Um dennoch

einen technisch sicheren Einsatz von Flüssiggasen in Haushalt, Gewerbe, Industrie sowie im Straßenverkehr zu gewährleisten, legen die aufgeführten Standards für die Anwendung von Flüssiggasen bestimmte Anforderungen und Eigenschaften fest.

Standardisierte Brenn- und Kraftstoffe erlauben technisch optimierte Nutzungstechnologien (Gasbrenner oder Fahrzeugantriebe). Entsprechend formuliert, können sie auch zur Wirtschaftlichkeit sowie zum Gesundheits- und Umweltschutz – durch geringere Verbrennungsemissionen – beitragen. Neben der Zusammensetzung legen technische Anforderungen Produkteigenschaften fest, limitieren (unerwünschte) Verunreinigungen und bestimmen relevante Prüf- und Testverfahren. Die Inhalte einer Norm und ihr Umfang sind abhängig vom Anwendungsbereich.

Die untenstehende Tabelle gibt eine Übersicht wichtiger Flüssiggas-Produkt-Normen und zeigt für welche Anwendungen diese von Relevanz sind.

3.3 NORMIERTE EIGENSCHAFTEN UND PRÜFMETHODEN

Flüssiggasstandards definieren die Zusammensetzung von LPG durch Festsetzen von Mindest- und Höchstanteilen von Komponenten

15 WICHTIGE FLÜSSIGGAS-STANDARDS

Technische Bezeichnung	Norm	Land	Anwendungsbereiche
Flüssiggase Propan, Propen, Butan, Buten und deren Gemische	DIN 51622	DE	<ul style="list-style-type: none"> ■ Brenngas für Haushalt, Gewerbe und Industrie ■ Herstellung von Gasen der öffentlichen Gasversorgung ■ Kraftstoff für Verbrennungsmotoren ■ Grundstoff für die chemische Weiterverarbeitung
Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Flüssiggas – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 589	DIN EN 589	EU (D)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kraftfahrzeuge (LPG, en: Liquefied Petroleum Gas) ■ Die Norm gilt für Flüssiggas zum Betrieb von Fahrzeugen, die für den Betrieb mit diesem Kraftstoff ausgerüstet sind
Petroleum products – Fuels (Class F) – Liquefied petroleum gases Specifications	ISO 9162	Global	Handelsübliche Flüssiggase und maßgeblich bestehend aus: <ul style="list-style-type: none"> ■ Propan/Propen (ISO-F-LP) ■ Butan/Buten (ISO-F-LB)
Petroleum products – Fuels (Class F) – Classification	ISO 8216-3	Global	Handelsübliche Flüssiggase und maßgeblich bestehend aus: <ul style="list-style-type: none"> ■ Propan/Propen (ISO-F-LP) ■ Butan/Buten (ISO-F-LB)
Standard Specification for Liquefied Petroleum (LP) Gases	ASTM D1835 – 13	USA	<ul style="list-style-type: none"> ■ Brenngas für Haushalt, Gewerbe und Industrie ■ Kraftstoff für Verbrennungsmotoren

ten oder indirekt über physikalisch-chemische Eigenschaften.

Grundsätzlich setzt sich Flüssiggas über alle Standards hauptsächlich aus gesättigten C₃- und C₄-Kohlenwasserstoffen bzw. den Alkanen Propan und Butan zusammen. Der Anteil höherer Alkane (C₅₊) und Alkene (Olefine/Diene) wird in der Regel auf bestimmte Höchstanteile begrenzt. So legt etwa die deutsche Grundnorm für Flüssiggase (DIN 51622) Mindest- bzw. Höchstanteile für die Hauptbestandteile Propan, Propen, Butan und Buten fest. Brenngase für Haushalt und Gewerbe nach DIN 51622 dürfen nicht mehr als 60 Gew.-% Butan enthalten, da es einen niedrigeren Dampfdruck als Propan aufweist, daher im Winter schwieriger in die Gasphase zu überführen ist als Propan und sich zudem schlechter vom Tank zum Brenner fördern lässt.

Zu den in nationalen und internationalen Normen definierten wichtigsten chemisch-physikalischen Eigenschaften von Flüssiggasen gehören die **Dichte**, der **Dampfdruck** und die **Volatilität**. Für Flüssiggas als Brenngas werden zudem der Heiz- bzw. Brennwert sowie der Wobbe-Index angegeben, für Kraftstoffe (Autogas) die Oktanzahl.

Die **Dichte** ist definiert als Masse eines Stoffvolumens, etwa in kg/m³. Die Dichte eines Brenn- oder Kraftstoffes ist wichtig für Transport und Lagerung, aber auch für dessen Verbrennung. Je höher der Kohlenstoffanteil eines Brenn- oder Kraftstoffes, desto höher die Dichte. So ist Butan schwerer als Propan.

Eine steigende Dichte von Flüssiggasen führt prinzipiell zu höherem volumetrischen Energiegehalt und damit sinkendem volumetrischem Verbrauch. Anders als für Otto- und Dieselmotoren ist die Dichte von Flüssiggas als Brenn- oder Kraftstoff nicht definiert. Die ISO 9162 ebenso wie ASTM 1835 sehen allerdings die Angabe der Dichte bei 15 °C vor.

Der **Dampfdruck** ist der Druck, der sich in einem geschlossenen Behälter in Abhängigkeit von der Temperatur durch das Verdampfen einer Flüssigkeit einstellt. Der Dampfdruck eines Brenn- bzw. Kraftstoffes beeinflusst – zusammen mit Kraftstoffflüchtigkeitskriterien (**Volatilität**) – den Brenner- und Motorbetrieb sowie das Emissionsverhalten.

Dampfdruck und Volatilitätskriterien können auch die Zusammensetzung eines Brenn- oder Kraftstoffgemisches stark bestimmen – wie etwa in den internationalen LPG-Normen ASTM 1835-3 oder in ISO 9162:2013. Ein hoher Dampfdruck ist wichtig für guten Kaltstart bei niedrigen Temperaturen wie auch für einwandfreies Beschleunigen bei kalten Motoren. Auf der anderen Seite erfordern die Begrenzung der Verdampfungsverluste und problemfreier Heißstart und heißer Fahrbetrieb die Begrenzung des Dampfdrucks. Die genormten Dampfdruckbereiche stellen folglich einen Kompromiss verschiedener Anforderungskriterien dar. Bei Flüssiggas kann der Dampfdruck durch das Mischungsverhältnis von Propan zu Butan eingestellt werden; je höher der Propananteil, desto höher der Dampfdruck.

Für motorische Anwendungen gilt in Deutschland gemäß der DIN EN 589 im Winter ein Mindestdampfdruck von 1,5 bar bei –5 °C sowie im Sommer von 1,5 bar bei 20 °C. Für allgemeine Anwendungen wird keine Sommer- und Winterware unterschieden. So wird der Dampfdruck gemäß DIN 51622 auf 3,1 bar (Propan) bzw. 1,3 bar (Butan) begrenzt.

Die **Flüchtigkeit** eines Stoffes beschreibt seine Neigung zur Verdampfung und wird durch seinen Siedeverlauf und Dampfdruck bestimmt. Flüssiggase mit hohen Propankonzentrationen sind auch bei niedrigen Temperaturen sehr flüchtig, was einerseits eine einfache Förderung mittels Dampfdruck des Flüssiggases ermöglicht. Andererseits muss bei der Lagerung in Tanks berücksichtigt werden, dass sich hier ein hoher Dampfdruck bei Propan aufbauen kann, der beispielsweise bei 30 °C etwa 11 bar beträgt.

Der **Wobbe-Index**, ein wichtiger Parameter für gasförmige Kraft- und Brennstoffe, ist abhängig von deren Zusammensetzung und dient zur Charakterisierung ihrer Qualität und Austauschbarkeit. Der Wobbe-Index (W) berechnet sich aus dem volumetrischen Heizwert H_v und der Quadratwurzel aus dem Dichteverhältnis der Brennstoffdichte zur Dichte der Luft:

$$W = H_v \sqrt{\frac{\text{Dichte Brennstoff}}{\text{Dichte Luft}}}$$

Das Dichteverhältnis wird als spezifische Dichte bezeichnet und hat keine Einheit. Daher hat der Wobbe-Index die gleiche Einheit

wie der volumetrische Heizwert H_v (GJ/m³). Gasförmige Kraftstoffe mit gleichem Wobbe-Index können im Motor oder in Heizungssystemen mit gleichem Lambda (Massenverhältnis Luft zu Brennstoff) verbrannt werden und ergeben die gleiche Leistung. Soll etwa Erdgas (CH₄) durch ein Propan/Butan-Gemisch ersetzt werden, ist es nicht ausreichend eine Mischung mit gleichem Heizwert zu erzeugen. Da dieses Gemisch eine andere Dichte hätte, würde durch den Motor oder Brenner eine andere Gasmenge strömen und sich dadurch eine andere Leistung ergeben (Richards 2014).

Unter der **Klopffestigkeit** versteht man den Widerstand von flüssigen Ottokraftstoffen gegen eine unkontrollierte Verbrennung. Diese unkontrollierte Verbrennung wird als klopfende Verbrennung bezeichnet, wobei sie sehr schnell abläuft, zu einem Druckanstieg im Zylinder führt und Motorschäden zur Folge haben kann.

Die Klopffestigkeit eines Ottokraftstoffes wird mit der **Oktanzahl** beschrieben. Je höher die Oktanzahl ist, desto klopffester ist der Kraftstoff. Dem sehr klopffesten iso-Oktan (Trimethylpentan) wird die Oktanzahl 100, dem sehr klopfreudigen n-Heptan die Oktanzahl 0 zugeordnet. Grund dafür ist, dass das n-Heptan unkontrolliert schon beim Verdichtungsvorgang durch die Verdichtungswärme im Zylinder zündet, was als „Klopfen“ wahrgenommen wird. Iso-Oktan kann relativ stark verdichtet werden, ohne dass es zur Selbstzündung kommt. Durch eine stärkere Verdichtung kann der Wirkungsgrad des Motors erhöht und damit die Leistung gesteigert werden. ROZ (Research-Oktanzahl) nennt man die nach der Research-Methode bestimmte Oktanzahl. Sie kann als maßgeblich für das Beschleunigungsklopfen angesehen werden. MOZ (Motor-Oktanzahl) nennt man die nach der Motor-Methode bestimmte Oktanzahl. Sie beschreibt vorwiegend die Eigenschaften hinsichtlich des Hochgeschwindigkeitsklopfens. Die MOZ-Werte sind niedriger als die ROZ-Werte, Ottokraftstoffe müssen mindestens eine ROZ von 95 und eine MOZ von 85 aufweisen (DIN EN 228: 2014, Bosch 2014).

Auch für gasförmige Kraftstoffe ist die Klopffestigkeit eine wichtige Kenngröße, die oft mittels ROZ oder MOZ bestimmt wird, obwohl sie für flüssige Kraftstoffe entwickelt

wurden. Die ASTM hat einen Standard zur Messung der MOZ von Flüssiggasen erstellt (ASTM D 2623). Erdgase und Flüssiggase weisen meist eine hohe Klopffestigkeit auf, die je nach Zusammensetzung bei Erdgas zwischen 120 bis 130 ROZ und bei Flüssiggas (Autogas) zwischen 103 und 111 ROZ liegt. Daher ist einerseits ihre Neigung zur unkontrollierten Selbstzündung beim Verdichtungsvorgang im Zylinder geringer als bei handelsüblichen Ottokraftstoffen, andererseits ermöglichen hohe ROZ-Werte eine stärkere Verdichtung und Erhöhung des Wirkungsgrads des Motors.

Schließlich wird in verschiedenen LPG-Produktnormen der Anteil unerwünschter bzw. verunreinigender Stoffe (auch **Gasbegleitstoffe**) begrenzt; dazu gehören etwa (schwere) Rückstände, Diene (ungesättigte Kohlenwasserstoffe mit zwei Kohlenstoff-Doppelbindungen, C=C), Schwefel, Schwefel-

wasserstoff oder Wasser. Rückstände können zu **Ablagerungen** führen; Schwefelbestandteile können Dichtungen und Leitungen mit **Kupferelementen** schädigen und zu erhöhten Abgasemissionen führen. Flüssiggas sollte möglichst frei von ungelöstem Wasser sein. Die Ablagerungsbildung wird mittels der Bestimmung des Abdampfdruckstandes nach EN 15470/EN 15741 und die Korrosionswirkung auf Kupfer mittels EN ISO 6251 überprüft.

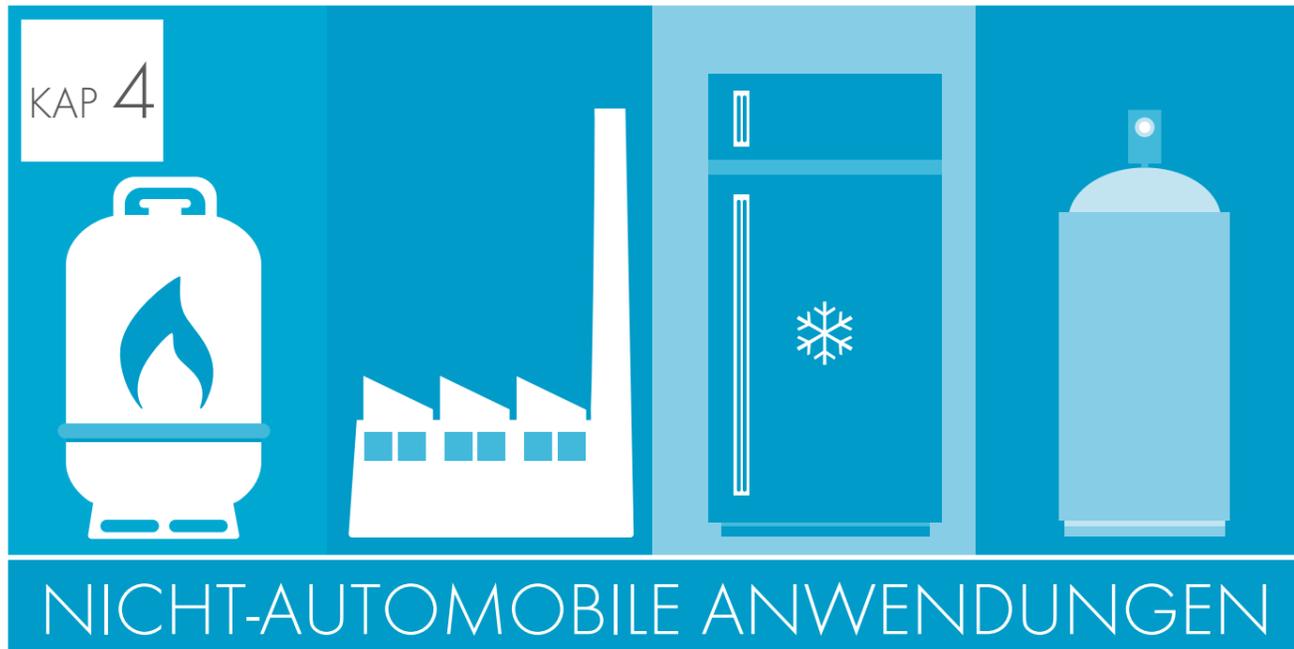
Da Flüssiggase in Mischung mit Luft im Konzentrationsbereich von 1,8 bis 9,4 Vol.-% zünden (Butan: 1,8 bis 8,4 und Propan 2,1 bis 9,4 Vol.-%), müssen Flüssiggase einen charakteristischen Geruch besitzen. Aus Sicherheitsgründen werden Gase mit Geruchsstoffen (wie Schwefel) versetzt. Die Technik und die Kontrolle der **Odorierung** sind im DVGW-Arbeitsblatt G 280-1 geregelt (Buderus 2002, DVGW 2012).

Nicht normiert sind dagegen **Additive**, die LPG (je nach Verwendung) aus Sicherheits- oder Qualitätsgründen zugesetzt werden; dazu zählen Duftstoffe, Frostschutz oder so genannte Performance-Additive, die von Herstellern zur Einstellung bestimmter Eigenschaften, beispielsweise zur Verringerung des Ventilverschleißes bei Ottomotoren, angeboten werden. Ebenfalls nicht normiert in LPG-Produktstandards werden produktionsbezogene Eigenschaften, insbesondere nicht die Treibhausgasemissionen.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Anforderungen und Prüfverfahren von Flüssiggas als Kraftstoff für Kraftfahrzeuge am Beispiel der DIN EN 589:2008+A1:2012. Je nach Anwendung sind bestimmte Grenzwerte vorgegeben. Die Eigenschaften in der Tabelle (außer die Klopffestigkeit) stellen auch die wichtigsten Eigenschaften für andere Anwendungen dar.

16 AUTOGAS-KRAFTSTOFFNORM DIN EN 589

Eigenschaft	Einheit	Grenzwerte		Anwendungsbereiche
		Min	Max	
Dampfdruck bei 40 °C	kPa (100 kPa = 1 bar)		1550	EN ISO 4256 oder EN ISO 8973
Klopffestigkeit, MOZ (Motor-Oktanzahl)	-	89,0		Verfahren zur Berechnung der Motor-Oktanzahl (MOZ) von Flüssiggas aus der chemischen Zusammensetzung (nach Anhang A der DIN EN 589)
Korrosionswirkung auf Kupfer (1 h bei 40 °C)	Korrosionsgrad	Klasse 1		EN ISO 6251
Abdampfdruckstand	mg/kg		60	EN 15470 oder EN 15471
Geruch	-	Unangenehm und spezifisch bei 20% der unteren Entflammbarkeitsgrenze		Bestimmung des Geruches von Flüssiggas (nach Anhang A der DIN EN 589)
Gasbegleitstoffe				
■ Gesamtgehalt an Dienen (einschließlich 1,3-Butadien)	Mol%		0,5	EN 27941
■ Schwefelwasserstoff	-	Nicht nachweisbar		EN ISO 8819
■ Gesamtschwefelgehalt (nach Odorierung)	mg/kg		50	ASTM D 3246 oder ASTM D 6667
■ Wassergehalt	-	bestanden		EN 15469



Flüssiggase werden für viele Anwendungen, in unterschiedlichen Verbrauchssektoren sowie in nahezu allen Weltregionen genutzt. Allein in Deutschland nutzen rund vier Millionen Verbraucher Flüssiggas (DVFG 2014).

Als Energieträger werden Flüssiggase zum Kochen, zur Wärmeerzeugung für Arbeitsprozesse, zum Heizen von Wohnungen (und Warmwasser) sowie als Kraftstoff für Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotor bis hin zur Kleinstanwendung in Feuerzeugen verwendet. Oftmals spielt die Möglichkeit einer flexiblen und mobilen Energieversorgung eine entscheidende Rolle. So können Flüssiggase auch an Standorten, die nicht an öffentliche Energienetze angebunden sind oder in Landschafts- und Wasserschutzgebieten liegen, eingesetzt werden.

Nicht-energetisch finden Flüssiggase als Kühlmittel (z.B. für Kühlschränke oder Klimaanlage) sowie als Treibmittel (etwa für Sprühdosen) Verwendung. Außerdem werden Flüssiggase als Vorprodukte in der Petrochemie stofflich genutzt.

Im Folgenden werden die wichtigsten nicht-automobilen Anwendungen von Flüssiggas behandelt; die anschließenden Kapitel 5 bis 8 befassen sich dann ausführlich mit Autogas im Verkehrssektor.



Im Haushalt wird Flüssiggas in erster Linie zum Kochen und Heizen sowie zur Warmwasserversorgung eingesetzt. In Deutschland findet das Kochen mit Flüssiggas zwar zum Teil in Großküchen und mobilen Küchen Anwendung, im Haushalt ist es aber nur wenig verbreitet.

In Südeuropa und vielen anderen Ländern der Welt dagegen, insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern, wird Flüssiggas häufig und mit steigender Tendenz als Brennstoff zum Kochen und zur Warmwassererzeugung in Wohnräumen verwendet (World Bank 2011). Dem stehen über drei Milliarden Menschen gegenüber, die hauptsächlich

traditionelle biogene Festbrennstoffe wie Holz, Pflanzenrückstände, Torf, Tierdung und mancherorts auch Kohle zum Kochen und Heizen nutzen. Dabei werden vielfach ineffiziente Technologien – vor allem offene Feuerstellen mit oft nur unzureichender Belüftung und Abgasabführung – eingesetzt, verbunden mit hohen Emissionen und entsprechenden gesundheitlichen Risiken. Der Wechsel zu einem emissionsärmeren Brennstoff kann hier schnell die Situation verbessern. Im Vergleich zu traditioneller Biomasse stellt Flüssiggas für viele Haushalte in Entwicklungsländern eine effiziente, saubere und fortschrittliche Energieform dar (IEA 2006).

Im Jahr 2011 haben die Vereinten Nationen die Initiative Sustainable Energy for All (Nachhaltige Energie für alle) gestartet. Ziel ist es unter anderem, bis zum Jahr 2030 allen Menschen einen Zugang zu modernen Energien zu verschaffen (UN 2015).

Dazu gehören nicht nur Strom, sondern insbesondere auch der Zugang zu emissionsarmen Energieträgern für sauberes und nachhaltigeres Kochen und Heizen. Zusammen mit technisch optimierten Kochöfen könnten emissionsärmere und effizientere Brennstoffe wie Flüssiggas, Kerosin oder Erd- und Biogas in vielen Schwellenländern eine wichtige Rolle als Übergangsbrennstoffe in eine nachhaltigere Energiezukunft einnehmen – bei vergleichsweise niedrigen gesamtwirtschaftlichen Kosten und ebenfalls nur geringen Auswirkungen auf die globale Öl- und Gasnachfrage (IEA 2006, World Bank 2011).

Flüssiggasanlagen zur (direkten) Wärmeversorgung werden in Haushalten, Gewerbe und Handel, im Freizeitbereich oder als Notfallversorgung genutzt. Zudem kann Flüssiggas in Block-Heizkraftwerken (BHKW), die gleichzeitig Strom und Wärme produzieren, oder auch in der öffentlichen Gasversorgung



LPG als Brennstoff zum Kochen im Senegal

(als Beimischung in das Erdgasnetz oder als primäres Brenngas in lokalen Versorgungsnetzen) verwendet werden.

In Deutschland gibt es rund 430.000 Tankgasendverbraucher (DVFG 2014). Es ist davon auszugehen, dass diese in der Regel Flüssiggas als Brennstoff zum Heizen verwenden. Im Vergleich dazu betreiben die deutschen Haushalte rund 20,5 Millionen zentrale Wärmeerzeuger, darunter 13,1 Millionen Gasheizungen (BDH 2014). Tankgasendverbraucher, die mit Flüssiggas heizen, haben also nur einen geringen Anteil an der Gesamtzahl der Gasheizungen.

Da Flüssiggas im Gegensatz zu Erdgas kein leitungsgebundener Energieträger und nicht auf Gebäudestandorte mit Netzanschluss angewiesen ist, kann es zur Wärmeversorgung überall dort eingesetzt werden, wo dies durch leitungsgebundene Energieträger nicht möglich ist. So ist Flüssiggas zum Beispiel im ländlichen Raum eine zusätzliche Alternative zu anderen leitungsungebundenen Energieträgern wie Heizöl und Holzpellets. Als Brennstoff ähnelt Flüssiggas weitgehend dem Erdgas.

Bei Heizungsanlagen, die mit Flüssiggas oder Erdgas betrieben werden, gibt es unterschiedliche Anlagentechniken. Am weitesten verbreitet im Anlagenbestand sind immer noch Niedertemperaturkessel, die den Heizwert ihres jeweiligen Brennstoffs nutzen. Stand der

Technik bei Gasheizungen ist jedoch Brennwertechnik. Brennwertheizungen nutzen auch die im Abgas enthaltene Wärme, was einen Effizienzvorteil von gut 10% gegenüber Niedertemperaturheizungen bringen kann. Damit erreichen Brennwertheizungen einen Wirkungsgrad von fast 100%.

Bei der Lagerung von Flüssiggas ist zwischen mobil einsetzbaren Flüssiggasflaschen und ortsfest aufgestellten Flüssiggastanks zu unterscheiden. Flüssiggas wird auch als mobile Energie bzw. Energie zum Mitnehmen bezeichnet, weil es durch Flüssiggasflaschen für unterschiedlichste Zwecke mobil nutzbar ist. Handelsübliche Flaschen sind mit Inhaltsmengen von 5 kg, 11 kg (Kleinflaschen) und 33 kg (Großflasche) erhältlich. In Deutschland befinden sich rund 6,5 Millionen Flüssiggasflaschen im Umlauf, die sowohl für gewerbliche als auch für Freizeit Zwecke, wie zum Beispiel Camping, genutzt werden (DVFG 2014).

Flüssiggas zum Heizen wird in eigens dafür aufgestellten Flüssiggastanks mit einer im Vergleich zu Flaschen deutlich höheren Kapazität gelagert. Die Tankgröße orientiert sich in erster Linie am voraussichtlichen Jahresverbrauch der Nutzer, da der Tank in der Regel nur einmal pro Jahr gefüllt wird. Daher gibt es Tanks in sehr verschiedenen Größen, die von ca. 900 Litern bis zu ca. 6.500 Litern reichen.

Flüssiggasbehälter für den Hausbrand können oberirdisch oder unterirdisch außerhalb



Auslieferung von LPG-Flaschen in Colombo, Sri Lanka

des Gebäudes aufgestellte Tanks sein. Eine unterirdische Lagerung hat den Vorteil, dass der Tank nicht sichtbar ist und bei begrenzt verfügbaren Flächen platzsparend installiert werden kann. Allerdings sind damit zusätzliche Kosten verbunden. Bei der oberirdischen Installation wird nur eine Betonplatte als Fundament für den sicheren Stand der Tanks benötigt.

Bei Aufstellung und Betrieb von Flüssiggasanlagen sowie bei Transport und Lagerung von Flüssiggas in Tanks oder in Flaschen sind die Technischen Regeln Flüssiggas zu beachten. Sie fassen alle aktuellen anerkannten Regeln der Technik und flüssiggasspezifischen Anforderungen an das Inverkehrbringen, Errichten und Betreiben von Flüssiggasanlagen aus den geltenden Vorschriften und Normen zusammen und setzen diese um. Sie dienen vor allem dazu, einen sicheren Umgang mit Flüssiggas und der Flüssiggastechnik zu gewährleisten.

So ist beispielsweise bei Flüssiggastanks unter anderem ein Sicherheitsbereich von ca. drei Metern rund um den Tank vorgeschrieben. In diesem Bereich dürfen sich weder Zündquellen noch brennbare Stoffe und keine offenen Fenster, Kelleröffnungen oder Kanaleinläufe befinden. Der Flüssiggastank ist alle zwei Jahre einer Prüfung durch zugelassene Überwachungsstellen, wie z.B. den TÜV, zu unterziehen (DVFG/DVGW-TRF 2012).

FLÜSSIGGAS ALS KÜHLMITTEL

Als Treib- und Kältemittel wurden bis in die 1990er Jahre hauptsächlich halogenierte Kohlenwasserstoffe (FCKW) eingesetzt, die zwar nicht direkt giftig oder brennbar sind, aber stark zum Abbau der Ozonschicht und aufgrund ihres hohen Treibhauseffektes zur Erderwärmung beitragen. Nach ihrem Verbot im Jahre 1995 kamen andere Einsatzstoffe als Treib- und Kältemittel zum Einsatz, für die sich wegen ihrer Eigenschaften prinzipiell auch Flüssiggase eignen (LANUV 2009).

Seitdem sind die Flüssiggase Propan und iso-Butan als Kältemittel für Klimaanlage und Kühlschränke eingesetzt worden; beide Gase weisen im Vergleich zu FCKW ein sehr niedriges Treibhauspotenzial auf und tragen nicht zum Abbau der Ozonschicht bei, sie sind allerdings brennbar. In Kühl- und Gefrierschränken mit typischen Kältemittel-Füllmengen wird seit 1997 überwiegend iso-Butan eingesetzt, die Füllmengen betragen bei modernen Geräten bis zu 50 Gramm (LANUV 2009).

Flüssiggase können auch eine Alternative zum Kältemittel Tetrafluorethan darstellen, das zum Teil heute noch in Autoklimaanlagen eingesetzt wird; im Vergleich zu 1,1,1,2-Tetrafluorethan, das ein 1.430 mal höheres Global Warming Potential als Kohlendioxid hat, weisen Flüssiggase mit GWP 1,8 bis 4 ein relativ niedriges Treibhauspotenzial auf (Forster et al. 2007).

So fahren in Australien inzwischen über eine Million Autos, deren Klimaanlagen mit einem Gemisch aus Propan und iso-Butan betrieben werden. In den USA ist dagegen der Einsatz von Flüssiggasen als Kühlmittel in Fahrzeugklimaanlagen verboten, weil sie wegen ihrer leichten Entflammbarkeit, etwa bei einem Unfall, ein Sicherheitsrisiko für die Fahrzeuginsassen sein können (UBA 2010).

In Europa gibt es seit Januar 2011 gemäß der EU-Richtlinie 2006/40/EG ein Verbot fluorierter Kältemittel mit einem Treibhauspotenzial über GWP 150 in Klimaanlagen neuer Pkw, das stufenweise bis 2017 umgesetzt wird. Als mögliche alternative Kältemittel werden Flüssiggase allerdings nicht diskutiert.

FLÜSSIGGAS ALS TREIBMITTEL

Darüber hinaus wird Flüssiggas auch als Treibgas für Sprühdosen eingesetzt. Mit Sprühdosen können Flüssigkeiten wie Haarspray, Insektizide, Farbe, Möbelpolitur, Rostlöser oder auch Schuhpflege durch Druck auf einen Sprühknopf fein dosiert, oft als Aerosol oder Schaum, verteilt werden.

Der Inhalt der Dosen wird unter Druck abgefüllt, und häufig werden Gemische aus Propan, n-Butan und iso-Butan oder Dimethylether als Treibgase verwendet. Ihr Vorteil besteht darin, dass sich durch ihre Verflüssigung bei geringem Druck ihr Volumen in der Spraydose stark verringert und dadurch mehr Raum für einen höheren Nutzinhalt des eigentlichen Produkts in der Dose zur Verfügung steht.

Ein Teil des Flüssiggases ist dabei im Produkt gelöst und ein zweiter Teil liegt gasförmig als Druckpolster über dem Produkt-Treibmittelgemisch. Weil das Flüssiggas bestrebt ist, wieder in die Gasphase überzugehen, drückt der Dampfdruck des Flüssiggases beim Betätigen des Sprühknopfes den Inhalt durch das Ventil nach außen. Treibgase sollen auch bei einer Mischung mit dem Produkt in der Spraydose keine chemischen Reaktionen eingehen. Ihr Nachteil ist, dass sie hochentflammbar sind und mit Luft brennbare Gemische bilden können (IGA 2015).

FLÜSSIGGASE IN DER PETROCHEMIE

Flüssiggase finden schließlich auch eine stoffliche Verwendung in der chemischen Industrie. Mit der Herstellung von chemischen (Primär)Produkten aus geeigneten Gas- und Ölfractionen befasst sich insbesondere die Petrochemie (auch Petrolchemie bzw. früher Erdölchemie). Sie ist nicht nur Teilgebiet der Chemie, sondern auch Bindeglied zwischen der Öl- und Gasförderung bzw. deren Auf- und Verarbeitung auf der einen und der chemischen Produktion auf der anderen Seite. In der Petrochemie werden länger- oder kürzerkettige Kohlenwasserstoffe mit Hilfe von

Hitze, Druck und Wasserdampf in Steamcrackern thermisch aufgespalten (Dampfspaltung). Zu den wichtigsten Ausgangsstoffen (Feedstocks) der Petrochemie gehören neben Ethan, Rohbenzin (Naphtha) oder Gasölen auch Flüssiggase.

Die Wahl des Feedstocks hängt zum einen von der Verfügbarkeit, vom Preis und von der gewünschten Produktpalette ab; dabei bestimmt der Feedstock das Outputspektrum wesentlich mit. Zum anderen beeinflusst die Anlagenkonfiguration des Steamcrackers die Feedstockwahl maßgeblich. Oftmals ist der Cracker auf die Eigenschaften eines bestimmten Feedstocks zugeschnitten. Allerdings sind Petrochemie-Anlagen zunehmend flexibler bei der Feedstock-Auswahl (Multi-Feed-Fähigkeit). Der wichtigste Feedstock petrochemischer Anlagen in Westeuropa ist Rohbenzin, teilweise aber auch Flüssiggase. Die Petrochemie in Nordamerika nutzt dagegen vorwiegend leichte Feedstocks (Ethan und Flüssiggase).

Die bedeutendsten Wertprodukte der Petrochemie sind Olefine (Ethylene, Propylene und C₄-Kohlenwasserstoffe) und Aromaten (Benzol, Toluol, Xylen). Aus Ethylen und Propylen werden – mit Hilfe von Polymerisation (Polyethylen, Polypropylen) – alle möglichen Arten von Kunststoffen, die in vielen Endprodukten Verwendung finden, hergestellt; zum Beispiel Plastikflaschen, CDs/DVDs, Laufschuhe, Sportbekleidung oder Kaugummi. Weitere Endprodukte auf Basis petrochemischer Vorprodukte sind Lösungsmittel, Farben und Pflanzenschutzmittel.

Die Nachfrage nach petrochemischen Produkten ist in der Vergangenheit weltweit meist stärker als das Bruttoinlandsprodukt gewachsen. Aufgrund der anhaltend hohen Nachfrage nach aller Art von Kunststoffen wird die Nachfrage nach Petrochemie-Erzeugnissen trotz zunehmenden Recyclings voraussichtlich weiter wachsen. Die Internationale Energieagentur rechnet daher damit, dass der Verbrauch von Flüssiggasen am stärksten in der Petrochemie zulegen wird – noch vor den Sektoren Verkehr und Gebäuden (IEA 2013). Die bedeutendsten Petrochemie-Standorte sind heute die USA, der Mittlere Osten und China. Schwerpunkte der petrochemischen Erzeugung in Deutschland liegen hauptsächlich am Rhein sowie in den Chemieregionen Bayerns und Ostdeutschlands.



In verbrennungsbasierten Antriebssystemen (Verbrennungsmotoren, Turbinen) können neben den flüssigen Kraftstoffen wie Benzin, Diesel oder Kerosin – nach motortechnischen Modifikationen – auch gasförmige Kraftstoffe eingesetzt werden. Somit stellt auch das Flüssiggasgemisch LPG eine Kraftstoff-Alternative für Verkehrsmittel mit Verbrennungsmotor dar.

Aufgrund großer Unterschiede zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln und Fahrzeugtypen hinsichtlich Einsatzprofil, technischer Ausgestaltung oder Kosten für Fahrzeuganschaffung und -betrieb unterscheiden sich auch die jeweiligen Einsatzpotenziale von LPG. Technisch verbreitet sind Flüssiggasantriebe bei landgebundenen Verkehrsmitteln, insbesondere im motorisierten Straßenverkehr (Autogas). Technisch möglich, aber (noch) keine oder kaum Anwendung findet Flüssiggas hingegen außerhalb des Straßenverkehrs.

Im Folgenden werden zunächst die Anwendungspotenziale flüssiggasbasierter Antriebe bei Flugzeugen, Schiffen und Schienenfahrzeugen (Non-Road) diskutiert. Schwerpunktmäßig werden anschließend die Anwendungen im Straßenverkehr, insbesondere bei Pkw sowie leichten Nutzfahrzeugen, betrachtet.

17 LPG-ANWENDUNGSPOTENZIALE NACH VERKEHRSMITTEL

Kriterien	Pkw	Nfz		Bahn	Schiff	Flugzeug
		Leicht (Otto/Diesel)	Schwer (Diesel)			
Verfügbarkeit technischer Lösungen	++	++ / ○	○	○	○	--
Integrationsaufwand Energiewandler	++	++ / ○	--	--	--	--
Integrationsaufwand Speichersystem	++	++	--	○	-- (++)*	--
Infrastrukturverfügbarkeit	++	++	++	--	○	--

++ Hohe Eignung ○ Eingeschränkte Eignung -- Keine Eignung *LPG Transportschiffe

5.1 POTENZIALE NON-ROAD

Die Einsetzeignung von LPG in den verschiedenen Verkehrsmitteln ist maßgeblich durch die prinzipielle technische Eignung und die Verfügbarkeit einer verkehrsmittelbezogenen Betankungsinfrastruktur bestimmt.

Zu den Bewertungskriterien der Einsetzeignung gehört die Verfügbarkeit einer technischen Lösung, also ob für ein Verkehrsmittel ein ausgereiftes LPG-Antriebssystem angeboten wird; für den Straßenverkehr ist das in der Regel der Fall, für Non-Road-Anwendungen dagegen weniger.

Ob ein solches System tatsächlich eingesetzt wird, hängt dann davon ab, ob der Integrationsaufwand für den Energiewandler und das Tanksystem technisch-wirtschaftlich vertretbar ist. So sind für schwere Nutzfahrzeuge (mit Dieselantrieb) technische Lösungen zum Einsatz von LPG in Dieselmotoren verfügbar, allerdings sind weitere motorische Maßnahmen zur Integration erforderlich. Zudem beansprucht das Speichersystem mehr Raum und reduziert durch sein höheres Eigengewicht die Nutzlast. Zusätzlich zu den technischen Eigenschaften muss eine ausreichende infrastrukturelle Versorgungsqualität geboten werden, um einen problemlosen Einsatz von LPG zu ermöglichen; dies ist für LPG bislang allenfalls im Straßenverkehr der Fall.

Zunächst werden die wichtigsten Entwicklungen für LPG-Verkehrsanwendungen außerhalb des Straßenverkehrs (Non-Road) diskutiert. Einen Überblick über die Anwendungspotenziale von LPG in unterschiedlichen Verkehrsmitteln gibt Tabelle 17.

SCHIENE



Im Schienenverkehr werden in Deutschland über 20.000 Triebfahrzeuge (Lokomotiven, Triebwagen) eingesetzt, die überwiegend Elektrotraktion nutzen. Der übrige Schienenverkehr wird mit Dieselloks erbracht, die handelsüblichen Dieselmotoren nutzen. So entfielen 2011 in Deutschland nur 8 % der Betriebsleistungen in Zugkilometern aller Züge bzw. Loks auf den Dieselantrieb (ifeu 2012).

Dabei müssen neu motorisierte bzw. zugelassene Schienentriebfahrzeuge mit Verbrennungsmotor die immer schärferen Abgasgrenzwerte der EU-Verordnung 97/68/EG für mobile Maschinen und Geräte (EU-KOM 2012a) einhalten. Die seit 2014 geltenden Abgasgrenzwerte der Stufe IV haben sich inzwischen den Abgasgrenzwerten der EU-Richtlinie 2005/55/EG Stufe Euro VI für Lkw und Sattelzugmaschinen angenähert – sind also nur noch mit Hilfe moderner Abgasreinigungstechnik zu erreichen.

Im Schienenverkehr wurde mit LPG als Alternative zur Dieseltraktion bisher lediglich in einem Forschungsprojekt mit einer LPG-betriebenen Lokomotive (monovalent) für den Einsatz im Werks-, Rangier- und leichten Streckenbetrieb experimentiert. Leistung und Reichweite der LPG-Lokomotive schränken ihr Einsatzspektrum deutlich ein. Es ergaben sich geringe Emissionsminderungen und nur begrenzte ökonomische Vorteile im Vergleich zu einem Dieselantrieb (Vossloh 2014).

Der Einsatz von Gasantrieben ist prinzipiell technisch möglich, LPG spielt in den Überlegungen der Hersteller und Schienenverkehrsunternehmen aber keine große Rolle, zumal gasbetriebene Lokomotiven in der Emissionsgesetzgebung für Non-Road-Fahrzeuge gegenwärtig Dieselmotoren nur gleich-, aber nicht bessergestellt sind (EU-KOM 2012a).

Zur Verbesserung der Luftqualität und zur CO₂-Reduktion der nicht-elektrifizierten Lokomotiven ist in Deutschland/Europa stattdessen die Effizienzsteigerung bei konventionellen Dieselantrieben mittels Hybridisierung

plus strikterer Abgasemissionsvorgaben der priorisierte Hebel (InnoZ 2010, BMVBS 2013); in Nordamerika werden – vor allem aus ökonomischen Gründen – dagegen große Potenziale für verflüssigtes Erdgas im Schienengüterverkehr gesehen (EIA 2014).

SCHIFFFAHRT



In der kommerziellen Seeschifffahrt werden vorwiegend langsamlaufende, mit Schwer- bzw. Bunkeröl betriebene Zweitaktmotoren verwendet, in kleineren Frachtschiffen und im küstennahen Verkehr (z.B. Passagierschiffe) hingegen mittelschnelllaufende, mit Marinedieselmotoren betriebene 4-Takt-Motoren. Schweröl macht dabei ca. 80 bis 85 % des weltweiten Treibstoffverbrauches der in der Seeschifffahrt eingesetzten Handelsflotten aus (DNV GL 2014). In der Binnenschifffahrt kommen schnelllaufende Dieselmotoren zum Einsatz; seit 2011 ist für die Binnenschifffahrt der Einsatz schwefelfreier Dieselmotoren Pflicht (EP/Rat 2009b).

Zentrale Anforderungen für Antriebe und Treibstoffe in der Seeschifffahrt sind einerseits wirtschaftliche Betrachtungen. Andererseits üben legislative Rahmenbedingungen zur Verbesserung der Luftqualität zunehmend Wirkung auf Schiffsantriebe und -treibstoffe aus. So schreibt das Internationale Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe (MARPOL) der UN-Schiff-fahrtsorganisation IMO in Anhang VI seit 2005 unter anderem eine Begrenzung des Schwefelgehalts im Schiffskraftstoff vor. Für neue Schiffsmotoren gelten zudem verschärfte NO_x-Grenzwerte, auch werden in vielen Häfen die Anforderungen an den lokalen Emissionsausstoß zunehmend verschärft (IMO 2008, EU-KOM 2012b).

Bislang wird Flüssiggas in der Handelsschifffahrt von (wenigen) Spezialschiffen für den Transport von Flüssiggas (Gas Carrier) genutzt (Rolls Royce 2012). Als technisches Konzept für den Einsatz von LPG in Schiffsmotoren sind Dual-Fuel-Motoren verfügbar (MAN 2014). Diese laufen im Dual-Fuel-Betrieb, also mit Bunkeröl bzw. Marinediesel und LPG, wobei erstere (Anteil ca. 5 bis 10%)

als Pilotkraftstoff zur Sicherstellung einer effektiven Zündung genutzt werden. LPG-Motoren weisen insbesondere gegenüber Schweröl ein hohes Reduktionspotenzial sowohl bei den Treibhausgasemissionen als auch bei den Luftschadstoffen (NO_x, Partikel und SO_x bis 95%) auf (MAN 2015).

Aufgrund seiner relativ niedrigen Treibstoffkosten dürfte Bunkeröl – künftig mit niedrigerem Schwefelgehalt oder kombiniert mit Abgaswaschanlagen (Scrubber) – auch weiterhin der wichtigste Treibstoff in der Seeschifffahrt bleiben. Große Einsatzpotenziale werden jedoch auch für verflüssigtes Erdgas (LNG) als alternativer, gasförmiger Kraftstoff gesehen (DNV GL 2014).

Als möglichen Treiber für den Einsatz gasförmiger Treibstoffe in der Binnen- und küstennahen Schifffahrt sieht die derzeit als Vorschlag formulierte, zur Einführung ab 2021 geplante Änderung der Non-Road-Emissionsgesetzgebung (Stufe V) für Gasantriebe abweichende Emissionsvorschriften mit leicht höheren Grenzwerten für Kohlenwasserstoffe (HC) vor (EU-KOM 2014a). Als alternativer Kraftstoff wird in der Binnen- und küstennahen Schifffahrt allerdings ebenfalls verflüssigtes Erdgas (LNG) in Dual-Fuel-Schiffsantrieben präferiert und gefördert (Wartsilä 2014).

LUFTVERKEHR



Die kommerzielle Luftfahrt setzt (fast) ausschließlich auf Turbinentriebwerke und einen weltweit (nahezu) einheitlichen flüssigen Treibstoff: Flugturbinentriebstoff bzw. Kerosin. Lediglich Sport- und Kleinflugzeuge werden von Hubkolbenmotoren angetrieben und nutzen Flugbenzin, einen hochoktanigen Ottokraftstoff.

Flugturbinenkraftstoff und Flugbenzin haben beide für die Luftfahrt günstige Qualitätseigenschaften; dazu gehört insbesondere eine hohe Energie- und Speicherdichte, aber auch andere Eigenschaften wie das Kälteverhalten, welches für den Betrieb in großen Höhen (Stratosphäre) sehr wichtig ist.

Flüssiggas weist insbesondere gegenüber Flugturbinentriebstoff eine geringere Energiedichte auf. Das Handling von Gaskraftstoffen

ist in der Luftfahrt deutlich aufwändiger. Das Mehrgewicht der Tanktechnik reduziert die Nutzlast. Schließlich stellt die fehlende „drop-in“-Fähigkeit, also die Möglichkeit zur Kraftstoffnutzung in bestehender Infrastruktur und Flugzeugen, einen gravierenden Nachteil dar.

Entsprechend steht die Entwicklung von LPG-Antriebssystemen in der Luftfahrt aktuell nicht im Fokus. Als mittelfristige Alternativen forscht die Luftfahrtindustrie an flüssigen synthetischen Ersatzkraftstoffen aus Biomasse oder Erdgas zur Nutzung in konventionellen oder leicht angepassten Turbinenantrieben (MTU 2012). In der langfristigen Planung spielt dabei die Entkopplung von konventionellen Versorgungspfaden – etwa durch biogene Flugtreibstoffe – eine große Rolle, was auch in der EU-Strategie für alternative Kraftstoffe formuliert ist (EU-KOM 2011).

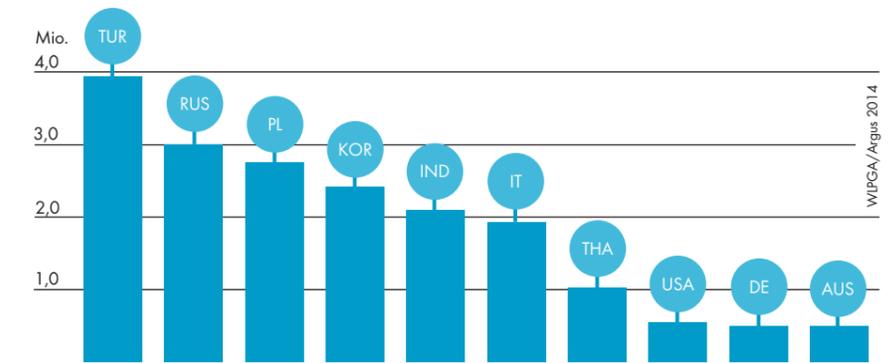
5.2 KRAFTFAHRZEUGE

Die mit Abstand wichtigste Anwendung von Flüssiggasantrieben im Verkehrssektor ist diejenige in verbrennungsmotorischen Kraftfahrzeugen, also im Straßenverkehr. Weltweit wird die Zahl der LPG-Fahrzeuge (2013) auf 16,7 Millionen Fahrzeuge beziffert (WLP-GA/Argus 2014). Die Art der LPG-Kraftfahrzeuge reicht von leichten Zweirädern bis hin zu schweren Nutzfahrzeugen. Eine einheitliche internationale statistische Differenzierung liegt allerdings nicht vor; teilweise müssen die LPG-Bestandszahlen geschätzt werden.

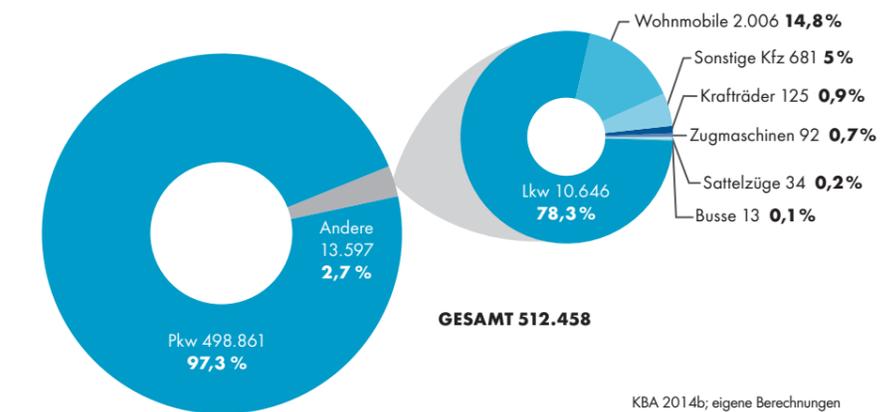
International konzentriert sich der Einsatz von Autogas-Fahrzeugen stark auf Europa und Asien. Die größten Autogas-Flotten in der EU werden in Polen und Italien – vor Deutschland – betrieben (vgl. Abb. 18). Außerhalb der EU sind die größten Autogas-Fahrzeugbestände in der Türkei, in Osteuropa und Russland, in Amerika hauptsächlich in den USA, im asiatischen Raum in Südkorea, Indien, Thailand und in Australien zu finden. In den meisten Nachbarstaaten Deutschlands fahren ebenfalls Autogas-Fahrzeuge. In Österreich und der Schweiz sowie insbesondere in Skandinavien sind allerdings nur wenige LPG-Fahrzeuge unterwegs.

In Deutschland waren von den rund 53 Millionen zugelassenen Kraftfahrzeugen im Jahre 2014 512.000 Kraftfahrzeuge mit Flüssiggasantrieb ausgestattet (KBA 2014b). Über 97% aller LPG-Fahrzeuge sind Pkw. Außer

18 GRÖSSTE LPG-FAHRZEUGFLOTTEN NACH LÄNDERN 2013



19 LPG-FAHRZEUGBESTAND IN DEUTSCHLAND 2014



KBA 2014b; eigene Berechnungen

in Pkw kommt Flüssiggas nur noch in Lkw mit über 10.000 Einheiten sowie in Wohnmobilen mit etwa 2.000 Einheiten in nennenswerten Stückzahlen zum Einsatz (vgl. Abb. 19).

Bei den Lkw weisen zudem nur sehr wenige Fahrzeuge eine Nutzlast von mehr als 2 Tonnen auf. Da bei leichten Nutzfahrzeugen oftmals ein Pkw-ähnlicher Antriebsstrang verbaut wird, zeigt sich die geringe Relevanz von spezifischen technischen LPG-Lösungen für mittelschwere und schwere Nutzfahrzeuge (Lkw, Sattelzüge und Busse). Neben Pkw und Nutzfahrzeugen finden sich darüber hinaus weitere Fahrzeuge mit LPG-Antrieb in Nischenanwendungen, z.B. bei Baumaschinen oder Flurförderzeugen (Gabelstapler). Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich vor allem auf Pkw-Anwendungen.

Im Gegensatz zum Gesamtbestand ist für LPG-Pkw und LPG-Nutzfahrzeuge nicht der Neufahrzeug-, sondern der Nachrüstmarkt von besonderer Relevanz. Nur 10 bis 20% (Pkw) und 20 bis 35% (Nfz) des

Bestandwachstums in den letzten Jahren lässt sich auf erstausgerüstete LPG-Fahrzeuge zurückführen, also auf bereits ab Werk mit einem LPG-Antrieb ausgestattete Fahrzeuge. Die große Mehrheit der Fahrzeuge wird entsprechend erst später auf LPG-Betrieb umgerüstet.

PKW

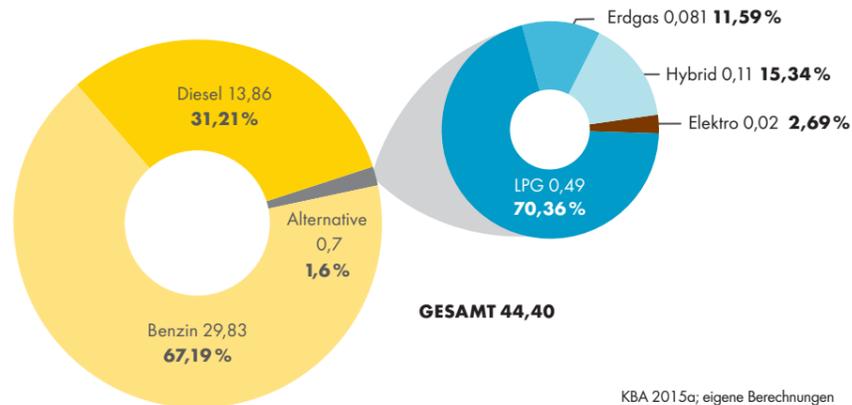


Pkw-Anwendungen sind für Flüssiggasantriebe von herausragender Bedeutung. Mit einem Bestandsanteil von 1,1 % sind Autogas-Pkw in Deutschland noch deutlich vor Hybrid-, Erdgas- und Elektrofahrzeugen der wichtigste alternative Pkw-Antrieb (KBA 2015a). Mit rund einer halben Million Autogas-Pkw sowie 29,8 Millionen Benzin-Pkw sind in Deutschland in Summe 30,3 Millionen Pkw oder über zwei Drittel aller Pkw mit Ottomotor zugelassen (vgl. Abb. 20).

LPG-Fahrzeugsysteme basieren auf dem Prinzip der fremdgezündeten, innermotorischen Verbrennung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches (Otto-Prinzip). Die Erstausrüstungs- oder Nachrüstsysteme können monovalent (nur Autogasbetrieb) oder bivalent (wahlweise Benzin- oder Autogasbetrieb) ausgelegt sein. Bivalente Systeme umfassen im Vergleich zu monovalenten Systemen zusätzliche Komponenten für die Speicherung, Förderung und Gemischbildung des Kraftstoffes Benzin. Seitens der Gesetzgebung werden bivalente LPG-Fahrzeuge, deren Kraftstoffbehälter nicht mehr als 15 Liter fasst (Notbetrieb, Anlassen) trotzdem als monovalent (quasi-monovalent, monovalent-plus) behandelt. Dies bringt Vorteile zum Beispiel in der Ermittlung der Emissionsdaten im Rahmen der CO₂-Überwachung mit sich, da ausschließlich die im Gasbetrieb gemessenen Werte verwendet werden (EU-KOM 2014b).

Der überwiegende Teil der Pkw fährt mit bivalenten Systemen im Mono-Fuel-Betrieb, also mit reinem Benzin- oder reinem Autogas-Betrieb und Umschaltung zwischen beiden Kraftstoffen. Ein Einsatz von LPG in dieselmotorischen Fahrzeugen ist prinzipiell ebenfalls möglich, indem Autogas und Dieselmotorkraftstoff eingespritzt werden, oder für reinen Autogas-Betrieb ein separates System zur Fremdzündung nach dem Otto-Prinzip integriert wird. Dies führt zu einer hohen Systemkomplexität, weshalb für Diesel-Pkw keine Autogas-Umrüstung angeboten wird.

20 DEUTSCHER PKW-FAHRZEUGBESTAND NACH ANTRIEBSART 2015



KBA 2015a; eigene Berechnungen

Die Verfahren zur Gemischbildung können unterteilt werden in Gasphase- und Flüssigphase-Einblasung, wie in Abb. 21 dargestellt.

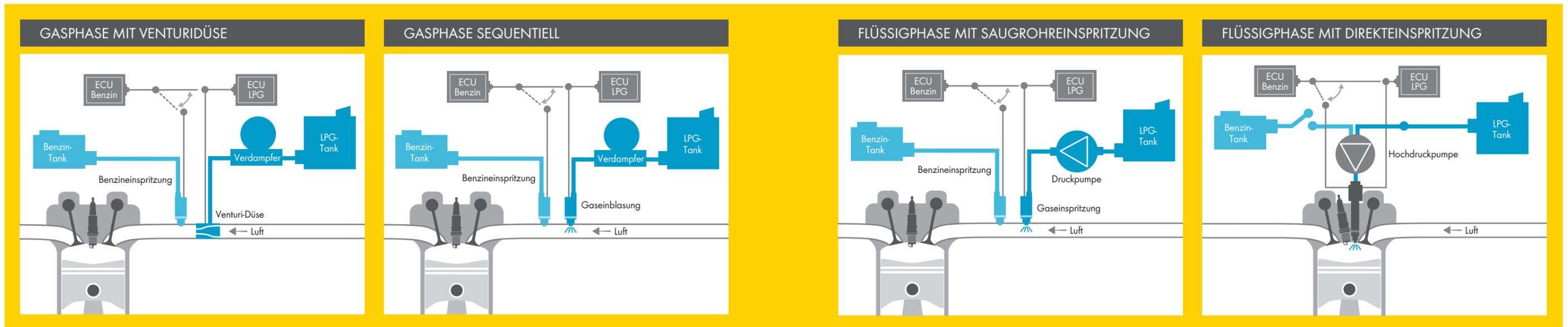
Gasphase-Systeme nutzen Venturi-Düsen mit optimierter Geometrie zur homogenen Durchmischung im Luftansaugtrakt oder sequentielle Systeme mit Gasverteilerdüsen zur Gemischbildung, während Flüssigphase-Systeme Saugrohr- oder Direkt-Einspritzdüsen verwenden.

Systeme mit Gasphase-Einblasung werden für Fahrzeuge der Schadstoffstufungen bis Euro 2 (Venturi-Düse) bzw. Euro 5 (sequentiell) angeboten, so dass mit solchen Systemen ein Großteil der auf dem Markt befindlichen Fahrzeuge umgerüstet werden kann. Systeme mit Venturi-Düsen weisen wegen der Saug-

rohrverengung im Betrieb zusätzlich einen Leistungsverlust auf.

Systeme mit Flüssigphase-Einspritzung weisen keinen Verdampfer auf, das Autogas wird mittels Hochdruckpumpe und Druckregler über modifizierte Einspritzdüsen eingespritzt. Da das im Saugrohr verdampfende Autogas die Ansaugluft abkühlt, erreichen Motoren mit solchen Anlagen eine höhere (energetische) Zylinderfüllung und damit eine höhere Motorleistung im Vergleich zur Gaseinblasung. Da durch die Abkühlung prinzipiell auch die Gefahr einer Vereisung besteht, welche durch optimale Systemauslegung vermindert werden kann, eignen sich Flüssigphase-Systeme vorrangig für Autogas-Anlagen, die ab Werk integriert werden. Seit 2014 sind auch einzelne Fahrzeuge mit Direkteinspritzsystemen

21 SCHEMATISCHER AUFBAU VON AUTOGAS-SYSTEMEN



22 AUTOGAS-SYSTEME FÜR PKW IM ÜBERBLICK

System	Ab Werk	Umrüstung			
		bivalent	monovalent		
Flüssigphase	Direkteinspritzung	Neu seit 2014 (Euro 6)	Nicht in Europa	Verfügbar	Nicht verfügbar
	Saugrohr	Verfügbar (Euro 5)		Verfügbar (Euro 5)	
Gasphase	Direkteinspritzung	Nicht verfügbar		Nicht verfügbar	
	Saugrohr	Verfügbar (auch Euro 6)		Verfügbar (auch Euro 6)	

verfügbar, welche Autogas direkt in den Brennraum einspritzen. Hierzu wird das bereits vorhandene Benzineinspritzsystem verwendet, wobei die Hochdruckpumpe bei Bedarf modifiziert wird.

Die Nachrüstung von Euro 6-Fahrzeugen ist im Hinblick auf die gestiegenen Anforderungen der On-Board-Diagnose (OBD) von Kraftstoffsystemen und Abgasanlage sowie die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte aufwändig, jedoch stellen die technischen Rahmenbedingungen der OBD prinzipiell keinen limitierenden Faktor dar, sofern entsprechendes Know-how im Bereich der Motorsteuerung vorhanden ist. Nachrüstsysteme für Euro 6-Fahrzeuge sind von Umrüstern mittlerweile angekündigt worden. Tabelle 22 gibt eine Übersicht der Autogas-Systeme für Pkw.

Fahrzeugtechnisch monovalente Autogas-Pkw (ohne Benzin-Zusatztank) sind in Europa derzeit nicht verfügbar.

Gespeichert wird Autogas bei einem Druck von maximal 10 bar, der Tank ist in der Regel als Stahl-Behälter (mit einer Wandstärke von 3,5 mm) ausgeführt. Die Behälter verfügen üblicherweise über ein maximales Speichervolumen von ca. 30 bis 100 l und sind entweder zylindrisch, als Unterflurtank oder passend für die Reserveradmulde geformt. Als Sicherheitsmaßnahme gegen ungewolltes Entweichen des Autogases im Falle eines Defektes oder hoher Belastungen (z.B. Crash, Fahrzeugbrand) werden Rückschlag-, Überdruck- und Temperatursicherheitsventile, ein Gasentnahmentil mit Durchflussbegrenzer sowie eine Füllbegrenzung (80% des max.

Tankvolumens) verwendet. Der Prüfdruck des Behälters ist mit 40 bar vorgeschrieben (Bosch 2014). Im Stör- oder Brandfall wird durch ein kontrolliertes Abblasen bzw. Abbrennen des Autogases eine Explosion verhindert. LPG-Fahrzeuge verfügen laut einer ADAC-Studie über das gleiche Sicherheitsniveau wie Benzin- oder Dieselfahrzeuge (ADAC 2014).

LPG-Tanks sind üblicherweise in der Reserveradmulde untergebracht, das Reserverad entfällt. Das Mehrgewicht für werksseitig verbaute Pkw-Tanksysteme liegt bei bis zu 50 kg. Die Füllanschlüsse sind bei erstausgerüsteten LPG-Fahrzeugen zusammen mit dem Benzin-Füllstutzen hinter der entsprechenden Tankklappe angeordnet, eine zusätzliche Tankanzeige informiert über den Füllstand.

Bei nachgerüsteten LPG-Systemen wird der Befüllanschluss an einer geeigneten Stelle in die Karosserie eingebracht, es wird ebenfalls eine zusätzliche Tankanzeige im Armaturenbrett integriert.

Aktuell werden in Deutschland etwa 60 Pkw-Fahrzeugmodelle von insgesamt 14 Herstellern mit werksseitigem LPG-Antriebssystem angeboten (siehe auch Abb. 27 auf S. 31). Bivalente Systeme sind in der Erstausrüstung ebenso in der deutlichen Mehrzahl wie der Einsatz von Vierzylinder-Motoren.

Nachrüstsysteme sind durchgehend bivalent ausgelegt und prinzipiell für Motoren aller gängigen Zylinderanzahlen verfügbar. Das Angebot nachzurüstender Systeme, die auf ein konkretes Fahrzeugmodell ausgelegt und hinsichtlich der spezifischen Motorsteuerung optimiert sind, umfasst die gängigsten Modelle von über 20 Herstellern. Bei den übrigen Modellen werden Standard-LPG-Umrüstkomponenten verbaut und entsprechend parametrisiert.

LKW



Bei den 2,8 Millionen Fahrzeugen des Straßengüterverkehrs (leichte Nutzfahrzeuge, Lkw und Sattelzugmaschinen) spielen Flüssiggasantriebe mit einem Anteil von deutlich unter 1 % eine deutlich kleinere Rolle als bei Pkw. Dabei konzentriert sich der Einsatz von Flüssiggasantrieben in Lkw und Sattelzügen fast ausschließlich auf den Bereich leichter Nutzfahrzeuge bzw. leichter Lkw mit einer Nutzlast von maximal zwei Tonnen (KBA 2014b).

LPG-Systeme für Lkw (im Folgenden einschließlich leichter Nutzfahrzeuge und Sattelzüge) können in Systeme für Fahrzeuge mit Ottomotoren und Systeme für Fahrzeuge mit Dieselmotoren unterteilt werden. Ottomotorische Systeme kommen dabei ausschließlich in leichten Nutzfahrzeugen (z.B. Lieferverkehr) zum Einsatz. Der Aufbau und die Funktionen sind identisch mit den Systemen in Pkw.

Auch für schwere Lkw und Sattelzüge (zulässige Gesamtmasse größer als 12 t) gibt es Möglichkeiten des LPG-Betriebs, und zwar als so genannte Dual-Fuel-Systeme. Dabei wird

Flüssiggas mittels eines Verdampfers in die Gasphase umgewandelt und über ein Eindüsystem in den Ansaugtrakt des Lkw eingeblasen. Das Luft-Gas-Gemisch wird dann zusammen mit Dieselmotorkraftstoff verbrannt. Da LPG deutlich weniger Luftschadstoffe produziert, ergibt sich für Lkw mit SCR-Betrieb (Selektive katalytische Reduktion, Reduktion von Stickoxiden im Abgas mittels Harnstoff bzw. AdBlue) auch ein geringerer AdBlue-Verbrauch (NFM 2010). Neben Steuergeräten und Eindüsystem wird ein zusätzlicher LPG-Tank für ca. 250 Liter Flüssiggas eingebaut.

Die Umrüstkosten pro Lkw bzw. Sattelzug liegen bei 5.000 bis 6.000 Euro plus Zulassungskosten. LPG wird vor allem im Teillastbetrieb eingesetzt. Je nach Fahrweise kann so bis zu einem Drittel des Dieserverbrauchs durch günstigeres Flüssiggas ersetzt werden, wodurch bei heutigen Kraftstoffpreisrelationen von Diesel und Autogas (und unter Annahme eines vergleichbaren Wirkungsgrades der Dual-Fuel-Verbrennung) eine Kraftstoffkostenersparnis von etwa 10 % erreicht werden kann (trans aktuell 2013). Das Dual-Fuel-System kann bislang in Euro V-Lkw mit AdBlue eingebaut werden, für Euro VI-Motoren laufen erste Fahrzeugtests. Da Lkw-Hersteller bei externen Eingriffen in das Motorsystem Herstellergarantien in der Regel zurücknehmen, wird zusammen mit der Umrüstung auch eine Motorbruchversicherung angeboten.

ANDERE KRAFTFAHRZEUGE



Durch die generelle Einsatzfähigkeit in Verbrennungsmotoren, die in der Erstausrüstung oder nach Umrüstung auf die spezifischen Eigenschaften des Kraftstoffes eingestellt werden, ist LPG nicht nur in Pkw und Lkw, sondern theoretisch in allen Straßenfahrzeugen einsetzbar.

Bei **Zweirädern** werden LPG-Motorroller mit Bi-Fuel-Motoren (vor allem aus China) angeboten. Zudem gibt es inzwischen auch LPG-Nachrüstlösungen für Motorräder. Bei leichten zweirädrigen Kraftfahrzeugen setzen sich jedoch Elektroroller, die lokal emissionsfreies Fahren ermöglichen, zunehmend durch. Zuletzt (2014) waren in Deutschland rund

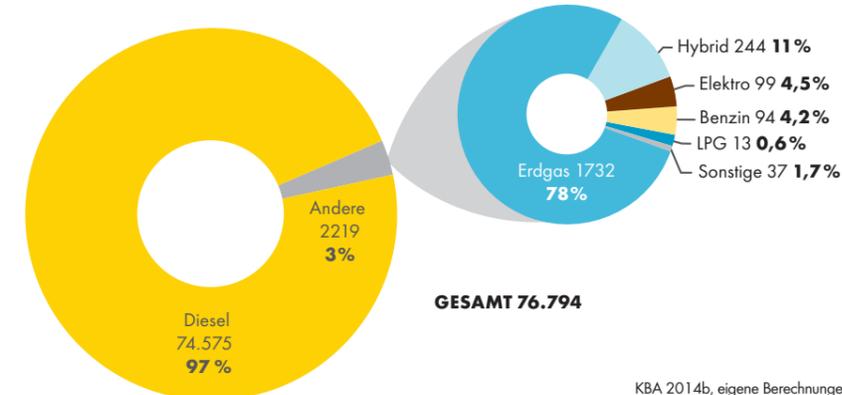
5.600 Krafträder mit Elektroantrieb, aber nur 125 mit Flüssiggasantrieb zugelassen (KBA 2014b).

Neben Zweirädern fallen auch noch drei- und vierrädrige leichte Kraftfahrzeuge in die Klasse der **Leichtkraftfahrzeuge**. In Entwicklungsländern werden Three-Wheeler, insbesondere Autorikschas (Tuk-Tuk) mit Gasantrieben als Fahrzeug zum Personen- oder Gütertransport genutzt – aus ökonomischen Gründen, aber auch zur Emissionsminderung (ICCT 2012). In der Praxis werden allerdings mehrheitlich CNG-basierte Fahrzeuge eingesetzt. In Deutschland spielen dreirädrige Kfz keine große Rolle; dreirädrige und leichte vierrädrige Kfz (Quads) machen zusammen weniger als 5 % des Kraftfahrzeugbestandes von vier Millionen Fahrzeugen in Deutschland aus (KBA 2014b).

Bei **Kraftomnibussen** ist zwischen Linienbussen und (Fern-)Reisebussen mit nahezu gegensätzlichen Nutzungsprofilen und damit unterschiedlichen Anforderungen an den Antrieb zu unterscheiden. Reisebusse weisen sehr gleichmäßige Fahrprofile mit hohem Fernstraßenanteil auf; der Alltag von Linienbussen wird von vielen Anhalte- und Anfahrvorgängen geprägt. Für Reisebusse zählt vor allem Effizienz; für Linienbusse haben lokale Luftschadstoffemissionen im städtischen Umfeld zusätzlich Relevanz. Insgesamt prägt der Dieselantrieb mit einem Anteil von ca. 97 % den Busverkehr. Der zweitwichtigste Busantrieb sind Gasantriebe, allerdings mit nur gut 2 % Anteil an der Busflotte (vgl. Abb. 23). Dabei handelt es sich fast ausschließlich um CNG-Busse mit 1.732 zugelassenen Fahrzeugen (LPG-Busse: 13) (KBA 2014b).

Schließlich gibt es noch die Fahrzeugklasse **Sonstige Kraftfahrzeuge**, darunter Sondernutzfahrzeuge wie Feuerwehr und Krankenwagen, Kommunalfahrzeuge oder auch Flurförderzeuge (v.a. Gabelstapler), mit knapp 700 zugelassenen LPG-Fahrzeugen (CNG: 486; Elektro: 273). Allerdings wird die große Mehrzahl der Flurförderzeuge nicht straßenzugelassen, sie werden in den Zulassungsstatistiken nicht erfasst. Für Flurförderzeuge sind LPG-Antriebe vor allem deshalb interessant, weil die saubere, emissionsarme Verbrennung von LPG die Nutzung in Gebäuden auch ohne aufwändige Abgasnachbehandlung ermöglicht und der LPG-Einsatz gleichzeitig ökonomisch vorteilhaft ist.

23 BUSFLOTTE NACH ANTRIEBSART 2014



KBA 2014b, eigene Berechnungen

Dabei wird nicht auf eine LPG-Tankstelleninfrastruktur zurückgegriffen, sondern es wird in der Regel der gesamte Speicherbehälter am jeweiligen Einsatzort ausgetauscht.

5.3 TECHNISCH-GESETZLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Der Einsatz von Autogas in Kraftfahrzeugen ist durch technische Normen und Richtlinien umfassend geregelt, wie Abbildung 24 zeigt. Die Regularien betreffen die Nutzung von LPG in automobilen Anwendungen, die fahrzeugtechnischen Systeme und deren Zulassung sowie den Einbauprozess in anerkannten Werkstätten. Die Normen und Richtlinien sind teilweise im EU-Recht verankert und damit für alle Mitgliedsstaaten bindend. Andere Richtlinien sind in den Zulassungsordnungen der Mitgliedsstaaten definiert, die Regelungen der jeweiligen Mitgliedsstaaten zeigen aber prinzipiell ähnliche Inhalte.

Für den Kraftstoff LPG sind sowohl die Kraftstoffqualität und deren Prüfung als auch der Umgang mit Autogas als Gefahrstoff vorgeschrieben, die Anforderungen wurden in die deutsche Kraftstoffqualitätsverordnung (§ 7 der Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen) aufgenommen. Die Gefahrstoffverordnung gibt den Umgang mit Autogas als Gefahrstoff vor und regelt die Unterrichtung und Unterweisung der Beschäftigten.

Die Typgenehmigung von Pkw mit LPG-Systemen unterscheidet OEM-ausgerüstete und nachträglich ausgerüstete Fahrzeuge (GTÜ

2014). In beiden Fällen müssen die Autogasanlage sowie ihre Ausrüstungsteile die in der Norm ECE-R 67/01 gestellten Anforderungen erfüllen. Sofern das Nachrüstsystem für den nachträglichen Einbau durch eine anerkannte Werkstatt nach ECE-R 115 zertifiziert und zugelassen ist, wird der Einbau mittels einer Gas-Systemeinbau-Prüfung (GSP) durch zertifizierte Prüfer abgenommen. Erfolgt der Einbau eines Nachrüstsystems ohne Teilgenehmigung nach ECE-R 115, erlischt mit dem Einbau für ein Fahrzeug die Betriebserlaubnis. Dann muss für das Fahrzeug ein Einzelgutachten nach §21 StVZO durch einen amtlich anerkannten Sachverständigen erstellt werden. Insbesondere die Speicherbehälter unterliegen strengen Sicherheitsvorschriften (ECE-R 67/01, §41a StVZO), welche das Genehmigungsverfahren hinsichtlich technischer Anforderungen wie Abmessungen, Werkstoffe, Herstellungsprozesse, deren Qualitätskontrolle durch den Hersteller sowie Prüfverfahren wie mechanische Prüfungen, Feuerschutzprüfungen und Aufprallprüfungen definieren.

Der Umgang beim Einbau durch anerkannte Fachwerkstätten ist in der Berufsgenossenschaftlichen Regel 157 beschrieben, die eigentliche Anerkennung der Fachwerkstatt erfolgt nach der StVZO.

5.4 AUTOGAS-TANKSTELLEN UND BETANKUNG

Neben dem LPG-Fahrzeugangebot sind Infrastruktur und Kraftstoffversorgung entscheidend für den Markterfolg eines neuen alternativen Fahrzeugantriebs. Die

24 LPG-SPEZIFISCHE TECHNISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

Kraftstoff



DIN EN 589
LPG als Kraftstoff an Tankstellen



§14 GefStoffV
Betriebsanweisung zum Umgang mit Gefahrstoffen (Flüssiggas)

Fahrzeug



ECE-R 115
Anlagenzulassung/Erstausrüstung (Prüfgase nach ECE-R83)

ECE-R 67/01

Einzelkomponentenzulassung



§19 StVZO
Erteilung & Wirksamkeit der Betriebserlaubnis

§21 StVZO

Betriebserlaubnis für Einzelfahrzeuge

§41 StVZO

Druckgasanlagen und Druckbehälter (GSP, GAP)



70/220/EWG (Pkw)
Abgasemissionsgrenzwerte
2005/78/EG (Nfz)
Abgasemissionsgrenzwerte

Werkstatt

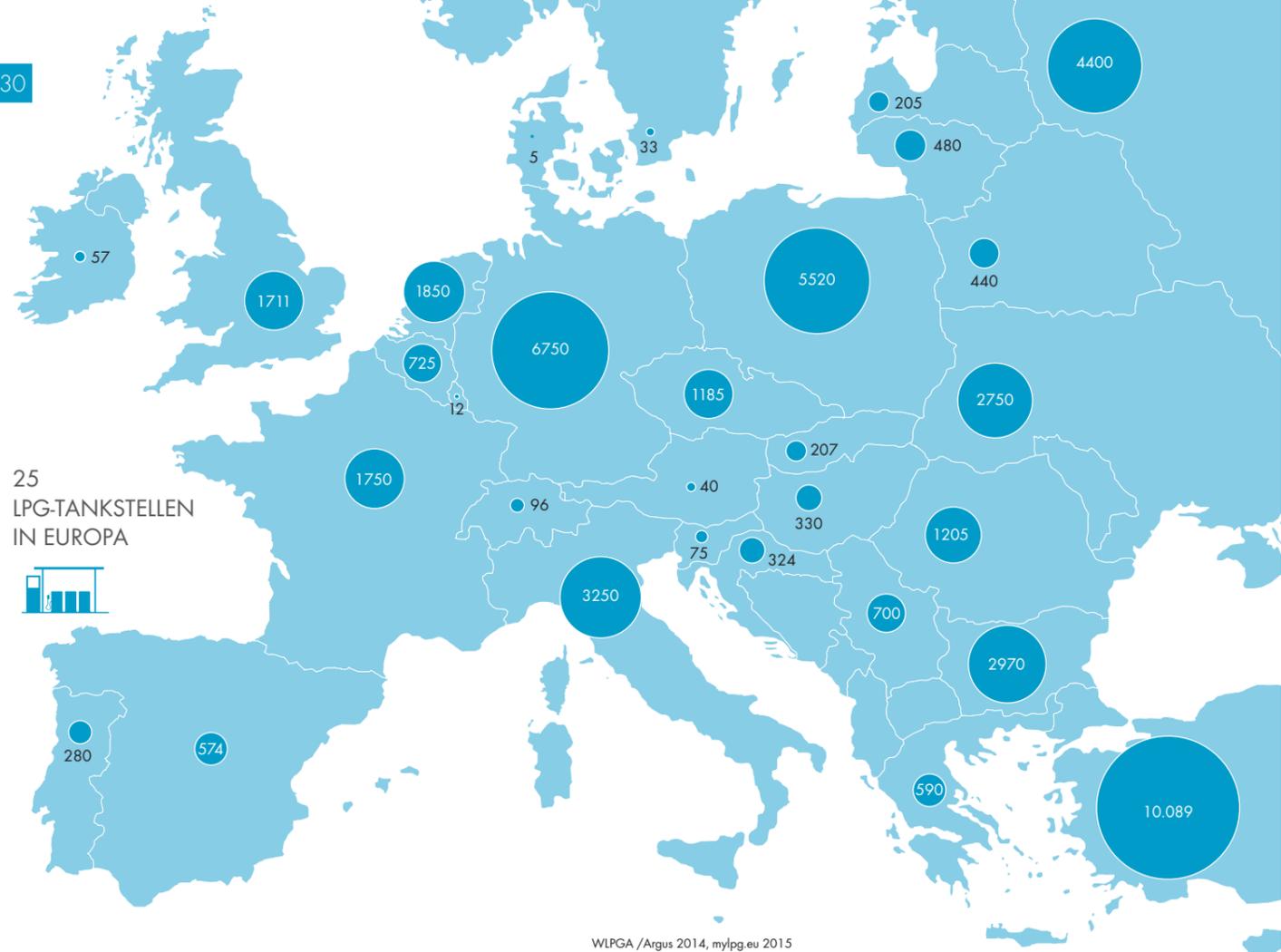


BGR 157
Arbeiten mit Autogasanlagen



Anlage XVII StVZO
Anerkennung von Kraftfahrzeugwerkstätten

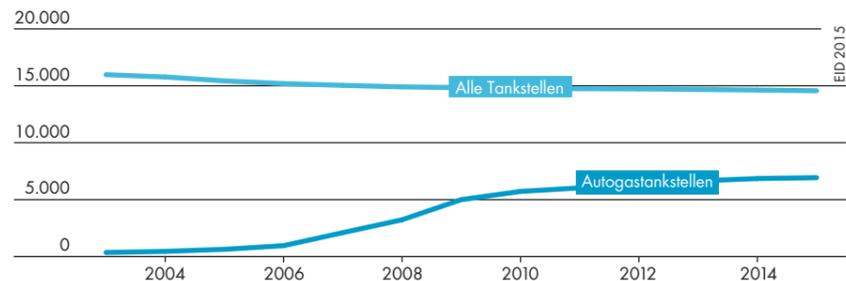
LPG-Tankstelleninfrastruktur ist in Deutschland in den vergangenen 10 Jahren stark ausgebaut worden. Während das Tankstellennetz (für Benzin/Diesel) seit Jahrzehnten konsolidiert wird und die Zahl der öffentlichen Tankstellen auf inzwischen weniger als 15.000 gesunken ist, wurde das LPG-Netz auf inzwischen nahezu 7.000 Standorte ausgebaut. Autogas ist für die gut 500.000



25 LPG-TANKSTELLEN IN EUROPA

WLPGA /Argus 2014, mylpg.eu 2015

26 TANKSTELLEN IN DEUTSCHLAND 2003-2015



LPG-Fahrzeuge inzwischen an fast jeder zweiten Tankstelle in Deutschland verfügbar (vgl. Abb. 26); auf einen Zapfpunkt kommen ca. 75 Autogas-Fahrzeuge. Ermöglicht wurde der LPG-Tankstellenausbau unter anderem durch die niedrigen Investitions- und Betriebskosten für LPG-Tankstellentechnik.

Die Zahl der LPG-Tankstellen in der EU (einschließlich Schweiz und Norwegen) wird auf etwa 25.000 bis 30.000 geschätzt. Das deutsche LPG-Tankstellennetz ist noch vor Polen und Italien das größte in der EU. Von unseren Nachbarländern weisen zudem die Niederlande, Tschechien und Belgien eine Vielzahl von LPG-Zapfpunkten auf, während in der Schweiz, in Österreich sowie

insbesondere in Dänemark nur wenige öffentliche Tankstellen auch eine Autogas-Füllanlage besitzen (vgl. Abb. 25). Bezogen auf den LPG-Fahrzeugbestand weist Deutschland im internationalen Vergleich eine hohe Autogas-Tankstellendichte auf; in den führenden Autogas-Ländern versorgen LPG-Tankstellen jeweils über einhundert bis mehrere hundert LPG-Fahrzeuge.

Technisch bestehen Autogas-Füllanlagen im prinzipiellen Aufbau aus den fünf Hauptkomponenten Lagerbehälteranlage, Druckerhöhungseinrichtungen (Pumpen), Zapfsäule bzw. Zapfgerät, verbindende Rohrleitungen und Steuerung. Die Lagerbehälter der Tankanlagen können sowohl oberirdisch

(Füllmenge dann gesetzlich auf max. 2,9 t begrenzt) als auch bei größeren Tanks unterirdisch installiert werden. Bei der Entscheidung für eine ober- oder unterirdische Lagerung spielen neben der Größe und Füllmenge des Lagerbehälters auch Faktoren wie der Untergrund oder Grundwasserzutritt eine wichtige Rolle (LUBW 2015).

Die eigentliche Verbindung der Füllanlage zum Fahrzeug wird über das Zapfgerät bzw. die Zapfsäule mit zugehöriger Füllpistole hergestellt, für welche in Europa bisher kein einheitliches System genutzt wird. In einigen Ländern, darunter Deutschland, Österreich und die Schweiz, wird der ACME-Anschluss verwendet, in anderen der Bajonett-Anschluss und der Dish-Anschluss. Sie unterscheiden sich in ihrer Form oder der Art der Arretierung der Zapfpistole.

Folglich sind für die Fahrzeugbetankung im Ausland je nach regional verbreitetem Befüllanschluss entsprechende Adapter erforderlich. Ein für Europa einheitlicher Betankungsanschluss wurde mit dem Euronozzle (DIN EN 13760) definiert, dieser wird bisher jedoch noch nicht flächendeckend angewandt.



Autogas-Fahrzeuge gelten zwar nicht als sparsamer bzw. effizienter als vergleichbare Otto- oder Diesel-Fahrzeuge. Autogasantrieben wurden und werden jedoch positive Effekte in Bezug auf ihre Umweltwirkungen zugesprochen. Bis vor wenigen Jahren galten Flüssiggasantriebe noch als saubere Antriebsoption (vgl. zum Beispiel BEA 2007), denn LPG-Fahrzeuge emittierten deutlich weniger Luftschadstoffe, insbesondere im Vergleich zu älteren Dieselantrieben. Dies war nicht zuletzt ein Grund für die Wiener Stadtwerke, in den 1960er Jahren ihre Busflotte auf Flüssiggasantriebe umzustellen.

Gegenüber Otto-Pkw waren die Luftqualitätsvorteile von Autogas immer schon geringer als gegenüber Dieselantrieben. Doch Autogas verbrennt nicht nur sauberer, es verursacht bei der Verbrennung auch weniger Treibhausgase. Außerdem sind Gasantriebe im Vergleich zu Diesel-Fahrzeugen leiser.

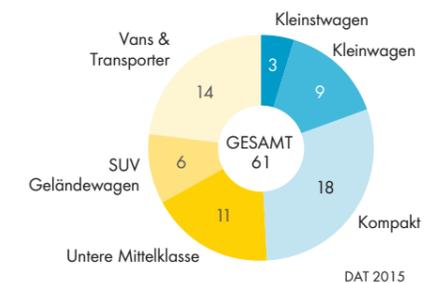
6.1 KRAFTSTOFFVERBRAUCH UND ENERGIEEFFIZIENZ

Die Umweltwirkungen von Kraftfahrzeugen werden neben den Fahrzeugfahrleistungen maßgeblich von ihrem spezifischem Kraftstoffverbrauch bzw. Energieverbrauch (Energieeffizienz) mitbestimmt. Hierbei ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen Norm- und realen Kraftstoffverbräuchen. Normverbräuche werden im Rahmen der Typzulassung von Neufahrzeugen unter Normbedingungen in standardisierten Fahrprofilen ermittelt. Der reale Kraftstoffverbrauch entspricht dem

Allerdings sind konventionelle Referenzfahrzeuge, sowohl Otto- als auch Diesel, durch immer bessere motorische Verbrennung und zusätzliche Abgasreinigungstechnik in der jüngeren Vergangenheit immer sauberer und effizienter geworden. Es stellt sich daher die Frage, wo Autogasantriebe für den Straßenverkehr in Bezug auf ihre Umweltwirkungen heute stehen.

In Deutschland werden derzeit (DAT 2015) ca. 60 Pkw-Modelle ab Werk mit Autogausstattung angeboten. Die Basis ist in allen Fällen ein korrespondierendes Fahrzeug mit Benzin-Ottomotor; etwa drei Viertel aller Autogas-Modelle verfügen über eine gängige elektronische Saugrohreinspritzung, ein Viertel sind moderne Direkteinspritzer. Die Mehrzahl der Autogaszfahrzeuge wird in der Kompaktklasse angeboten. Eine relativ große Zahl ist ebenfalls in der Klasse der Vans und Transporter verfügbar. Klein- und Kleinst-

27 PKW-MODELLE MIT AUTOGAS NACH FAHRZEUGKLASSEN



fahrzeuge sowie SUVs und Geländewagen sind weniger vertreten.

Im Folgenden werden die Umweltwirkungen von Autogas im Hinblick auf Energieverbrauch, Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen diskutiert. Dabei konzentrieren sich die Ausführungen in erster Linie auf die Hauptanwendung von Flüssiggas im Straßenverkehr, auf den Pkw sowie Pkw-ähnliche leichte Nutzfahrzeuge.

tatsächlichen Kraftstoffverbrauch in realen Fahrzyklen; er ist im Einzelfall stark von der Fahrweise abhängig. Der Kraftstoffverbrauch für den Fahrzeugbestand insgesamt kann anhand von Kraftstoffabsatz und Fahrleistungserhebungen geschätzt bzw. errechnet werden.

Während in der EU die Fahrzeugeffizienz mittelbar über die Regulierung der herstellerbezogenen CO₂-Flottenemissionen erfolgt, regulieren andere Länder direkt den Kraftstoffverbrauch bzw. die Energieeffizienz der Fahrzeuge (ika 2014). Maßnahmen zur

Steigerung der Fahrzeugeffizienz setzen zum einen bei der Minderung der Fahrwiderstände, zum anderen bei der Verbesserung des Antriebssystems an. Die Verbesserung des Antriebssystems kann unter anderem auch die Verwendung alternativer Kraftstoffe (wie Autogas) beinhalten.

Der spezifische Normkraftstoffverbrauch von Neuwagen in Deutschland ist seit Beginn der 1990er Jahre um 35%, der reale Kraftstoffverbrauch von Pkw um etwa 20% zurückgegangen (DIW 2013, VDA 2014). Die Abweichung zwischen Norm- und Realverbrauch für

heutige Neufahrzeuge liegt bei etwa 25 % (ICCT 2013, 2014).

LPG-Antriebsysteme für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge basieren in der Regel auf Ottomotoren. Die Wirkungsgradunterschiede zwischen den Benzin- und Autogassystemen fallen daher eher gering aus. Allerdings gibt es einige kraftstoffspezifische Besonderheiten. So kann sich die höhere Klopfestigkeit von LPG im Vergleich zu normalem Ottokraftstoff mit 95 ROZ bei hohen Lasten positiv auf den Wirkungsgrad auswirken. Auf der anderen Seite erhöht die zusätzliche LPG-Technik, insbesondere der Tank, die Fahrzeugmasse, was zu einem Mehrverbrauch führen kann.

Die folgende Beurteilung der Energieeffizienz von Autogas-Pkw erfolgt ausschließlich auf Basis von Normangaben; diese werden von den Fahrzeugherstellern in einem regelmäßig erscheinenden Leitfadens zu Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen für Neuwagen herausgegeben (DAT 2015).

Danach liegt der volumetrische Kraftstoffverbrauch (in Liter pro 100 km) neu zugelassener Autogas-Pkw über die einzelnen Fahrzeugklassen etwa 17 bis 45 % über demjenigen entsprechender Benzin-Referenzfahrzeuge; im Mittel sind es etwa 25 % (Abb. 28). Wesentliche Ursache hierfür ist die geringere volumetrische Energiedichte von Autogas im Vergleich zu Benzin, wodurch ein LPG-Mehrverbrauch von etwa 25 % zu erwarten ist.

Da Autogas- und Otto-Antriebe jedoch ähnlich energieeffizient sind, liegen die spezifischen Energieverbräuche (in kWh/100km) der 61 angebotenen Otto- und Autogas-Fahrzeuge deutlich näher beieinander als die spezifischen Kraftstoffverbräuche in l/100km – es ergibt sich eine Abweichung von lediglich 0,3 %.

Einschlägige Studien (DLR 2013, JEC 2014a) behandeln die ottomotorischen Antriebe (Benziner und Autogas) bezüglich ihrer Effizienz folglich als nahezu gleichwertig und unterscheiden nur die Fahrzeuggewichte aufgrund der vorhandenen Zusatzkomponenten. Das Mehrgewicht des LPG-Fahrzeugs beträgt dabei rund 35 kg gegenüber dem konventionellen Fahrzeug mit Benzin-Antrieb, etwas weniger als das Mehrgewicht von Erdgas- bzw. Diesel-Pkw. Das zusätzliche Gewicht kann zu einem leicht erhöhten Energieverbrauch des LPG-Fahrzeugs führen.

Aufgrund der gasförmigen Kraftstoffeinspritzung bei LPG-Fahrzeugen kann es zu einem leichten Leistungsverlust (kW) kommen. Bei Turbomotoren kann dieser Verlust im LPG-Betrieb kompensiert werden, zum Beispiel durch höheren Ladedruck und optimierte Motorsteuerung. Bei den ab Werk angebotenen Autogas-Fahrzeugen beträgt der maximale Leistungsverlust im Autogas-Betrieb jedoch weniger als 5 % und im Durchschnitt gut 2 % (DAT 2015).

Für umgerüstete LPG-Fahrzeuge sind belastbare Verbrauchs- und Emissionsdaten nicht erhältlich. Daher kann lediglich angenommen werden, dass die Maßnahmen, welche von Umrüstern vorgenommen werden, keine noch weitergehenden Vorteile bewirken als bei werksseitig angebotenen Fahrzeugen erzielt werden.

Technisch sind Autogasantriebe somit eine nahezu gleich effiziente Alternative zu Benzin-Pkw. Ökonomisch eignen sie sich allerdings auch für Vielfahrer und treten somit in Konkurrenz zu Diesel-Pkw mit hohen Fahrleistungen. Hier ist jedoch zu beachten, dass Dieselfahrzeuge gegenüber vergleichbaren Otto- und damit Autogas-Pkw einen Wirkungsgradvorteil von bis zu 20 % – gemessen am Energiebedarf pro Entfernungseinheit – aufweisen (JEC 2014a).

6.2 TREIBHAUSGASEMISSIONEN

Der Straßenverkehr (alle Kraftfahrzeuge einschließlich Nutzfahrzeugen) verursachte in den vergangenen Jahren rund 145 Millionen Tonnen direkter Treibhausgasemissionen, hauptsächlich Kohlenstoffdioxid (CO₂); das sind knapp 20 % der verbrennungsbedingten Treibhausgasemissionen in Deutschland

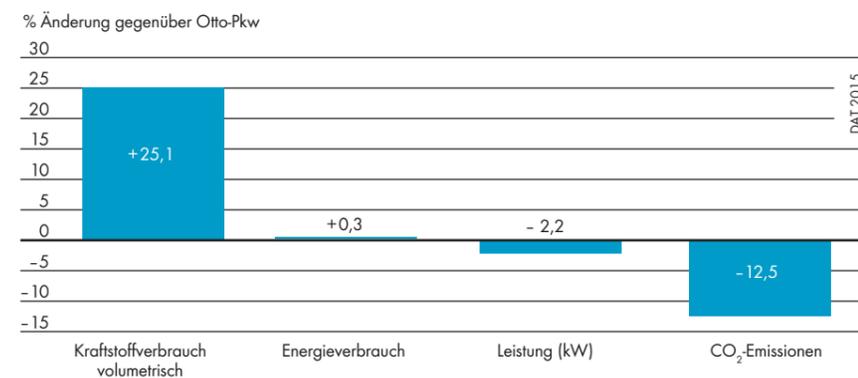
(UBA 2013b). Seit 1990, dem Kyoto-Basisjahr, sind die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs um 5 Millionen Tonnen CO₂ bzw. 3 % reduziert worden. Allerdings stiegen die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors zunächst bis 1999 an. Seit 1999 sind die Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs um 20 Millionen Tonnen CO₂ bzw. um rund 12 % verringert worden.

Ein Grund für die rückläufigen Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs sind die seit Ende der 1990er Jahre rückläufigen spezifischen CO₂-Emissionen der Fahrzeuge, was unter anderem durch verbindliche Vorgaben für die spezifischen CO₂-Emissionen für Neuwagen, insbesondere Pkw und leichte Nutzfahrzeuge, befördert wurde (EP/Rat 2009c); ab 2021 dürfen neue Pkw danach im Durchschnitt nur noch 95 g CO₂/km ausstoßen.

Ein anderer Grund für die Emissionsminderung ist die Einführung von Biokraftstoffen im letzten Jahrzehnt: In den nationalen Trendtabellen wird die Photosyntheseleistung der Biomasse, das heißt die Menge CO₂, welche die Pflanzen der Atmosphäre bei ihrem Wachstum entziehen („Bio-Vorteil“), den direkten Treibhausgasemissionen gutgeschrieben bzw. von ihnen abgezogen (UBA 2013b).

Direkte Treibhausgasemissionen entstehen bei der Verbrennung eines Kraft- bzw. Brennstoffes. Die direkten Emissionen (Tank-to-Wheels, TiW) können aus dem Energieverbrauch errechnet bzw. am Auspuff gemessen werden. Zusätzlich sind die bei der Bereitstellung des Kraftstoffs anfallenden Vorkettenemissionen, auch als Well-to-Tank (WtT) bezeichnet, zu berücksichtigen. Im Weiteren werden zunächst die direkten Treibhausgasemissionen

28 PERFORMANCE-VERGLEICH AUTOGAS VS. OTTO-PKW



sowie anschließend mögliche Vorketten der Autogasbereitstellung betrachtet.

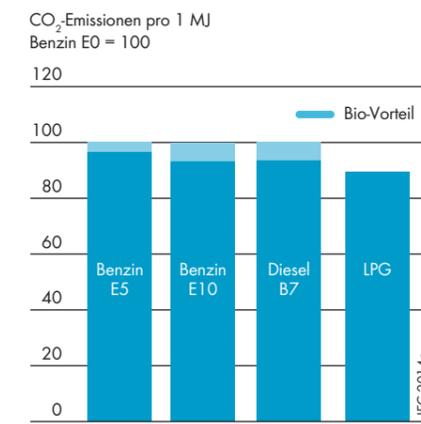
Treibhausgasemissionen werden auch häufig in CO₂-Äquivalenten (CO₂-Äq) angegeben, wobei das Treibhauspotenzial (THP) anderer Treibhausgase, hauptsächlich Methan (CH₄ – THP 25 mal höher als CO₂) und Distickstoffoxid (N₂O – THP 298 mal höher als CO₂) auf das von CO₂ normiert werden (IPCC 2007). Während bei den direkten Treibhausgasemissionen (fast) ausschließlich die verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen betrachtet werden, können CO₂-Äquivalente bei den indirekten Treibhausgasemissionen eine wichtige Rolle spielen.

Direkte Emissionen

Bei der Verbrennung von Flüssiggas werden aufgrund des geringeren Kohlenstoffgehaltes etwa 10 % weniger direkte CO₂-Emissionen pro Energieeinheit ausgestoßen als bei Otto- bzw. Dieselmotoren, nämlich nur 65,7 vs. 73,4 bzw. 73,2 g CO₂/MJ (JEC 2014c). Auch bei einer Beimischung von Biokraftstoffen von bis zu 10 % in Benzin und bis zu 7 % in Diesel und der Bewertung der direkten Treibhausgasemissionen der Biokraftstoffanteile mit Null (entsprechend UBA 2013b) zeigt Autogas (LPG) noch einen leichten Vorteil bei den direkten CO₂-Emissionen pro 1 MJ verbrannter Energiemenge (siehe Abb. 29).

Ob Autogas-Pkw im Straßenverkehr weniger Treibhausgase ausstoßen hängt jedoch nicht nur vom Energieträger, sondern auch entscheidend von der Fahrzeugeffizienz ab. Bei gleicher Effizienz von Autogas- und Otto-Pkw könnten durch den Einsatz von Autogas bzw. den Ersatz von Otto- durch Autogas-Pkw

29 TiW-TREIBHAUSGASEMISSIONEN VON KRAFTSTOFFEN



30 TREIBHAUSGASEMISSIONEN VON PKW-ANTRIEBEN



ebenfalls etwa 10 % spezifische Treibhausgasemissionen bezogen auf die Fahrstrecke (g CO₂/km) erreicht werden.

Für die heute angebotenen rund 60 LPG-Neufahrzeuge werden im Mittel ca. 12,5 % geringere CO₂-Emissionen im Vergleich zu den Benzin-Referenzfahrzeugen von den Herstellern ausgewiesen (DAT 2015). Dies liegt etwas oberhalb des aufgrund der Kraftstoffigenschaften und des Energieverbrauchs zu erwartenden Wertes von etwa 10 %. Diese Abweichung ist unter anderem auf (kleine) Unterschiede bei den verwendeten CO₂-Umrechnungsfaktoren zurückzuführen.

Unter Berücksichtigung der Fahrzeugeffizienzen sind die direkten Treibhausgasemissionen (TiW) pro gefahrenem Kilometer (g CO₂-Äq/km) für unterschiedliche Kraftstoffe beispielhaft in Abbildung 30 dargestellt. Dabei wird ein Fahrzeug der Kompaktklasse mit unterschiedlichen Antriebssystemen bei heutigem Stand der Technik angenommen. Der Kraftstoff-Normverbrauch (NEFZ) beträgt rund 5 Liter Benzin bzw. 6,3 Liter Autogas/100 km sowie 3,8 Liter Diesel/100 km (jeweils ohne Bioanteile). Die bei der Verbrennung von

Biokraftstoffen entstehenden CO₂-Emissionen werden hier – im Gegensatz zu den nationalen Trendtabellen (UBA 2013b) – vollständig bei den direkten Emissionen mitgeführt. Hierdurch und durch die Betrachtung des Normverbrauchs sind die ausgewiesenen TiW-Emissionen pro Kilometer den spezifischen CO₂-Emissionen nach EU-CO₂-Grenzwert-Richtlinie für Neu-Pkw (EP/Rat 2009c) grundsätzlich vergleichbar.

Für das Benzinfahrzeug ergeben sich TiW-Emissionen von knapp 120 g CO₂-Äq/km und für den Diesel etwa 100 g CO₂-Äq/km. Das Autogasfahrzeug emittiert TiW schließlich etwa 105 g CO₂-Äq/km. Das Autogasfahrzeug zeigt somit einen TiW-Emissionsvorteil von gut 10 % gegenüber einem Fahrzeug mit reinem Benzinbetrieb. Gegenüber dem Dieselantrieb erreichen Autogasfahrzeuge bei der TiW-Bilanzierung hingegen keine Treibhausgasvorteile, da der Dieselantrieb deutlich effizienter als der ottomotorische Antrieb ist – was sich in einer TiW-Emissionsreduktion von über 15 % gegenüber dem Benziner ausdrückt. Aufgrund ähnlicher TiW-CO₂-Faktoren von fossilen und biogenen Kraftstoffen kommt

es bei geringen Bio-Anteilen (von 5 bis 10 %) nicht zur einer signifikanten Veränderung der direkten CO₂-Emissionen (TiW).

Da Autogas-Pkw geringere direkte Treibhausgasemissionen als vergleichbare Ottofahrzeuge aufweisen, besteht für die Fahrzeughersteller in Bezug auf die gemäß EU-Verordnung 443/2009/EG (EP/Rat 2009c) zu erreichenden CO₂-Neuwagen-Flottenemissionen ein (kleiner) Anreiz, Autogasfahrzeuge statt Benzin-Pkw zu verkaufen.

Vorkettenemissionen

Für eine Gesamtbilanz sind zusätzlich zu den direkten Emissionen noch die Treibhausgasemissionen der Kraftstoffbereitstellung (WiT) zu berücksichtigen. Die Vorkettenemissionen aus Förderung, Transport und Verteilung sind in Abbildung 30 unten wiederum beispielhaft für vergleichbare Kompaktfahrzeuge und den Kraftstoffnormverbrauch (NEFZ) dargestellt.

Bezogen auf die spezifischen Treibhausgasemissionen pro gefahrenen Kilometer zeigt sich für rein fossile Kraftstoffe eine Verteilung zwischen Vorkette und direkten CO₂-Emissionen von etwa 15 bis 20 % (WiT) zu 80 bis 85 % (TiW). Durch die Beimischung von Biokraftstoffen verändert sich das Verhältnis zwischen Vorkette und direkten Emissionen bei Otto- und Dieselmotoren: Der Bio-Vorteil wird in den Vorkettenemissionen berücksichtigt (IFEU 2012, JEC 2014b); die WiT-Emissionen von E5, E10 und B7 fallen folglich geringer aus.

Die spezifischen WiT-Treibhausgasemissionen des Benzin-Pkw liegen bei etwa 140 g CO₂-Äq/km, die des Diesel-Pkw bei etwa 121 g CO₂-Äq/km. Werden Biokraftstoffe beigemischt, dann reduzieren sich die spezifischen WiT-Treibhausgasemissionen aufgrund der reduzierten Treibhausgasemissionen (in der Vorkette) für einen Benziner auf rund 137 g CO₂-Äq/km bei Nutzung eines E5 und auf etwa 134 g CO₂-Äq/km bei E10. Beim Diesel-Pkw sinken die spezifischen WiT-Treibhausgasemissionen bei einem B7 auf etwa 116 g CO₂-Äq/km. Der LPG-Pkw fährt ohne Bio-Anteile und emittiert WiT etwa 127 g CO₂-Äq/km.

Auch in der WiT-Betrachtung hat LPG das Potenzial, die Treibhausgasemissionen von Otto-Pkw zu reduzieren, hier um 9 %. Damit werden Reduktionen der WiT-Treibhaus-

gasemissionen erreicht, die die eines E10 übertreffen (etwa 4 % gegenüber E0). Ein Diesel-Pkw mit einem B7 kann jedoch die WiT-Emissionen im Vergleich zu einem Benzin-Pkw mit E0 um etwa 17 % pro Kilometer reduzieren.

Die Auswahl der Treibhausgasemissionsfaktoren für die Bereitstellung von Otto- und Dieselmotoren folgt dabei (JEC 2014b) mit 13,8 g CO₂-Äq/MJ bzw. 15,4 g CO₂-Äq/MJ. WiT ergeben sich dann einschließlich der direkten Emissionen für Benzin 87,1 g CO₂-Äq/MJ und für Diesel 88,6 g CO₂-Äq/MJ.

Für die beigemischten Biokraftstoffe wird angenommen, dass diese die Nachhaltigkeitsanforderungen der EU-Erneuerbare Energien-Richtlinie 2009/28/EG (EP/Rat 2009a, 2009b) erfüllen; sie müssen insbesondere ihre WiT-Treibhausgasemissionen gegenüber fossilen Kraftstoffen ab 2018 um 60 % senken. Als Emissionsfaktoren für die Biokraftstoffe werden WiT 33,3 g CO₂-Äq/MJ und TiW für Ethanol 71,6 g CO₂-Äq/MJ und für Bio-Diesel (FAME) 76,2 g CO₂-Äq/MJ angenommen (JEC 2014c); die TiW-Emissionen wurden wiederum in der Vorkette als Bio-Vorteil abgezogen.

Für Flüssiggas sind schließlich zwei Bereitstellungswege zu unterscheiden: Flüssiggas aus der Erdgasaufbereitung und Flüssiggas aus der Raffination von Erdöl.

LPG ist dabei ein Koppel- bzw. Nebenprodukt des jeweiligen „Hauptstroms“ (Erdgas, Mineralölprodukte). Abhängig von den Unterschieden in den jeweiligen „Hintergrundprozessen“ – beim erdgasbasierten LPG vor allem die angesetzten unterschiedlichen Prozesse und Strommische für die Komprimierung und Kühlung, bei erdölbasiertem LPG die Annahmen zur jeweiligen Raffinerie – ergibt sich eine Spanne von WiT-Treibhausgasintensitäten für LPG. Auch die (internationalen) Transporte spielen eine – wenn auch weniger ausgeprägte – Rolle für die Treibhausgasemissionen der Vorketten.

In einer Studie für das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) werden für die WiT-Emissionen von LPG als Raffinerieprodukt mit 13,8 g CO₂-Äq/MJ und aus Erdgas, importiert aus Übersee, mit 8,1 g CO₂-Äq/MJ angegeben (DLR 2013).

Die globale Produktion von LPG besteht zu rund 60 % aus der Erdgasaufbereitung und zu 40 % aus Erdölraffinerien. Die Anteile variieren jedoch beträchtlich zwischen den Ländern: in Skandinavien liegt der Erdgasanteil teilweise bei über 80 %, in Deutschland bei nur 5 % (WLPGA/Argus 2014, MWV 2014, BAFA 2014). Für in Deutschland verbrauchtes LPG lässt sich aus dieser Aufkommensverteilung ein WiT-LPG-Treibhausgasemissionsfaktor von 13,3 g CO₂-Äq/MJ ermitteln; WiT ergeben sich für LPG einschließlich der direkten Emissionen dann 79,0 g CO₂-Äq/MJ.

Da schon heute das Aufkommen von LPG aus der Raffination von Erdöl in Deutschland vollständig inländisch verbraucht wird (MWV 2014), müsste eine höhere Autogasnachfrage vorwiegend durch Importe gedeckt werden. Mittelfristig würden die energieträgerspezifischen Treibhausgasemissionen für LPG WiT, und damit auch TiW, dann leicht sinken.

LPG-Fahrzeuge können nicht nur die spezifischen Treibhausgasemissionen pro gefahrenen Kilometer im Vergleich zu einem Benziner reduzieren, sowohl TiW als auch WiT. Da ihre Treibhausgasemissionen pro Energieeinheit (g CO₂/MJ) gegenüber Otto- und Dieselmotoren geringer ausfallen, können sie überdies auch zur Dekarbonisierung des Kraftstoffmixes beitragen.

Seit 2015 müssen die Kraftstoffanbieter ihren Kraftstoffabsatz dekarbonisieren; bis 2020 müssen die (gesamten) Treibhausgasemissionen gegenüber einem fossilen Referenzkraftstoffmix um mindestens 6 % gesenkt werden (EP/Rat 2009b). Über die mögliche Anrechnung bzw. Berücksichtigung alternativer Kraftstoffe bei den Treibhausgasminderungspflichten der Kraftstoffanbieter wird zurzeit noch auf EU-Ebene diskutiert (EU-COM 2014).

6.3 LUFTSCHADSTOFFEMISSIONEN

Zu den Luftschadstoffemissionen trägt der Straßenverkehr maßgeblich bei. Allerdings hat der Straßenverkehr seine Luftschadstoffemissionen seit 1990 bereits deutlich reduziert. Die energiebedingten Luftschadstoffemissionen wurden seit 1990 für Schwefeldioxid (SO₂), flüchtige Kohlen-

wasserstoffe (NMVOC) und Kohlenmonoxid (CO) und seit 1995 für Stickoxide (NO_x) und Feinstaub (PM₁₀) trotz steigender Fahrzeugleistungen mindestens halbiert, die Emissionen von Schwefeldioxid sogar um nahezu 100 % gesenkt (vgl. Abb. 31).

Erreicht wurde die Emissionsreduktion im Straßenverkehr zum einen durch sauberere Otto- und Dieselmotoren, denn seit 2003 sind alle in Deutschland eingesetzten Kraftstoffe praktisch schwefelfrei. Zum anderen wurden die Anforderungen an die Abgasemissionen sämtlicher Kraftfahrzeuge über die Euro-Normen immer strenger. Dabei hat der Gesetzgeber für einzelne Luftschadstoffe immer niedrigere Abgasgrenzwerte angesetzt.

So sind die Abgasgrenzwerte von Kohlenstoffmonoxidemissionen für Otto-Pkw seit der Einführung der Euro 1-Norm (1992) um gut zwei Drittel gesenkt worden, die Abgasgrenzwerte für Partikel- und Stickoxidemissionen von Dieselfahrzeugen (Lkw und Pkw) gar um über 90 % (vgl. Abb. 32) (Continental 2014; Delphi 2014).

Zudem wurde die Abgasregulierung bei den einzelnen Fahrzeugtypen auf neue Schadstoffe ausgedehnt: Mit der Einführung von Euro 5 werden auch die Partikelemissionen von Otto-Pkw mit Direkteinspritzung und seit Euro 6 auch die Partikelanzahl ihrer Abgasemissionen reguliert.

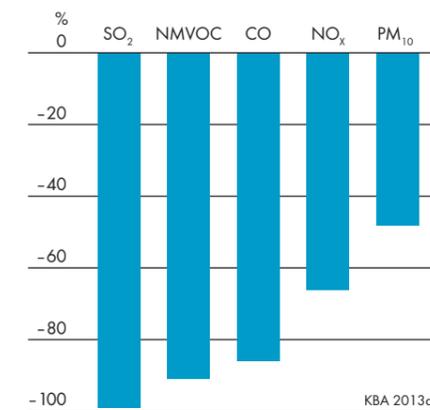
Bei der Verbrennung von Autogas (ohne Abgasreinigungstechnik) entstehen bedingt durch die bessere Gemischbildung grundsätzlich weniger Luftschadstoffe als beim Einsatz von Otto- und Dieselmotoren. Pkw mit LPG-Antrieb werden ab Abgasstufe Euro 1 der Schadstoffgruppe 4 („Grüne Plakette“) zugeordnet. Für Autogasfahrzeuge ab Euro 1 ergeben sich damit keine Einschränkungen bei der Zufahrt von Innenstädten mit Umweltzonen.

Moderne Fahrzeuge, welche die heutigen Abgasemissionsstandards Euro 6 (Pkw) und Euro VI (Nutzfahrzeuge) einhalten, sind in der Regel ausgestattet mit einem geregelten Drei-Wege-Katalysator (Otto-Pkw) bzw. bei Dieselmotoren mit Partikelfilter, Oxidationskatalysator und gegebenenfalls mit NO_x-Speicher-katalysator oder SCR-Katalysator (Selektive Katalytische Reduktion mit Harnstoffeinspritzung). Euro 5- bzw. Euro V-Kraftfahrzeuge

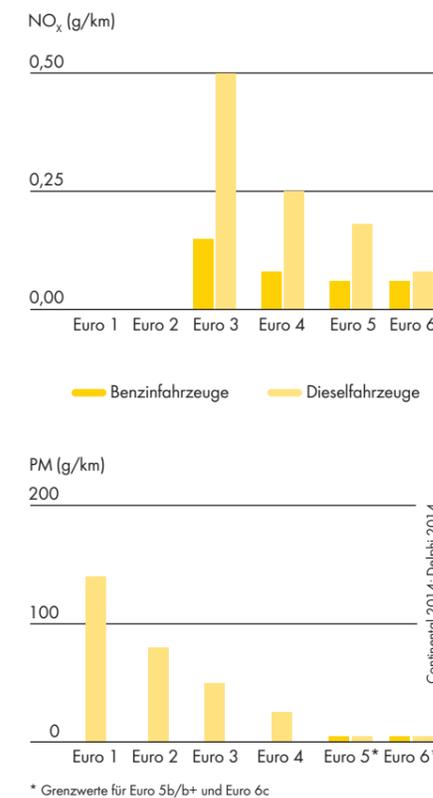
sowie Euro 6- bzw. Euro VI-Kraftfahrzeuge verursachen folglich nur noch sehr geringe Luftschadstoffemissionen im Straßenverkehr.

Aktuelle Untersuchungen (SAE 2013, 2014) zum Emissionsverhalten von Autogasfahrzeugen zeigen zwar, dass auch für heutige Fahrzeuge Vorteile bei den Luftschadstoffen von Autogas gegenüber Referenz-Benzinern möglich sind. Die Emissionsminderungen

31 SCHADSTOFFMINDERUNGEN IM STRASSENVERKEHR SEIT 1990/95



32 ABGASGRENZWERTE FÜR PKW-EURONORMEN



fallen jedoch, ausgenommen Partikelemissionen und Partikelanzahl, zumeist gering aus. So könnten LPG-Direkteinspritzer im Autogasbetrieb die Euro 6-Emissionsgrenzwerte für die Partikelanzahl deutlich unterschreiten, ohne dass eine erweiterte Abgasnachbehandlung zur Verringerung der Partikelemissionen, zum Beispiel ein Partikelfilter, notwendig wird.

Angesichts der inzwischen erreichten hohen Abgasstandards für neue Otto- und Dieselfahrzeuge (Pkw und Nutzfahrzeuge) und reformulierter Otto- und Dieselmotoren bieten Autogasfahrzeuge kaum noch Vorteile bei den Luftschadstoffemissionen – allenfalls bei der Umrüstung sehr alter Benzinfahrzeuge.

Das Thema Luftschadstoffe wird daher im Zusammenhang mit Autogas in der heutigen Fachliteratur kaum noch behandelt. Auch die Wiener Stadtwerke stellen ihre Busflotte von Autogas wieder auf Dieselantriebe um; zugleich erhöhen sie dabei den Abgasstandard ihrer Busse von Euro V-plus (EEV – Enhanced Environmentally Friendly Vehicles) mit Autogas auf Euro VI mit Dieselantrieb.





Ein wichtiger Parameter für die Entscheidung, ein Fahrzeug – etwa mit Autogas-antrieb – zu kaufen oder zu halten, ist seine Wirtschaftlichkeit bezogen auf eine bestimmte Fahr- oder Transportleistung. Sie kann mit Hilfe von Autokosten-Berechnungen analysiert werden. In Betriebswirtschaft, Flottenmanagement und Logistik verfolgt man einen Total-Cost-of-Ownership-Ansatz (TCO), mit dem alle relevanten Kosten der Haltung (Ownership) zur Erbringung einer gewünschten Personen- oder Güterverkehrsleistung untersucht werden.

Der TCO-Ansatz empfiehlt sich vor allem für rational entscheidende und handelnde Akteure; hierzu zählen insbesondere juristische Personen und gewerbliche Fahrzeughalter; allerdings sind 95 % der Autogas-Pkw auf private Halter zugelassen (KBA 2014b). Doch auch Privathaushalte können ihre Pkw-Anschaffungs- und Pkw-Haltungsentscheidung mit Hilfe von Autokosten-Vergleichen treffen bzw. überprüfen. Wichtige Entscheidungsparameter, die sich nicht in Autokosten oder Transportleistung ausdrücken lassen, werden vom TCO-Ansatz jedoch nicht erfasst; dazu zählen Ansehen bzw. Prestige eines Fahrzeugs, Komfort und Platz, Handling von Fahrzeug sowie Versorgungsinfrastruktur und anderes mehr.

Auch wenn nur ein Teil der privaten Haushalte seine automobilen Wahlentscheidung ausschließlich oder hauptsächlich an den (niedrigsten) Autokosten (Wietschel et al. 2013) orientiert, sind die Autokosten

oftmals doch ein Kriterium, welches letztendlich in die Konsumenten-Wahlentscheidung mit einfließt.

Die Möglichkeiten und Varianten des Autokosten-Vergleichs sind zahlreich. In automobilen Fachzeitschriften werden – auch für Autogas-Pkw – regelmäßig unterschiedlichste Autokosten-Vergleiche angeboten. In einem vollständigen Vergleich werden idealerweise sämtliche Anschaffungs- und Betriebskosten zur Auswahl stehender Pkw gegenübergestellt. Hierunter fallen die Pkw-Anschaffungskosten, also der Anschaffungspreis (meist der Basisversion) oder im Finanzierungsfall Ratenzahlungen zuzüglich Zinsen.

Soll der Pkw wieder veräußert werden, muss zusätzlich der Wertverlust über die gewünschte Haltedauer bzw. der Wiederverkaufswert geschätzt werden. Zu den Fixkosten werden Kfz-Steuer und Pkw-Versicherung gezahlt. Ferner müssen Werkstattkosten (für Wartung und Verschleißreparaturen) und Kraftstoffkosten berücksichtigt werden (ADAC 2015a).

Ein (möglichst) vollständiger Vergleich verschafft Kostentransparenz. Gleichwohl muss eine ganze Reihe von Annahmen zu einzelnen Kostenpositionen getroffen werden, die zum Teil wie Versicherungstarife sehr individuell sind und die das Vergleichsergebnis wie die unverbindliche Preisempfehlung des Herstellers vs. Händler-rabatt oder der Wertverlust maßgeblich beeinflussen können. Andere Positionen

wie die zusätzlichen Wartungskosten für eine Autogasanlage oder die unterschiedliche Kfz-Steuer sind absolut zu geringfügig bzw. heben sich teilweise gegenseitig auf, um das Ergebnis des Kostenvergleichs maßgeblich zu beeinflussen.

Ein einfacher Vergleichsansatz beschränkt sich folglich auf die wichtigsten differierenden Kostenpositionen. Dazu gehören zum einen die einmaligen Kosten einer Autogas-Technikausstattung bzw. der Anschaffungspreis für einen neuen Autogas-Pkw, zum anderen die laufenden Kraftstoffkosten für Autogas und Alternativkraftstoffe.

Im Folgenden wird ein vereinfachter Autokosten-Vergleich für aktuelle Pkw der Kompaktklasse durchgeführt, denn diese auch Golfklasse genannte Kategorie ist das größte Pkw-Segment in Deutschland (KBA 2014a).

Dabei sind zwei Vergleichsfälle zu unterscheiden: erstens Pkw, die auf Autogasbetrieb umgerüstet werden, und zweitens Pkw, die bereits neu als Autogasfahrzeug erworben werden. Neben dem Autogasfahrzeug werden in den Autokosten-Vergleich zum einen ein Otto-Pkw, zum anderen ein Diesel-Pkw (nur als Neuwagen) einbezogen.

Aufgrund der überragenden Bedeutung der Energiesteuer für Kraftstoffe wird abschließend der Einfluss einer Autogassteuer-Variation auf die Wirtschaftlichkeit von Autogas-Pkw untersucht.

7.1 AUTOGAS-UMRÜSTUNG

Die allermeisten Autogasfahrzeuge werden hierzulande nicht vom Hersteller ab Werk für den Betrieb mit Autogas ausgerüstet, sondern sind umgerüstete Pkw. Die Verkaufspreise für über 40 im Markt verfügbare Autogas-Nachrüstsysteme liegen zwischen 1.400 und rund 2.600 Euro; der Mittelwert liegt bei gut 2.300 Euro. Da eine Umrüstung auf LPG nur bei Pkw mit Ottomotoren möglich ist, kommt nur ein Benziner als Alternativfahrzeug für die LPG-Umrüstung und dementsprechend für den Autokosten-Vergleich in Frage.

Ein Kompaktfahrzeug mit Benzinmotor, das dem heutigen Stand der Technik entspricht, weist einen Normkraftstoffverbrauch von etwa 5 Litern Ottokraftstoff pro 100 km auf; das entspricht knapp 120 Gramm CO₂ pro Kilometer. Der reale Kraftstoffverbrauch von Neuwagen liegt heute in der Regel etwa 25 % über dem Normverbrauch (ICCT 2013, 2014); daraus ergibt sich für den Otto-Pkw ein realer Kraftstoffverbrauch von 6,3 Litern.

Anders als für Otto- und Dieselmotoren werden Tankstellenpreise für Autogas nicht amtlich erhoben (Destatis 2015); allenfalls werden Stichproben- und Stichtagspreise von Online-Portalen und Energiefachzeitschriften veröffentlicht. Danach bewegten sich die Preise für Autogas in den Jahren 2013 und 2014 zumeist im Bereich von 70 bis 80 Cent pro Liter, zum Jahreswechsel 2014/15 fielen sie allerdings auf 60 bis 65 Cent pro Liter. Der Ottokraftstoffpreis (Super E5 mit 95

Oktan) lag über die Jahre 2013 und 2014 im Zweijahresdurchschnitt bei 1,56 Euro pro Liter. Zur Jahreswende 2014/15 halbierte sich der Rohölpreis, Ottokraftstoff notierte in der Folge bei 1,30 bis 1,35 Euro pro Liter. Beim Preisvergleich ist zu beachten, dass Autogas- und Ottokraftstoffpreise sich nicht notwendigerweise parallel zueinander sowie zum Rohölpreis entwickeln, sondern jeweils entsprechend Angebot und Nachfrage und damit zumindest zeitweise durchaus unterschiedlich.

Für den Autokosten-Vergleich werden **zwei Kraftstoffpreisszenarien** untersucht, ein Niedrig- und ein Hochpreisszenario. Im Niedrigpreisszenario liegt Benzin bei etwa 1,32 Euro und Autogas bei 0,65 Euro pro Liter; im Hochpreisszenario liegt Benzin bei 1,56 und Autogas bei 0,75 Euro pro Liter. In Verkaufseinheiten Liter ist Benzin jeweils etwa doppelt so teuer wie Autogas. Der Energiegehalt von einem Liter Flüssiggas ist jedoch gut ein Fünftel geringer als derjenige von einem Liter Benzin. Bezogen auf den Energiegehalt pro Kilowattstunde ist Autogas mit etwa 10 Cent pro Kilowattstunde (kWh) fast zwei Fünftel günstiger als Ottokraftstoff (Abb. 36, S. 40).

Autogas-Pkw basieren auf Ottomotoren. Bei fachgerechter Umrüstung kann von etwa gleich effizienten Fahrzeugen ausgegangen werden. Aufgrund des geringeren Energiegehaltes von Autogas verbrauchen Autogasfahrzeuge mehr Kraftstoff (in Litern) als Benziner, nämlich 6,3 statt 5,0 Liter pro 100

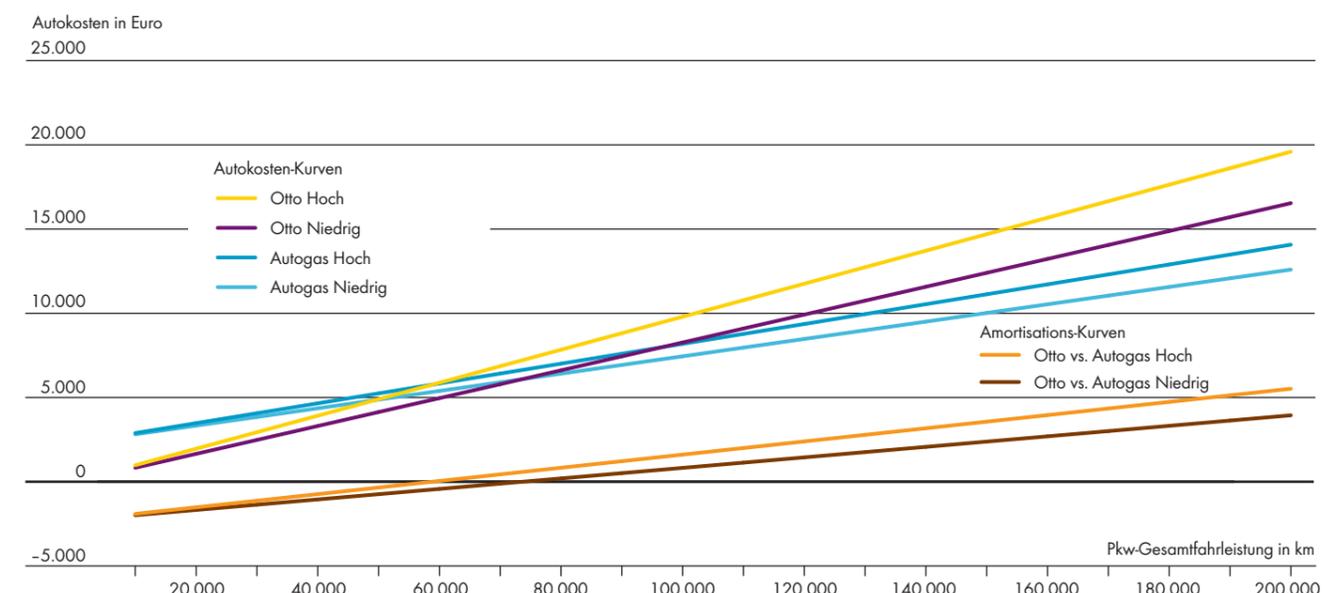
km im Normzyklus – was aufgrund des geringeren Kohlenstoffgehaltes von Autogas nur etwa 105 g CO₂ ergibt. In der Praxis wird ein 10 bis 30 % höherer Kraftstoffverbrauch (in Litern) als bei Benzinern beobachtet (ADAC 2015b), rechnerisch ist auf Basis des Energiegehaltes ein volumetrischer Mehrverbrauch von etwa einem Viertel zu erwarten. Einem realen Ottokraftstoffverbrauch von 6,3 Litern entspricht somit ein realer Autogasverbrauch von knapp 8,0 Litern.

Ein Autogasfahrer fährt gegenüber einem Benziner pro Fahrkilometer bei niedrigen Kraftstoffpreisen um gut 3 Cent, bei höheren Kraftstoffpreisen sogar um fast 4 Cent pro Fahrkilometer günstiger.

Es stellt sich folglich die Frage: **in welchem Zeitraum hat er oder sie die Umrüstungskosten in Höhe von durchschnittlich rund 2.300 Euro wieder eingespart und nach wieviel Kilometern Pkw-Fahrleistung (mit Autogas) werden die anfänglichen Investitionen wieder hereingefahren?**

In Abbildung 33 werden die Betriebskosten von Autogas- und Otto-Pkw in einem XY-Diagramm miteinander verglichen. Die X-Achse zeigt die jeweilige Pkw-Gesamtfahrleistung, die Y-Achse die bei einer bestimmten Fahrleistung aufgelaufenen Betriebskosten. Für das Autogasfahrzeug werden neben den Betriebskosten außerdem die zu amortisierenden Umrüstungskosten, abgebildet durch den Schnittpunkt der Autogas-Kostenkurve mit der Y-Achse, erfasst.

33 AUTOGAS-UMRÜSTUNG: WIRTSCHAFTLICHKEIT UND AMORTISATION



Die Steigung einer Kostenkurve spiegelt die jeweiligen Kraftstoff- bzw. Energiekosten eines Pkw-Antriebs pro km Fahrleistung wider. Dabei werden die Kraftstoff- bzw. Energiekosten (in €/km) nicht nur von den Kraftstoffpreisen (in €/Liter oder Ct/kWh), sondern auch wesentlich vom Wirkungsgrad bzw. der Effizienz des betrachteten Pkw-Antriebes bestimmt.

Im Fall der Umrüstung gilt für gleich effiziente Ottoantriebe: Je flacher eine Autokostenkurve verläuft, desto günstiger ist der zugehörige Kraftstoff – Autogas ist günstiger als Ottokraftstoff und verläuft folglich flacher. Und je niedriger die Kurve, desto günstiger die Antriebs-Kraftstoff-Kombination. Schneiden sich zwei Autokostenkurven, wird ein Pkw-Antrieb ab einer bestimmten Gesamtfahrleistung günstiger als ein anderer.

Zusätzlich zu den Autokostenkurven ist als Differenz aus den Betriebskosten für Autogas-Pkw (Kraftstoff plus Umrüstkosten) und Otto-Pkw (nur Kraftstoff) eine Amortisationskurve eingezeichnet. Steigt diese positiv, sind

die Kilometerkosten von Autogas geringer als diejenigen des Referenzfahrzeugs. Wo die Amortisationskurve die Y-Achse schneidet, erreicht der Autogas-Pkw gegenüber dem Otto-Pkw einen Break-even.

Bei niedrigen Autogas- und Ottokraftstoffpreisen würde sich die Umrüstung eines Benziners nach etwas weniger als 75.000 km Pkw-Gesamtfahrleistung mit Autogas amortisieren (vgl. ähnlich ADAC 2015b). Hier schneiden sich zum einen die Kostenkurven für Autogas (einschließlich Umrüstkosten) und Ottokraftstoff; zum anderen schneidet die Amortisationskurve die Null-Linie.

Bei höheren Autogas- und Ottokraftstoffpreisen würde sich die Umrüstung bereits nach knapp 60.000 km Pkw-Gesamtfahrleistung rechnen, denn hier ist der absolute Deckungsbeitrag pro gefahrenen Kilometer um fast einen Cent höher als im Niedrigpreisszenario.

Die Wirtschaftlichkeit einer Umrüstung auf Autogas wird an den jeweiligen Schnittpunkten

7.2 AUTOGAS-NEUWAGEN

Nur ein kleiner Teil der Autogasfahrzeuge wird hierzulande vom Hersteller (ab Werk) für den Betrieb mit Autogas ausgerüstet. Während das Antriebssystem bei der Umrüstung fest vorgegeben ist – nämlich ein Ottomotor – muss die Wirtschaftlichkeitsanalyse im Falle einer Neuwagenanschaffung um die Betrachtung möglicher Antriebsalternativen erweitert werden. Und neben Benzin-Pkw kommt hier vor allem der Dieselantrieb als Alternative in Frage; denn Autogasfahrzeuge sind mit ihren niedrigen Kraftstoffkosten ebenso attraktiv für Viel- und Langstreckenfahrer wie Diesel-Pkw aufgrund ihres geringen spezifischen Energieverbrauchs pro Kilometer.

Die Neuwagenpreise für Kompaktfahrzeuge mit Ottomotor liegen heute bei etwa 20.000 Euro. Die Mehrpreise für Autogas-Neuwagen finden sich in einer ähnlichen Größenordnung wie die Verkaufspreise für Nachrüstsysteme; im Mittel von über 50 heute angebotenen Autogas-Erstausrüstungen bzw. Neuwagen liegt der Preisaufschlag im Vergleich zu ähnlich motorisierten Benzinfahrzeugen bei etwa 2.100 Euro. Damit kostet ein kompaktes Autogas-Neufahrzeug 22.100 Euro. Diesel-Pkw werden in der Regel 2.000 bis 2.500 Euro

höher gepreist als vergleichbare Otto-Pkw. Im Folgenden wird vereinfachend unterstellt, dass der Aufschlag für neue Diesel-Pkw gegenüber Otto-Pkw dem Mehrpreis für Autogas-Neuwagen entspricht.

Dieselantriebe sind zwar schwerer, prinzipbedingt jedoch effizienter als Ottomotoren. Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wird im Weiteren angenommen, dass Dieselfahrzeuge etwa 15 bis 20% weniger Energie (kWh oder Megajoule pro km) benötigen als ein vergleichbarer Otto- und Autogas-Pkw. Im Normzyklus verbraucht der Diesel-Pkw nur 3,8 Liter Diesel pro 100 km – statt 5,0 bzw. 6,3 Liter Benzin oder Autogas. Bei den fahrleistungsbezogenen Treibhausgasemissionen liegt der Diesel-Pkw mit 100g CO₂/km etwas niedriger als der Autogas-Pkw und deutlich besser als der Benzin mit knapp 120g CO₂/km. Real konsumiert ein Dieselpkw dann knapp 5,0 Liter pro 100 km statt 6,3 bzw. knapp 8,0 Liter für Benzin und Autogas-Pkw.

Die Tankstellenpreise für Dieseldieselkraftstoff (B7) lagen im Zweijahresdurchschnitt 2013/14 bei knapp 1,40 Euro, zur Jahreswende 2014/15 aber bei nur 1,15 Euro pro Liter. Der Energiegehalt von einem Liter Flüssiggas

jedoch nur erreicht, wenn ausschließlich Autogas genutzt wird. Wird teilweise mit Benzin gefahren, erhöht sich die zur Amortisation notwendige Pkw-Fahrleistung. Der in der Regel für das Anlassen und Warmlaufen erforderliche Ottokraftstoffeinsatz von etwa 0,35 Litern pro 100 km erhöht die zur Amortisation notwendige Pkw-Fahrleistung ab Umrüstung um 3.000 bis 4.000 km.

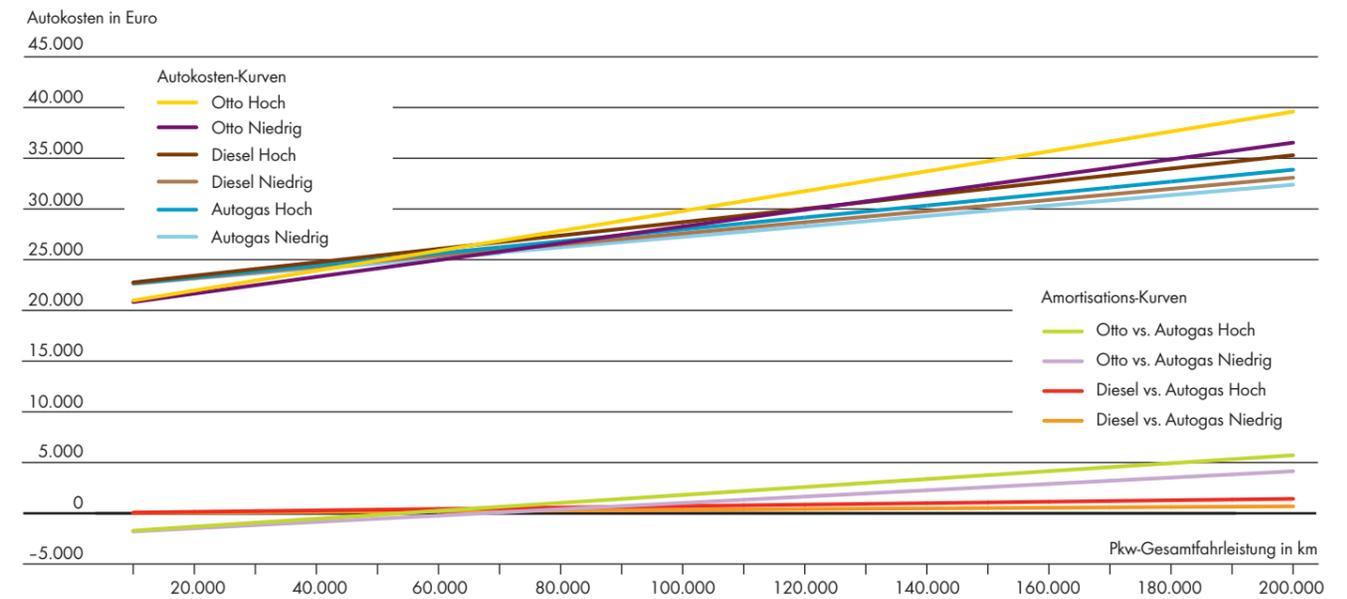
Wird die durchschnittliche Jahresfahrleistung eines Benziners von 11.100 km zugrunde gelegt (DIW 2013), lässt sich mittels einer statischen Amortisationsrechnung die Kapitalrückflussdauer (Payback-Periode) berechnen: Im Niedrigpreisszenario würde es fast sieben Jahre dauern, bis die zusätzlichen Ausgaben über geringere Kraftstoffkosten eingespart sind, im Hochpreisszenario dagegen gut fünf Jahre. Bei einer sehr hohen Jahresfahrleistung – ein Diesel-Pkw fährt durchschnittlich über 20.000 km pro Jahr – würde die Amortisation der Umrüstkosten dagegen knapp vier bzw. sogar nur drei Jahre dauern.

ist etwa 30% geringer als der von einem Liter Dieseldieselkraftstoff. Bezogen auf den Energiegehalt (pro Kilowattstunde oder Megajoule) ist Autogas mit etwa 10 Cent pro kWh etwa ein Fünftel günstiger als Dieseldieselkraftstoff. Der wirtschaftliche Vorteil von Autogas gegenüber Diesel ist mit anderen Worten nur halb so groß wie gegenüber Ottokraftstoff. Unter Berücksichtigung des höheren Wirkungsgrades des Dieselantriebes reduziert sich der Kraftstoffkostenvorteil des Autogas-Pkw gegenüber einem Diesel-Pkw auf weniger als einen Cent pro Kilometer; gegenüber einem Ottofahrzeug waren es je nach Preisszenario noch drei bis vier Cent pro Kilometer.

Anders als bei der Autogas-Umrüstung stellt sich bei der Neuanschaffung also die Frage, **ob und in welchem Zeitraum und nach welcher Fahrleistung die Kosten, eventuell auch Mehrkosten, für einen neuen Autogas-Pkw durch geringere Verbrauchskosten gegenüber zu betrachtenden alternativen Antrieben (neue Otto- und Diesel-Pkw) wieder eingespart werden können.**

In Abbildung 34 sind wiederum die Autokosten für Autogas-, Otto- und Diesel-Pkw, dieses Mal allerdings die Anschaffungskosten für Neuwagen plus Kraftstoffkosten für

34 AUTOGAS-NEUWAGEN: WIRTSCHAFTLICHKEIT UND AMORTISATION



unterschiedliche Kraftstoffpreisszenarien, sowie die jeweiligen Pkw-Gesamtfahrleistungen aufgetragen. Bei den Autokostenstrukturen eines Niedrigpreisszenarios würde sich die Anschaffung eines Autogas-Pkw gegenüber einem Benzin nach weniger als 70.000 km Pkw-Gesamtfahrleistung mit Autogas amortisieren – etwas früher als die Autogas-Umrüstung, da die Zusatzkosten für ein Autogasfahrzeug etwas niedriger sind als diejenigen für die Autogas-Umrüstung. Im Hochpreisszenario würde sich die Umrüstung bereits nach ca. 55.000 km Pkw-Gesamtfahrleistung rechnen. Je nach Jahresfahrleistung würden

für die Amortisation einer Autogas-Zusatzausstattung für einen Autogas-Pkw sechseinhalb bzw. fünf Jahre (Otto) oder dreieinhalb bzw. sogar weniger als drei Jahre (Diesel) benötigt.

Da die angenommenen Anschaffungskosten für neue Autogas- und Diesel-Pkw etwa auf gleicher Höhe liegen, wird die ökonomische Vorteilhaftigkeit beider Antriebsalternativen ausschließlich von Antriebs- und Kraftstoffkosten bestimmt. Beides findet Niederschlag in den Energiekosten bezogen auf die Pkw-Fahrleistung. Und hier ist der Autogas-Pkw

zwar weniger effizient, Autogas aber derart günstiger als Diesel, dass die Betriebskosten für das Autogasfahrzeug immer noch etwas niedriger sind als die für den Diesel. Die beiden Autokostenkurven für Autogas- und Diesel-Pkw starten im gleichen Y-Achsen-Abschnitt, weisen aber unterschiedliche Steigungen auf – schneiden sich also nicht. Die Amortisationskurve verläuft, wenn auch knapp, stets im positiven Bereich. Autogas-Pkw rechnen sich gegenüber Diesel-Pkw mit anderen Worten bereits von Anfang an – allerdings ist der wirtschaftliche Vorteil des Autogasfahrzeugs gegenüber dem Diesel eher klein.

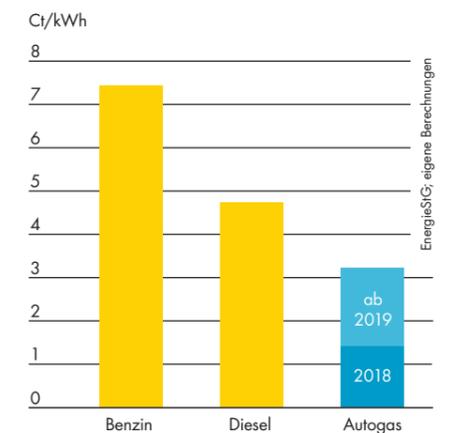
7.3 ENERGIESTEUER UND WIRTSCHAFTLICHKEIT

Die Tankstellenpreise hängen bei Autogas ebenso wie für Otto- und Dieseldieselkraftstoff von einer Vielzahl von Faktoren ab. Ein wichtiger Bestimmungsfaktor für den Endverbraucherpreis von Energieerzeugnissen, insbesondere aber von Kraftstoffen für den Straßenverkehr, sind Energiesteuern. Bei Otto- und Dieseldieselkraftstoff macht die Energiesteuer nahezu die Hälfte des Endverbraucherpreises an der Tankstelle aus. Das jährliche Steueraufkommen aus Energiesteuern in Deutschland lag zuletzt bei rund 42 Milliarden Euro; darunter 16 Milliarden Euro für Otto- und 19 Milliarden Euro für Dieseldieselkraftstoffe; für Flüssiggas wurden unabhängig vom Verwendungszweck dagegen nur 173 Millionen Euro Energiesteuer entrichtet (Destatis 2014).

Die Energiesteuer ist eine Mengensteuer auf als Kraft- oder Heizstoff verwendete Energieerzeugnisse; sie wird als fester Betrag auf Mengen bzw. Volumina – bei Kraftstoffen in der Regel Liter oder Kilogramm – des jeweiligen Energieerzeugnisses erhoben. Auf die Verbrauchssteuer für Energieerzeugnisse selbst wird wiederum die geltende Umsatzsteuer (Normaltarif 19%) aufgeschlagen. Die Besteuerung von Energieerzeugnissen wird seit 2006 vom Energiesteuergesetz (EnergieStG), früher vom Mineralölsteuergesetz, geregelt. Danach ist die Höhe der Besteuerung von ihrer Beschaffenheit und Verwendung abhängig.

Aktuell werden gem. § 2 Absatz 1 Energiesteuergesetz folgende Normalsteuersätze auf Otto- und Dieseldieselkraftstoff erhoben: 65,45 Ct/l auf schwefelfreies Benzin (E5), das

35 ENERGIESTEERN



entspricht etwa 7,4 Ct/kWh sowie 47,04 Ct/l bzw. 4,7 Ct/kWh auf schwefelfreies Diesel (B7) – Angaben jeweils ohne Mehrwertsteuer.

Für Flüssig- und Erdgase gelten bis zum 31. Dezember 2018 ermäßigte Energiesteuersätze: für Autogas 180,32 Euro je 1.000 Kilogramm bzw. 18,03 Cent pro Kilogramm (Ct/kg), umgerechnet sind das etwa 10 Cent pro Liter Autogas und ca. 1,4 Ct/kWh (jeweils ohne Mehrwertsteuer). Der ermäßigte Energiesteuersatz für Autogas liegt somit rund 80% unter demjenigen von Ottokraftstoff sowie circa 70% unter demjenigen von Dieselmotorkraftstoff (vgl. Abb. 35).

Nach geltender Gesetzeslage würde die Energiesteuer auf Flüssiggas jedoch vom 1.1.2019 an von 18 Ct/kg auf dann 40,9 Ct/kg ansteigen. 40,9 Ct/kg entsprechen einem Steuersatz von 22,5 Ct/l bzw. 3,2 Ct/kWh (ohne Mehrwertsteuer). Die energiesteuerliche Begünstigung von Flüssiggas als Kraftstoff sinkt somit von 80% auf etwa 45% gegenüber Ottokraftstoff bzw. von 70% auf nur noch gut 30% gegenüber Dieselmotorkraftstoff.

Zwar soll die bis Ende 2018 befristete Energiesteuerermäßigung für Autogas (und Erdgaskraftstoff) auch über 2018 hinaus verlängert werden (CDU/CSU/SPD 2013). Die legislative Umsetzung steht jedoch noch aus. Für den Verbraucher stellt sich die Frage: **Welchen Einfluss hat die Steuerpolitik auf die Wirtschaftlichkeit seiner Investitionsentscheidung in eine eventuelle Umrüstung oder die Anschaffung eines Autogas-Neufahrzeugs?**

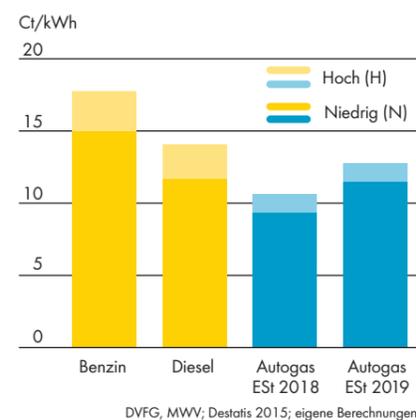
In wettbewerblichen Märkten würde sich die reduzierte Steuerermäßigung mehr oder weniger direkt auf die Marktpreise auswirken. Für Zwecke der Autokosten-Analyse wird

davon ausgegangen, dass sich die Autogaspreise um den Betrag der Reduzierung der Steuerermäßigung erhöhen. Bezogen auf das Produkt Autogas ergibt sich hieraus letztlich eine Energiesteuererhöhung, auf die zudem noch ein Mehrwertsteuersatz von 19% aufzuschlagen ist.

Für die Autokosten der Variante Energiesteuer 2019 ergibt sich damit ein Aufschlag von rund 15 Ct/l bzw. gut 2 Ct/kWh gegenüber den zuvor im Niedrig- und Hochpreisszenario angenommenen Autogaspreisen. Auch wenn der Preisvorteil deutlich abnimmt, ist Autogas bezogen auf den Energiegehalt mit reduzierter Steuerermäßigung in beiden Preiswelten, hoch wie niedrig, noch günstiger als Benzin (vgl. Abb. 36). Allerdings wäre Autogas kaum noch günstiger als Dieselmotorkraftstoff.

In der Autokostenberechnung muss zusätzlich die Antriebsleistung berücksichtigt werden. Bezogen auf die Fahrleistung weist der Autogas-Pkw immer noch günstigere Energiekosten als ein vergleichbares Ottofahrzeug auf. Da der Energiekostenvorteil pro km jedoch sinkt, mit anderen Worten die Deckungsbeiträge pro gefahrenen Kilometer um 30 bis 40% geringer ausfallen, verlängern sich die Payback-Perioden bzw. Amortisationslaufzeiten für die zusätzlichen Anschaffungskosten für die Autogas-Umrüstung eines Benziners oder die Autogas-Erstausstattung: Bei niedrigen Kraftstoffpreisen müssen etwa 120.000 km (statt etwa 70.000) und bei hohen Kraftstoffpreisen mindestens 80.000 km (statt bisher 55.000 bis 60.000) gefahren

36 KRAFTSTOFFPREISE



werden. Bei Autogas-Umrüstungen von gebrauchten Otto-Pkw kann damit fall- bzw. teilweise die Restlebensdauer des Fahrzeugs erreicht oder sogar überschritten werden.

Gegenüber dem Dieselfahrzeug war der bisherige Energiekostenvorteil pro gefahrenem Kilometer schon sehr gering – unter 1 Ct/km. Im Gefolge einer erhöhten Autogas-Energiesteuer 2019+ wären die entfernungs-spezifischen Energiekosten des Autogas-Fahrzeugs, wenn auch nur geringfügig (ebenfalls weniger als 1 Ct/km), nun etwas höher als diejenigen eines alternativen Dieselmotorkraftstoff-Fahrzeugs; ihre Autokostenkurven schneiden die Y-Achse auf gleicher Höhe. Da die Steigung der Autokostenkurve für Dieselmotorkraftstoff dann jedoch etwas flacher verläuft als diejenige für Autogas-Pkw, wäre der Dieselmotorkraftstoff von Anfang an wirtschaftlich vorteilhafter als das Autogasfahrzeug.

7.4 AUTOGAS – EINE WIRTSCHAFTLICHE ALTERNATIVE?

Aus dem Autokosten-Vergleich lassen sich folgende robuste Schlussfolgerungen ziehen: Die Wirtschaftlichkeit von Autogas hängt von Mehrkosten für Autogastechnik, von der Antriebsleistung, von den Kraftstoffpreisen sowie von den Pkw-Fahrleistungen ab. Umgerüstete und neue Autogas-Pkw sind in der Regel eine wirtschaftliche Alternative im Vergleich zu Otto-Pkw; teilweise sind sie aber auch als Neuwagen eine Alternative zum Dieselmotorkraftstoff-Pkw.

Bei einem höheren Kraftstoffpreisniveau ist der Energiekostenvorteil von Autogas-Pkw pro Fahrzeugkilometer größer als bei niedrigen Kraftstoffpreisen. Sowohl Autogas-Umrüstung als auch Neuwagenerwerb lohnen sich im Vergleich zum Otto-Pkw. Gegenüber einem preisgleichen Dieselmotorkraftstoff-Neuwagen besteht heute, trotz der höheren Antriebsleistung des Dieselmotorkraftstoff-Antriebs, grundsätzlich ein (kleiner) Energiekostenvorteil.

Zu den wichtigsten Rahmenbedingungen für die wirtschaftliche Attraktivität von Autogas gehört die **Energiesteuer** auf Kraftstoffe (WLPGA 2014). Würde die heutige Steuerermäßigung auf Autogaskraftstoffe – wie (noch) im Energiesteuergesetz vorgesehen – ab 2019 substantiell abgeschmolzen, verlängerte sich die Break-even-Fahrleistung für eine Autogas-Investition wesentlich. Gegenüber einem effizienteren Dieselmotorkraftstoff-Pkw wäre ein Autogas-Neuwagen dann nicht mehr wettbewerbsfähig.

Ohne ausreichende wirtschaftliche Anreize und planbare verlässliche Rahmenbedingungen könnte die für einen lebensfähigen Autogasmarkt notwendige kritische Masse (an Fahrzeugen und Infrastruktur) unter Umständen nicht mehr erreicht oder gehalten werden.

In Deutschland fährt eine der größten Autogas-Flotten Europas, die in der jüngeren Vergangenheit stark ausgebaut wurde. Nach einem rasanten Aufschwung im vergangenen Jahrzehnt war die Zahl der in Deutschland zugelassenen Autogas-Pkw zuletzt wieder leicht rückläufig.

Im Rahmen der Shell Pkw-Studie 2014 (Shell 2014) wurden mit Hilfe eines Pkw-Kohortenmodells und Szenariotechnik mögliche Antriebsmixe für den Pkw-Bestand bis 2040, darunter auch Gasantriebe, entwickelt. Zudem wurde die Nachhaltigkeit des Pkw-Verkehrs in Deutschland, gemessen an Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen, erforscht.

Im Folgenden wird – wiederum mit Hilfe des Kohortenmodells für den Pkw-Bestand und der Szenariotechnik aus der Shell Pkw-Studie – vertieft untersucht, wie sich

8.1 AUTOGAS-PKW-FLOTTE (HEUTE)

Ein Großteil der Pkw, die heute mit Autogas angetrieben werden, wurden ursprünglich als Benzin-Pkw zugelassen. Die Umrüstung findet meist erst nach einigen Jahren statt. Dadurch unterscheidet sich die Altersstruktur der Autogas-Pkw deutlich von der des gesamten Pkw-Bestands (vgl. Abb. 37).

Das Durchschnittsalter der Pkw mit Autogas-Antrieb liegt mit 9,5 Jahren über dem Durchschnittsalter aller Pkw (8,8 Jahre). Deutlicher fällt der Unterschied bei gewerblich gehaltenen Pkw aus. Hier sind Autogas-Pkw mit 6,8 Jahren im Schnitt deutlich älter als der durchschnittliche gewerblich gehaltene Pkw (4,1 Jahre). Der Autogas-Antrieb wird jedoch hauptsächlich von privaten Haltern eingesetzt – der Anteil gewerblicher Halter liegt bei nur 4,3% statt bei rund 10% im Pkw-Gesamtbestand (KBA 2015b).

In der Häufigkeitsverteilung nach Fahrzeugalter dominieren nicht die jüngsten Jahrgänge, sondern „mittelalte“ Autogas-Pkw, was auf das hohe Niveau der Pkw-Umrüstungen im Zeitraum 2005 bis 2010 zurückzuführen ist. Nur ein Zehntel der Pkw mit Autogasantrieb ist jünger als fünf Jahre. Der entsprechende Anteil über den Pkw-Gesamtbestand liegt doppelt so hoch.



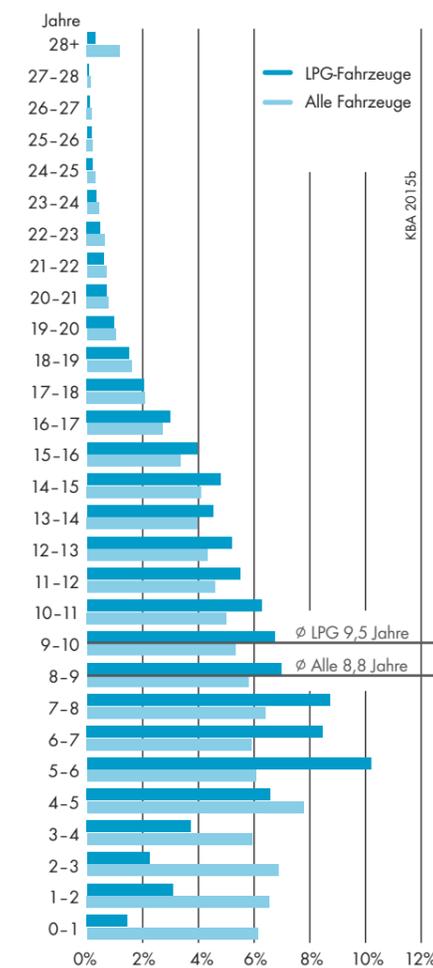
der Bestand von Autogas-Pkw zukünftig entwickeln könnte und welchen Einfluss dies auf die Nachfrage nach Autogaskraftstoffen und auf die Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs haben könnte. Zuvor

werden für die Szenarienentwicklung sowie die Ableitung von Aussagen zu Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen wichtige Charakteristika des deutschen Autogas-Pkw-Bestandes zusammengefasst.

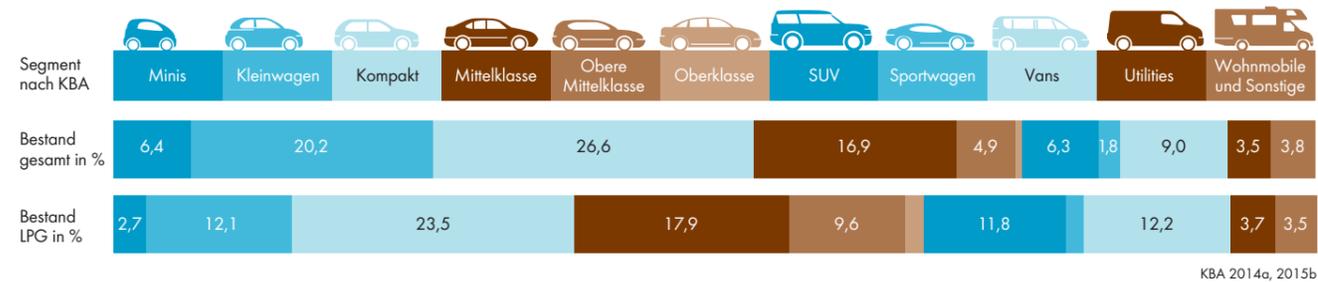
Die Anzahl der Umrüstungen von Benzin zu Autogas-Pkw wird nicht statistisch erhoben und lässt sich nur indirekt über den Fahrzeugbestand und die Neuzulassungen schätzen. Mittels des Pkw-Kohortenmodells wurden dafür der Pkw-Bestand, die Neuzulassungen und die Umrüstungen zu Autogas-Pkw in der Vergangenheit nachgebildet. Die jährlichen Umrüstungen in den letzten Jahren lassen sich mit diesem Vorgehen auf durchschnittlich rund 58.000 Fahrzeuge schätzen. Der Anteil der ursprünglich als Autogas-Pkw neu zugelassenen Fahrzeuge liegt nach den modellgestützten Schätzungen bei rund 10%. Ferner werden Autogas-Antriebe überwiegend bei hohen Jahresfahrleistungen eingesetzt. Im Pkw-Modell legen Autogasfahrzeuge rund 21.000 Fahrzeugkilometer pro Jahr zurück und fahren damit sogar etwas mehr als Pkw mit Dieselmotorkraftstoff.

Im Hinblick auf die Fahrzeugsegmente dominiert bei Autogas-Neuzulassungen die Kompaktklasse vor SUV und Geländewagen. Im Autogas-Pkw-Bestand (rund 500.000 Pkw) liegt die Kompaktklasse mit über 100.000 Pkw vor der Mittelklasse mit rund 90.000 Einheiten. Im Vergleich zum Pkw-Bestand insgesamt (ca. 44 Millionen Pkw) sind Autogasfahrzeuge weniger zahlreich bei Klein- und Kleinstwagen, stärker dagegen in der oberen Mittelklasse sowie bei SUV und Vans

37 ALTERSSTRUKTUR PKW-BESTAND: ALLE FAHRZEUGE VS. LPG (2014)



38 SEGMENTSTRUKTUR DES PKW-BESTANDS IN DEUTSCHLAND ZUM 1.1.2014



vertreten. Im Pkw-Gesamtbestand und auch im Autogas-Bestand sind jedoch Kompaktfahrzeuge mit 24 % bzw. 27 % das bedeutendste Fahrzeugsegment (vgl. Abb. 38).

8.2 AUTOGAS-PKW-SZENARETTEN

In der Shell Pkw-Studie 2014 wurde unter anderem ein Trendszenario entwickelt, welches die automobilen Trends bei Pkw-Antrieben und Kraftstoffen bis 2040 fortschreibt; daran angelehnt wurde zudem – anhand eines kleineren Gasszenarios – ein beschleunigter Ausbau von Gasantrieben und Gaskraftstoffen betrachtet. In Anlehnung an Trend- und Gasszenario der Shell Pkw-Studie werden im Folgenden zwei Szenariovariationen (Szenarettten) bis 2030 untersucht, denen die folgenden Annahmen zu Grunde liegen:

In einer **Pro-Autogas-Szenarettte** wird von Seiten der Politik zeitnah eine Verlängerung des geltenden reduzierten Energiesteuersatzes auf Autogas beschlossen. Die Vielfalt von Neufahrzeugen mit Autogas-Antrieb steigt und alle gängigen Pkw-Modelle können auch umgerüstet werden. Zudem lassen höhere

Energie- und Kraftstoffpreise die Verbraucher nach Möglichkeiten suchen, Treibstoffkosten zu sparen – und dazu gehört auch Autogas.

In der **Contra-Autogas-Variante** wird der Energiesteuersatz für Autogas deutlich angehoben. Darüber hinaus werden nur noch vereinzelt neue Modelle mit Autogas-Antrieb von Fahrzeugherstellern und auch deutlich weniger Umrüstungen angeboten. Überdies verharren die Energie- und Kraftstoffpreise auf einem allgemein niedrigeren Niveau, sodass alternative Antriebe und Kraftstoffe kaum wettbewerbsfähig sind.

In der Pro-Autogas-Szenarettte steigen die Autogas-Neuzulassungen von gut 6.000 bis 2030 auf 44.000 Fahrzeuge pro Jahr an. Die Umrüstungen werden über den gesamten Szenariohorizont als konstant auf dem hohen durchschnittlichen Niveau der Jahre 2007 bis 2013 von 57.000 pro Jahr angenommen. Insgesamt erhöht sich damit der jährliche Autogas-Pkw-Zuwachs (brutto) um gut ein Drittel. Der Autogas-Pkw-Bestand verdoppelt sich in der Folge von heute rund 500.000 auf über eine Million Fahrzeuge im Jahre 2030.

In der Contra-Szenarettte werden ab 2020 keine Fahrzeuge mehr auf Autogas umgerüstet oder mit Autogasantrieb neu zugelassen. Ohne Neuzulassungen und/oder Umrüstungen wird der Autogas-Pkw-Bestand durch die jährlichen endgültigen Stilllegungen bestimmt. Der Pkw-Bestand an AutogASFahrzeugen sinkt folglich in den kommenden 15 Jahren um die Hälfte auf rund 250.000 Fahrzeuge.

Das Durchschnittsalter der Autogas-Pkw der Pro-Szenarettte bleibt trotz deutlich erhöhter Neuzulassungen aufgrund der Altersstruktur des Bestands und dem sich ändernden Verhältnis von Neuzugängen zum Bestand nahezu konstant bei 10 Jahren. Im Vergleich dazu steigt im Trendszenario (Shell 2014) das Durchschnittsalter aller Pkw auf fast 11 Jahre – Autogas-Pkw werden also relativ jünger in der Pro-Szenarettte. Dagegen läge das durchschnittliche Alter von Autogas-Pkw in der Contra-Szenarettte, nachdem 10 Jahre lang keine neuen Autogas-Pkw zugelassen oder umgerüstet wurden, im Schnitt bei rund 20 Jahren.

In der Pro-Szenarettte verdoppelt sich mit dem Autogas-Fahrzeugbestand auch die Fahrleistung von Autogas-Pkw insgesamt auf 21 Milliarden Fahrzeugkilometer. In der Contra-Szenarettte sinkt aufgrund des zunehmenden Fahrzeugalters auch die durchschnittliche Jahresfahrleistung pro Pkw. In der Folge geht die Gesamtfahrleistung der Autogas-Pkw um drei Viertel auf insgesamt 2,5 Milliarden Fahrzeugkilometer pro Jahr zurück.

8.3 ENERGIEVERBRAUCH UND TREIBHAUSGASEMISSIONEN

Zuletzt ist die Nachhaltigkeit von Autogas-Pkw zu untersuchen: Welche Mengen Autogas ersetzen heute und in Zukunft Benzin- und Dieselmotoren für Pkw? Welche Einsparungen an CO₂-Emissionen werden dadurch erreicht?

Die meisten Autogas-Pkw werden vom Benzin umgerüstet. Primäres Ziel ist es, Treib-

stoffkosten zu sparen, insbesondere bei hohen Fahrleistungen, wie sie auch für den Dieselpkw typisch sind. Anstelle der Umrüstung eines Otto-Pkw auf Autogas kann auch der Kauf eines gebrauchten Dieselpkw eine Option sein. Bei Neuwagen steht der Dieselantrieb ohnehin zusätzlich zur Wahl. In der folgenden Abschätzung wird daher davon ausgegangen, dass von drei Autogas-Pkw je zwei Pkw mit Benzinantrieb und einer mit Dieselantrieb fahren würden, wenn die Option Autogas nicht zur Verfügung stünde.

Für das Ausgangsjahr 2014 und den Zeitpunkt 2030 wird für die beiden Autogas-Szenarettten jeweils untersucht, welche Mengen an Autogas verbraucht werden und welche Einsparungen an Otto- und Dieselmotoren damit verbunden sind (Abb. 40). Derzeit werden von den rund 500.000 Autogas-Pkw etwa 28 Petajoule (PJ) Otto- und Dieselmotoren durch Autogas substituiert, dies entspricht dem Energieinhalt von rund 880 Millionen Liter Benzinäquivalent. Insgesamt wurden 2014 rund 1600 PJ Endenergie bzw. 50 Milliarden Liter Benzinäquivalent von Pkw in Deutschland verbraucht.

Wächst der Bestand von AutogASFahrzeugen in den kommenden 15 Jahren auf eine Million Pkw, würden 40 PJ (ca. 1,3 Milliarden Liter Benzin-Äquivalent) von dann knapp 1100 PJ (34 Milliarden Liter Benzin-Äquivalent) Otto- und Dieselmotoren substituiert. Aufgrund der zunehmenden Fahrzeugeffizienz führt die Verdoppelung des Bestandes nicht zu einer Verdoppelung der Kraftstoffsubstitution. In der Contra-Szenarettte substituieren 250.000 Fahrzeuge nur noch 6,4 PJ (200 Millionen Liter Benzin-Äquivalent), was auch am hohen Fahrzeugalter und entsprechend geringeren Pkw-Fahrleistungen liegt. Die Energiemenge des Autogases liegt etwas höher als die des substituierten Benzin- und Dieselmotoren gegenüber Benzinern.

Analog zum Energieverbrauch kann auch die Wirkung der Autogas-Pkw auf die Treibhausgasemissionen des Pkw-Verkehrs ermittelt werden: Dabei ist zu berücksichtigen, dass den fossilen Kraftstoffen Benzin und Diesel heute Biokraftstoffe beigemischt werden; der energetische Anteil biogener Kraftstoffe schwankt seit einigen Jahren zwischen 5,5 und 6,0%. Der Biokraftstoffanteil könnte künftig weiter steigen oder die beigemischten

Biokraftstoffe könnten sich qualitativ verändern durch geringere spezifische Treibhausgasemissionen pro Energieeinheit. Um die Auswirkung von Autogas von der Wirkung geänderter Biokraftstoffe zu isolieren, wurde mit hypothetischen konstanten Biokraftstoffbeimischungen auf heutigem Niveau und mit konstanten spezifischen Treibhausgasfaktoren für Biokraftstoffe gerechnet.

Flüssiggas könnte anstatt aus Raffinerien künftig vermehrt aus der Gasförderung bereitgestellt werden. Insbesondere in der Pro-LPG-Szenarettte könnten die Vorkettenemissionen aus der Bereitstellung von Autogas sinken – und damit die WtW-Emissionen von Autogas dann unter denjenigen von Otto- und Dieselmotoren liegen.

2014 ermöglichten die rund 500.000 Autogas-Pkw im Vergleich zu 500.000 Otto- und Dieselfahrzeugen (im Verhältnis 2:1) eine Minderung der WtW-Emissionen von knapp 17.000 Tonnen CO₂ pro Jahr. Dabei wurde unterstellt, dass der heutige Biokraftstoffmix in Otto- und Dieselmotoren (E5, E10 und B7) eingesetzt wird.

In der Pro-Autogas-Szenarettte verdoppelt sich die Anzahl der Autogas-Pkw auf eine Million. Durch die gestiegenen Neuzulassungen werden die Fahrzeuge (Otto-, Diesel- und Autogas-Pkw) im Durchschnitt deutlich effizienter. Die Treibhausgaseinsparungen durch AutogASFahrzeuge wachsen – unter Berücksichtigung der Effizienzsteigerung – bis 2030 auf etwa 250.000 Tonnen CO₂ pro Jahr an; ohne Effizienzverbesserung würde die Treibhausgaseinsparung auf

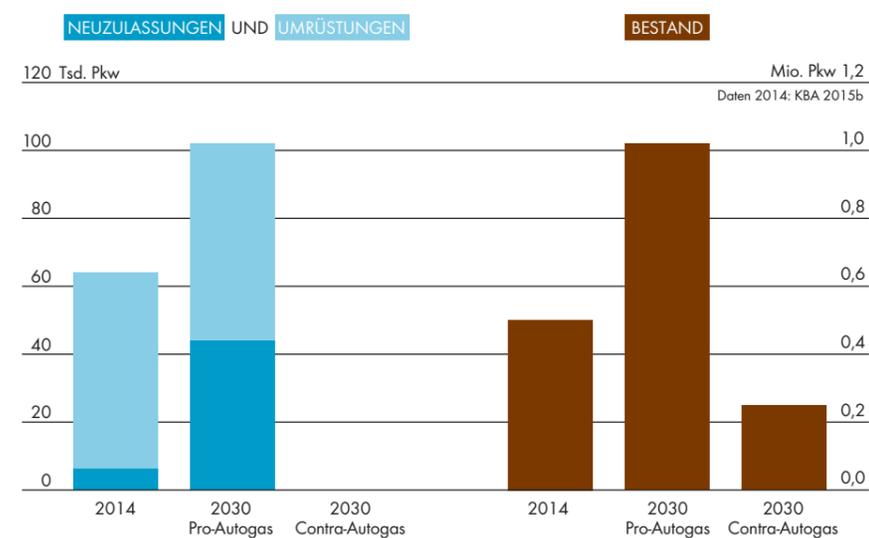
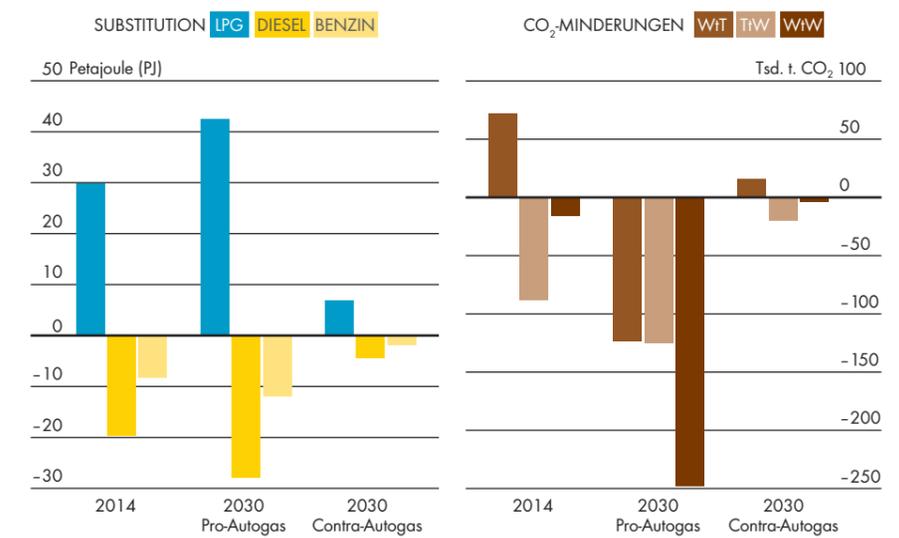
rund 360.000 Tonnen CO₂ ansteigen. Die Well-to-Wheels-Treibhausgasemissionen von einer Million Pkw könnten um ca. 7,5% reduziert werden, wenn Otto- und Dieselfahrzeuge im Verhältnis 2:1 durch Autogas-Pkw 2030 ersetzt würden.

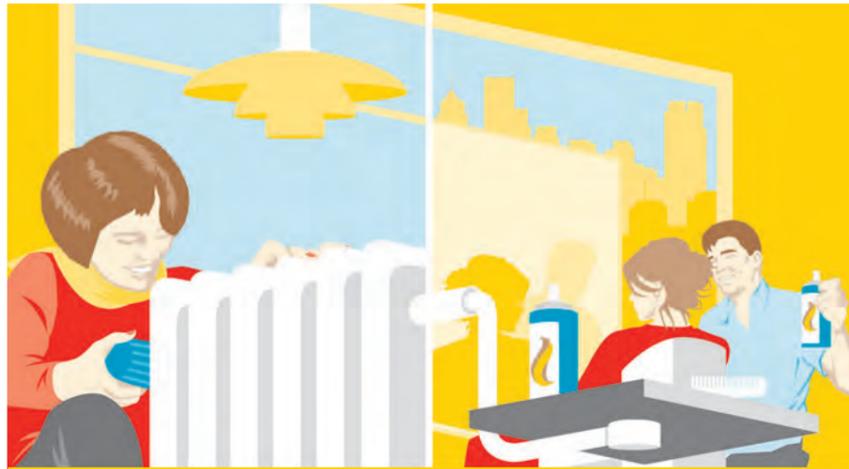
In der Contra-Autogas-Szenarettte sinken die Treibhausgasminderungen bis 2030 auf insgesamt weniger als 4.000 Tonnen CO₂ pro Jahr. Gründe sind die Halbierung des Autogas-Pkw-Bestands und das hohe durchschnittliche Fahrzeugalter, was sich in niedrigen Pkw-Fahrleistungen widerspiegelt.

Bei einer noch stärkeren Expansion der Autogas-Flotte als in der Pro-Szenarettte könnten die Treibhausgasemissionen noch deutlicher reduziert werden. Allerdings stellt schon das Erreichen von einer Million Autogas-Pkw einen ehrgeizigen Entwicklungspfad dar. Im Vergleich zu den WtW-Emissionen aller Pkw (heute rund 132 Millionen Tonnen CO₂ und 2030 rund 90 Millionen Tonnen) bleibt das Minderungspotenzial durch den Einsatz von Autogas begrenzt. Zum Vergleich: Um die heute im Pkw-Verkehr durch Biokraftstoffe erzielte WtW-CO₂-Minderung (ca. 4,5 Millionen Tonnen) zu erzielen, müsste der Autogas-Pkw-Bestand auf gut 18 Millionen wachsen.

Dennoch bleibt für Pkw-Besitzer der Einsatz von Otto-Pkw mit Autogas – insbesondere auch im Vergleich zu neuen elektrischen Antrieben – eine kostengünstige Alternative, mit der sie zusätzlich zur Energiediversifizierung und Treibhausgasminderung des Pkw-Verkehrs beitragen können.

39 NEUZULASSUNGEN, UMRÜSTUNGEN UND BESTAND, 2014 UND 2030

40 KRAFTSTOFF-SUBSTITUTION UND CO₂-MINDERUNGEN DURCH AUTOGAS



ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

In den vergangenen Jahren hat Shell verschiedene Szenario-Studien erstellt: zum einen für die Energieverbrauchssektoren Pkw- und Lkw-Verkehr sowie die Hauswärmeversorgung privater Haushalte, zum anderen Studien über den Stand und die Perspektiven bestimmter Energieträger und Kraftstoffe, insbesondere Biokraftstoffe und Erdgas.

Ein bislang wenig beachteter Energieträger ist Flüssiggas. Es wird in allen Verbrauchssektoren für unterschiedlichste Anwendungen – energetische und stoffliche – eingesetzt. Dabei hat die Verwendung von Flüssiggas in der jüngeren Vergangenheit weltweit und in Deutschland stetig zugenommen. Gleichzeitig verbessert sich die globale Versorgung mit Flüssiggas und damit seine Verfügbarkeit.

In einer weiteren Energieträger-Studie befasst sich Shell daher mit dem aktuellen Stand der Flüssiggasnutzung, von Flüssiggas-Anwendungstechnologien sowie mit der Frage, welche Potenziale und Perspektiven Flüssiggas vor allem als Energieträger besitzt. Neben nicht-automobilen Anwendungen steht der Einsatz von Flüssiggas im Straßenverkehr im Fokus, und hier speziell in Pkw als Autogas.

WAS IST FLÜSSIGGAS?

Unter dem Begriff Flüssiggas fasst man aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften im Wesentlichen die beiden Gase **Propan** (C_3H_8) und **Butan** (C_4H_{10}) sowie deren Gemische zusammen. Beide Gase liegen schon bei relativ geringem Druck von weniger als 9 bar bei Raumtemperatur flüssig vor – daher werden sie auch **Flüssiggase** genannt. Propan und Butan sind beide kurzkettenige gesättigte Kohlenwasserstoffe (Alkane). Durch ihre stofflichen und verbrennungstechnischen Eigenschaften bieten Flüssiggase vielfältige Anwendungsmöglichkeiten.

Flüssiggas ist nicht gleichzusetzen mit **verflüssigtem Erdgas** (LNG, Liquefied Natural Gas) oder komprimiertem Erdgas (CNG, Compressed Natural Gas), die beide hauptsächlich aus dem Gas Methan (CH_4) bestehen und entweder tiefkalt oder unter hohem Druck gespeichert werden. Im deutschsprachigen Raum werden anstelle von Flüssiggas je

nach Anwendungsbereich häufig die Begriffe „Autogas“ und „Treibgas“ benutzt. International wird Flüssiggas als Liquefied Petroleum Gas (LPG) bezeichnet.

HERKUNFT UND MÄRKTE

Wesentliches Merkmal von Flüssiggasen ist, dass sie in der Regel **kein Hauptprodukt** sind, sondern zusammen mit anderen Gasen und Kohlenwasserstoffen meist als **Neben- oder Koppelprodukt** vorkommen. Sie fallen bei der Rohöl- und Erdgasförderung und bei der Rohölverarbeitung zu Mineralölprodukten an. Weltweit stammen rund **60% aus der Erdgasförderung** und etwa **40% aus der Rohölverarbeitung bzw. Raffinerieerzeugung**. In Westeuropa dominiert die Rohölverarbeitung; in Deutschland kann der Raffinerieanteil der Flüssiggasproduktion sogar auf 95% geschätzt werden.

Bei der Rohölförderung anfallende Gase werden auch **Erdölbegleitgas** (Associated

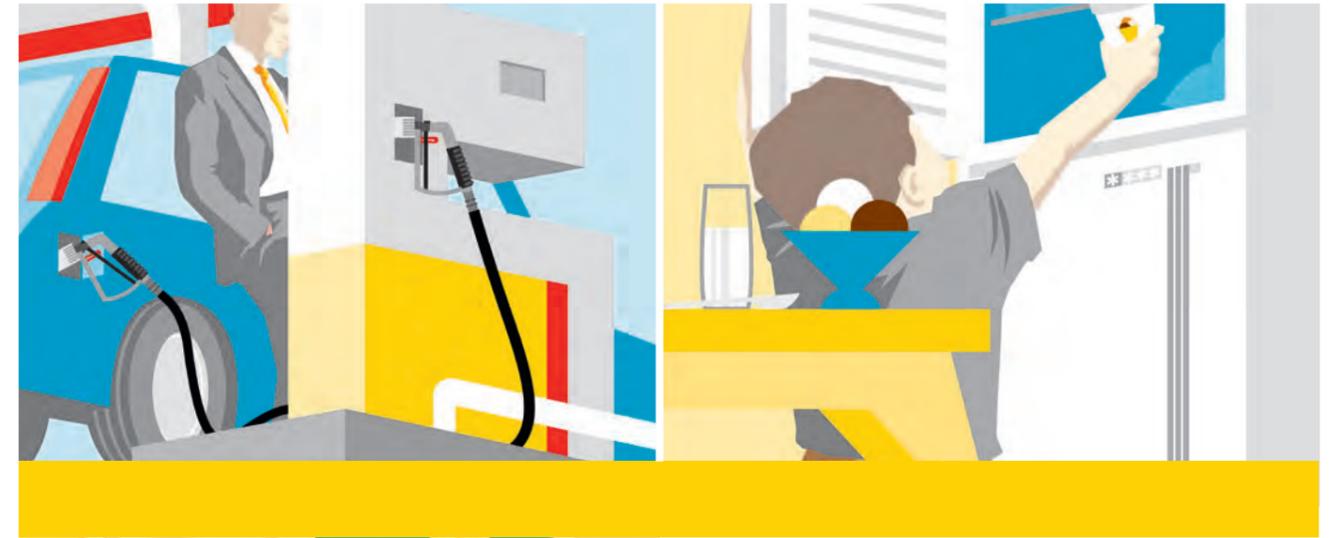


Petroleum Gas) genannt. Bei der Erdgasförderung werden oftmals auch flüssige Kohlenwasserstoffkomponenten, so genannte **Natural Gas Liquids** (NGLs), zusammen mit dem Erdgas zutage gefördert. Sowohl aus Begleitgasen als auch aus „Gasflüssigkeiten“ können Flüssiggase gewonnen werden. Vor allem NGLs spielen für die globale Öl- und Gasversorgung eine zunehmend wichtigere Rolle; ihr Anteil an der Öl- bzw. Gasförderung macht derzeit 15 bzw. 20% aus.

Weiterhin sind Flüssiggase als eines der leichtesten Mineralölprodukte fester Bestandteil der Rohölverarbeitung; ihr Anteil am Raffinerie-Output liegt bei 2,5 bis 3%. Darüber hinaus kann Flüssiggas auch aus Biomasse hergestellt werden; biogenes Flüssiggas spielt bislang im Markt jedoch noch keine Rolle.

Der mit Abstand **größte Flüssiggasproduzent** sind die **USA** mit rund 60 Millionen Jahrestonnen; in den USA fallen substantielle LPG-Mengen bei der Förderung unkonventioneller Erdgase an. Den USA folgen Öl- und Gasproduzenten des Mittleren Ostens, China und Russland. Zu den größten LPG-Verbrauchern gehören neben den USA, China und Saudi-Arabien vor allem asiatische Länder wie Japan, Indien, Thailand und Südkorea.

Ein wichtiger Abnehmer von Flüssiggasen ist die **Petrochemie**. Zur Herstellung petrochemischer Zwischenprodukte (wie Ethylen und Propylen) werden Flüssiggase als Ausgangsstoffe (Feedstocks) eingesetzt. Fast die Hälfte des globalen Flüssiggasangebotes wird vom Haushaltssektor für Heizen und Kochen verwendet. Der Verkehrssektor steht dagegen



nur für rund ein Zehntel des weltweiten Flüssiggasverbrauchs; Schwerpunkte von Flüssiggas-Verkehrsanwendungen sind Asien und Europa.

In Deutschland wurden 2013 rund 3,4 Millionen Tonnen Flüssiggas abgesetzt; rund 2,6 Millionen Tonnen Flüssiggas stammen aus deutschen Raffinerien. Der Inlandsverbrauch von Flüssiggas ist seit 2000 um etwa 20% gestiegen; zusätzliche Flüssiggasmengen fragten insbesondere die Petrochemie und der Verkehrssektor nach.

NORMEN, STANDARDS, TECHNISCHE REGELN

Flüssiggase kommen weder bei der Öl- und Gasförderung noch bei der Raffinerieerzeugung in Reinform vor. Meist enthalten sie auch andere Kohlenwasserstoffe, Begleitstoffe sowie auch Verunreinigungen. Daher gibt es ähnlich wie für andere Produkte auch eine Vielzahl von Standards, Normen und technischen Regeln, welche Anforderungen an Flüssiggas und den Umgang mit ihm festlegen.

Viele Flüssiggasstandards beziehen sich auf bestimmte Anwendungen. Am weitesten fortgeschritten ist die Entwicklung von Flüssiggasstandards im Kraftverkehr. Zwar gibt es für gasförmige Kraftstoffe keine globalen Normen, wohl aber eine europäische Autogas-Norm, die in deutsches Recht umgesetzt wurde (**DIN EN 589**). Für nicht-automobile Anwendungen kommen bislang lediglich nationale Produkt-Normen zur Geltung, in Deutschland die **DIN-Norm 51622**. Beim Einsatz von Flüssiggas in öffentlichen

Gasnetzen müssen bestimmte Qualitätsanforderungen für Brenngase erfüllt werden. Zudem müssen Betreiber von Flüssiggasanlagen die **Technischen Regeln Flüssiggas** einhalten.

Produkt-Standards bestimmen direkt die Zusammensetzung von Flüssiggasen, etwa durch das Festsetzen von Mindest- und Höchstanteilen einzelner Komponenten. Zudem legen Standards bestimmte Eigenschaften wie Dichte, Dampfdruck oder Volatilität fest. Ziel ist es, Produkthandel und einen sicheren, technisch einwandfreien und umweltschonenden Umgang mit Flüssiggasen zu ermöglichen.

NICHT-AUTOMOBILE ANWENDUNGEN

Flüssiggase werden in fast allen Verbrauchssektoren in nahezu allen Weltregionen für unterschiedlichste Anwendungen eingesetzt. Zu unterscheiden sind energetische und nicht-energetische bzw. stoffliche Anwendungen.

Als Energieträger werden Flüssiggase – außer im Kraftverkehr – zum Kochen, zum Heizen von Wohnungen, für die Warmwasserbereitung, aber auch zur Wärmeerzeugung für Arbeitsprozesse genutzt. Oftmals spielt die Flexibilität der Energieversorgung eine zentrale Rolle. Da Flüssiggase gut speicher- und transportierbar sind, können sie auch an Standorten, die nicht an öffentliche Energienetze angebunden sind, eingesetzt werden. Flüssiggase werden daher auch als **„mobiler Energieträger“** bezeichnet. In Deutschland spielt Flüssiggas bei der Wärmeerzeugung in privaten Haushalten nur eine

untergeordnete Rolle; zum Kochen wird es vor allem im Freizeitbereich eingesetzt. Anders dagegen in vielen Schwellen- und Entwicklungsländern, wo Flüssiggas eine Alternative zu traditioneller Biomasse und offener Feuerstelle ist. Vielfach wird Flüssiggas hier als **Übergangsbrennstoff zu einer nachhaltigeren Energiezukunft** gesehen.

Nicht-energetisch finden Flüssiggase als Kühlmittel mit geringem Treibhauspotenzial in Kühlschränken und Klimaanlage Verwendung. Zudem werden Propan und Butan – unter Druck verflüssigt – als Treibmittel für Sprüh- bzw. Spraydosen eingesetzt.

Schließlich sind Flüssiggase wichtige Ausgangsstoffe (Feedstocks) für die Petrochemie, um daraus Zwischenprodukte (Olefine und Aromaten) für alle möglichen Arten von Kunststoffen und anderes herzustellen. Flüssiggase stehen dabei in Konkurrenz zu anderen Feedstocks wie Ethan und Rohbenzin (Naphtha). Aufgrund des **weltweit wachsenden Bedarfes** an petrochemischen Erzeugnissen wird eine **steigende Nachfrage** nach Flüssiggas aus der Petrochemie erwartet.

VERKEHRSSSEKTOR

Der Energieträger Flüssiggas kann – nach technischen Modifikationen – auch als Kraft- und Treibstoff in verbrennungsbasierten Antriebssystemen (Verbrennungsmotoren, Turbinen) eingesetzt werden. Allerdings eignet sich Flüssiggas unterschiedlich gut für den Einsatz in den einzelnen Verkehrsmitteln. Technisch möglich, aber (noch) keine oder kaum Anwendung findet Flüssiggas auf der Schiene

sowie in der Schifffahrt. Die mit Abstand wichtigste Anwendung von Flüssiggasantrieben im Verkehrssektor sind mithin Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

Weltweit wird die Zahl der LPG-Fahrzeuge auf 16,7 Millionen geschätzt. Die meisten Autogasfahrzeuge fahren in Europa und Asien. Die bedeutendsten Autogas-Flotten im europäischen Raum sind in der Türkei, in Russland sowie in Italien anzutreffen.

Die **Zahl der Autogasfahrzeuge** hat in Deutschland in den vergangenen zehn Jahren **deutlich zugenommen**. Zurzeit (2014) sind hierzulande 512.000 Flüssiggasfahrzeuge zugelassen; über 97% davon sind **Pkw**. Außer in Pkw kommt Flüssiggas nur noch in leichten Lkw bzw. Pkw-ähnlichen leichten Nutzfahrzeugen in nennenswerten Stückzahlen zum Einsatz.

Mit einem Bestandsanteil von 1,1% sind **Autogas-Pkw** – nach Otto- und Diesel-Pkw, aber noch vor elektrischen Antrieben – der wichtigste alternative Antrieb in Deutschland. Die in Pkw eingesetzten LPG-Systeme basieren sämtlich auf dem Ottoprinzip und sind technisch ausschließlich bivalent ausgelegt. Pkw-Autogasanlagen werden – ab Werk oder als Umrüstung – in unterschiedlichen technischen Konfigurationen angeboten. Moderne Autogassysteme kombinieren sogar Direkteinspritzung mit flüssigem Autogas. Dabei erreichen Autogas-Pkw die Abgasnorm Euro 5 und teilweise bereits Euro 6.

Für schwerere **Lkw** wurden inzwischen so genannte Dual-Fuel-Systeme entwickelt, die auf dem Dieselantrieb basieren und einen Teil des Dieselmotors durch ein Luft-Flüssiggasgemisch ersetzen. Sie sind bislang allerdings kaum im Straßengüterverkehr anzutreffen. In Schwellen- und Entwicklungsländern werden LPG-Fahrzeuge als **Three-Wheeler** (Autorikschas und Tuk-Tuks) für den Personen- und Gütertransport genutzt. Darüber hinaus ist Autogas als emissionsarmer Antrieb für **Flurförderfahrzeuge** (Gabelstapler) von Relevanz.

Die Autogas-Infrastruktur ist in der EU – mit insgesamt etwa 25.000 bis 30.000 Zapfpunkten – in den meisten Ländern gut ausgebaut. Allerdings gibt es in Skandinavien, in Österreich und in der Schweiz nur wenige

LPG-Tankstellen. Bei 7.000 Autogas-Zapfstellen kann in Deutschland heute an fast jeder zweiten Tankstelle Autogas getankt werden. Auf einen Zapfpunkt kommen folglich ca. 75 Autogasfahrzeuge – die **LPG-Tankstellendichte ist in Deutschland also deutlich höher als in vielen anderen Ländern**.

AUTOGAS – WELCHE UMWELTVORTEILE?

Autogasantrieben wurden lange Zeit und werden teilweise noch immer positive Effekte in Bezug auf ihre Umweltwirkungen im Kraftverkehr zugesprochen. Die Umweltwirkungen von Autogas-Pkw werden im Wesentlichen durch ihren Energieverbrauch und durch ihre Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen bestimmt.

Da LPG-Antriebssysteme für Pkw auf Ottomotoren basieren, fallen die Wirkungsgradunterschiede zwischen Autogas- und Benzinssystemen gering aus. Der **spezifische Energieverbrauch** vergleichbarer Pkw pro Kilometer ist folglich etwa gleich hoch. Aufgrund der geringeren volumetrischen Energiedichte von Autogas ergibt sich allerdings ein etwa 25% höherer Kraftstoffverbrauch in Litern pro 100 Kilometer gegenüber Benzin.

Dieselfahrzeuge besitzen gegenüber Autogas- und Ottofahrzeugen deutliche Wirkungsvorteile von bis zu 20%. Lediglich auf dem Dieselpinzip basierende Dual-Fuel-Lkw können einen Diesel-Lkw vergleichbaren Wirkungsgrad erreichen.

Bei den **Treibhausgasemissionen** ist zwischen den direkten Emissionen (Tank-to-Wheels, TiW), die bei der Verbrennung auftreten, sowie den Vorkettenemissionen aus der Bereitstellung des Kraftstoffes (Well-to-Tank, WtT) zu unterscheiden: **Bei den direkten Treibhausgasemissionen verursacht Autogas aufgrund seines geringeren Kohlenstoffgehalts etwa 10% weniger Kohlendioxid (CO₂) pro Energieeinheit als Otto- bzw. Dieselmotor.** Da Otto- und Autogasfahrzeuge etwa gleich effizient sind, erreicht der Autogas-Pkw auch bezogen auf die Fahrleistung ähnliche CO₂-Vorteile wie beim Bezug auf den Energiegehalt. Gegenüber dem Diesel-Pkw verzeichnen Autogasfahrzeuge hingegen keine Treibhausgasvorteile, da der Dieselantrieb deutlich effizienter ist.

Aus der Kraftstoff-Vorkette (WtT) ergeben sich etwa 15 bis 20% der gesamten Treibhausgasemissionen (Well-to-Wheels, WtW). Da sich die WtT-Emissionen von Autogas sowie fossilem Otto- und Dieselmotor nur wenig unterscheiden, bleibt der Autogas-Pkw gegenüber dem Benziner weiter vorteilhaft; Autogasfahrzeuge emittieren überdies auch noch gegenüber einem mit E10 betriebenen Otto-Pkw weniger Treibhausgase pro Kilometer. Nach wie vor emittiert das Autogasfahrzeug jedoch WtW etwas mehr Treibhausgase als ein effizienteres Dieselfahrzeug.

Im Hinblick auf die **Luftqualität** entstehen bei der Verbrennung von Autogas (ohne Abgasreinigungstechnik) grundsätzlich weniger Luftschadstoffe. Angesichts der inzwischen erreichten strengen Abgasemissionsstandards und hochentwickelter Abgasreinigungssysteme für Neufahrzeuge, sowohl für Pkw als auch für Nutzfahrzeuge, und reformulierter Otto- und Dieselmotoren bieten Autogasfahrzeuge im Straßenverkehr allerdings kaum noch Vorteile bei den Luftschadstoffemissionen.

In Bezug auf die Umweltwirkungen von Autogasfahrzeugen gilt: Autogas kann zum einen zur Diversifizierung des Energiemixes im Straßenverkehr beitragen; zum anderen trägt Autogas zur Verminderung von Klimagasemissionen bei, wenn durch Autogas-Pkw Benzinfahrzeuge ersetzt werden.

AUTOKOSTEN-VERGLEICH: AUTO-GAS VS. OTTO- UND DIESEL-PKW

Ein wichtiges – wenn auch nicht das einzige – Kriterium für die Umrüstung von Benzin-Pkw oder die Anschaffung eines neuen Autogas-Pkw ist seine wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit gegenüber relevanten Referenzfahrzeugen. Die Wirtschaftlichkeit von Autogas hängt von den Mehrkosten für Autogastechnik, von der Antriebseffizienz, von den Kraftstoffpreisen sowie von den Pkw-Fahrleistungen ab.

Die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit eines Fahrzeugantriebs kann mit Hilfe von Vollkostenberechnungen (Total Cost of Ownership) ermittelt werden; in der Regel ist jedoch bereits durch einen vereinfachten **Autokostenvergleich** eine näherungsweise Ermittlung möglich. Hierbei werden nur die wichtigsten

differierenden Kostenpositionen für ein Modellfahrzeug miteinander verglichen; das sind zum einen die einmaligen LPG-Umrüstkosten bzw. die Differenzkosten der Neuwagenanschaffung, zum anderen die Betriebskosten, die im Wesentlichen durch die Kraftstoffkosten pro Kilometer bestimmt werden. Als Modellfahrzeug eignet sich insbesondere die Pkw-Kompaktklasse, die sowohl im Autogas-Bestand als auch im gesamten Pkw-Bestand mit etwa einem Viertel am häufigsten vertreten ist.

Für die **Umrüstung** eines Benzin-Kompaktfahrzeugs auf Autogas müssen heute im Mittel etwa 2.300 Euro ausgegeben werden. Bei hohen Kraftstoffpreisen amortisieren sich die Anschaffungskosten nach knapp 60.000 km Pkw-Gesamtfahrleistung, bei niedrigeren Kraftstoffpreisen nach etwa 75.000 km gegenüber einem vergleichbaren Ottofahrzeug. Je nach Jahresfahrleistung ergeben sich hieraus Amortisationszeiträume zwischen drei und sieben Jahren.

Für einen kompakten **Autogas-Neuwagen** müssen heute im Mittel etwa 2.100 Euro mehr bezahlt werden als für ein vergleichbares Ottofahrzeug; ein Diesel-Pkw kostet etwa genauso viel wie ein Autogas-Pkw. Im Falle höherer Kraftstoffpreise amortisieren sich die höheren Anschaffungskosten für einen Autogas-Pkw ebenfalls nach etwa 55.000 bis 60.000 km Pkw-Gesamtfahrleistung, bei niedrigeren Kraftstoffpreisen nach gut 70.000 km. Gegenüber einem etwa preisgleichen Dieselmotor besteht heute, trotz der höheren Antriebseffizienz des Dieselantriebs, von Anfang an ein kleiner Energiekostenvorteil pro Kilometer.

Ein Schlüsselfaktor für die wirtschaftliche Attraktivität von Autogas ist die **Energiesteuer** auf Kraftstoffe. Würde die heutige Steuerermäßigung auf Autogaskraftstoffe – wie (noch) im Energiesteuergesetz vorgesehen – ab 2019 substanziell abgeschmolzen, verlängerte sich die Break-even-Fahrleistung für eine Autogas-Investition wesentlich, teilweise bis hin zur technischen Restlebensdauer des Fahrzeugs. Gegenüber einem effizienteren Dieselmotor wäre ein Autogas-Neuwagen dann grundsätzlich wirtschaftlich nicht mehr wettbewerbsfähig. **Um die notwendige kritische Masse an Fahrzeugen und Versorgungsinfrastruktur für einen lebensfähigen Autogasmarkt zu**

gewährleisten, bedarf es neben planbaren und verlässlichen Rahmenbedingungen weiterhin wirtschaftlicher Anreize wie der ermäßigten Energiesteuer für Autogas.

AUTOGAS-SZENARIEN – WIE GEHT'S WEITER MIT AUTO-GAS ?

In Deutschland fährt mit 500.000 Fahrzeugen eine der größten Autogas-Flotten Europas. Nach einem rasanten Aufschwung im vergangenen Jahrzehnt war die Zahl der in Deutschland zugelassenen Autogas-Pkw zuletzt wieder leicht rückläufig. Mit Hilfe eines Pkw-Kohortenmodells aus (Shell 2014) und Szenariotechnik lassen sich alternative Entwicklungspfade für Autogasantriebe im Pkw-Bestand sowie mögliche Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit des Pkw-Verkehrs in Deutschland, gemessen an Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen, erforschen.

Autogas-Pkw sind zu 95% Privat zugelassen. Meist handelt es sich um umgerüstete Benzinfahrzeuge. In der Häufigkeitsverteilung nach Fahrzeugalter dominieren „mittelalte“ Pkw. Der LPG-Fahrzeugbestand ist folglich mit einem Durchschnittsalter von knapp zehn Jahren etwas älter als der Pkw-Gesamtbestand.

In Anlehnung an das Trendszenario der Shell Pkw-Studie (Shell 2014) wurden zwei Szenario-Variationen (Szenaretten) bis 2030 betrachtet: In der **Pro-Autogas-Szenarette** könnte der Autogas-Pkw-Bestand bis 2030 auf über eine Million Fahrzeuge verdoppelt werden. Die Well-to-Wheels-Treibhausgasemissionen würden um rund 250.000 Tonnen gesenkt.

In der **Contra-Autogas-Szenarette** verschlechtert sich das wirtschaftliche Umfeld für Autogas deutlich. Dadurch sanken die Autogas-Umrüstungen und -Neuzulassungen bis 2020 auf nahezu Null. In der Folge würde sich der Autogas-Fahrzeugbestand auf nur noch 250.000 Einheiten nahezu halbieren. Vor allem aufgrund des hohen Fahrzeugalters und entsprechend geringer Pkw-Fahrleistungen reduzierten sich die Treibhausgasemissionen gegenüber Otto- und Diesel-Pkw sehr deutlich.

Autogasfahrzeuge können zur Energiediversifizierung und Treibhausgaseminderung des Pkw-Verkehrs beitragen. Allerdings müsste hierfür der Autogas-Pkw-Bestand erheblich – noch über die Pro-Autogas-Szenarette hinaus – anwachsen.

FAZIT

Flüssiggas gehört zur Familie der Kohlenwasserstoffe und besteht hauptsächlich aus den beiden leicht verflüssigbaren Gasen Propan und Butan. Flüssiggas fällt bei der Rohöl- und Erdgasförderung sowie in Raffinerien an. Es besitzt vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in allen Verbrauchssektoren und wird heute in fast allen Bereichen des täglichen Lebens eingesetzt.

Flüssiggas wird nicht-energetisch bzw. stofflich verwendet – als Treib- und Kühlmittel oder in der Petrochemie. Gegenüber alternativen Stoffen bietet Flüssiggas oftmals technische, ökologische oder auch ökonomische Vorteile.

Als Energieträger ist Flüssiggas ein flexibel einsetzbarer Brennstoff, der gegenüber flüssigen und festen Energieträgern Emissionsvorteile aufweist. In vielen Schwellen- und Entwicklungsländern ist Flüssiggas ein Übergangsbrennstoff in eine nachhaltigere Energiezukunft.

Im Straßenverkehr sind Autogas-Pkw – hinter Otto- und Dieselfahrzeugen – der wichtigste alternative Pkw-Antrieb in Deutschland. Technisch betrachtet handelt es sich in der Regel um umgerüstete Benzinfahrzeuge.

Neue Autogas-Pkw befinden sich auf dem aktuellen Stand der Fahrzeugtechnik. Autogas kann helfen, den Energiemix des Straßenverkehrs zu diversifizieren und seine Klimagasemissionen zu reduzieren. Autogas-Pkw sind heute vor allem eine wirtschaftliche Alternative zu Benzin-Fahrzeugen.

LITERATURVERZEICHNIS

ADAC 2014: ADAC, Gastank im Heck-Crash, www.adac.de/infotest/tests/crash-test/crash_gasauto/crash_autogas.aspx

ADAC 2015a: ADAC Fahrzeugtechnik, Autokosten – Berechnungsgrundlagen für die standardisierte Kostenberechnung, München 2015.

ADAC 2015b: ADAC Fahrzeugtechnik, Der ADAC Kostenvergleich: Auf Autogas umrüsten?, München 2015.

BAFA 2014: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), Amtliche Mineralölpreiskontrollen für die Bundesrepublik Deutschland. Monat: Dezember 2013, Eschborn 2014.

Bannwarth et al. 2013: Horst Bannwarth, Bruno P. Kremer, Andreas Schulz, Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie: Vom Atom bis zur Atmung – für Biologen, Mediziner und Pharmazeuten, 3. Auflage, Heidelberg 2013.

BDH 2014: Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e.V. – (BDH), Anlagenbestand 2013: Verschenkte Potenziale im Heizungskeller, Pressemitteilung, Köln, den 27. Juni 2014.

BEA 2007: Berliner Energieagentur GmbH (BEA), Sauberer Fuhrpark. Umweltorientierte Beschaffung, Berlin 2007.

BMVBS 2013: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Energie auf neuen Wegen, Berlin 2013.

Bosch 2014: Robert Bosch GmbH, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Plochingen, 2014.

Brookings 2013: Brookings Natural Gas Task Force (Brookings), Issue Brief 1: Natural Gas Liquids, Washington 2013.

BT/WD 2012: Deutscher Bundestag/Wissenschaftliche Dienste (BT/WD), Das Abfackeln (gas flaring) und Ablassen (gas venting) von Begleitgasen bei der Erdölförderung, WD 8-3010-047/12, Berlin 2012.

Buderus 2002: Buderus Heiztechnik GmbH, Handbuch für Heizungstechnik, Berlin u.a.O. 2002.

Burmeister et al. 2008: Frank Burmeister, Jan Stichtenoth, Uwe Uhlenbock, Neue Aspekte der Biogaskonditionierung, in: GWF. Gas | Erdgas, Jg. 149 (2008), Nr. 6, S. 352-355.

CDU/CSU/SPD 2013: CDU Deutschlands, CSU-Landesleitung, SPD, Deutschland, Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, 18. Legislaturperiode, Berlin, den 14. Dezember 2013.

Continental 2014: Continental, Worldwide Emission Standards and Related Regulations, Regensburg 2014.

DAT 2015: Deutsche Automobil Treuhand GmbH (DAT), Leitfaden über den Kraftstoffverbrauch, die CO₂-Emissionen und den Stromverbrauch aller neuen Personenkraftwagenmodelle, die in Deutschland zum Kauf angeboten werden, 1. Quartal 2015, Ostfildern 2015.

Delphi 2014: Delphi Automotive LLP, Worldwide Emission Standards. Passenger Cars and Light Duty Vehicles, Troy 2014.

Destatis 2014: Statistisches Bundesamt (Destatis), Finanzen und Steuern. Energiesteuerstatistik. Fachserie 14 Reihe 9.3, Wiesbaden 2014.

Destatis 2015: Statistisches Bundesamt (Destatis), Preise. Daten zur Energiepreisentwicklung. Lange Reihen von Januar 2000 bis Februar 2015, Wiesbaden 2015.

DIW 2013: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Nachfrageentwicklung und Kraftstoffeinsatz im Straßenverkehr: Alternative Antriebe kommen nur schwer in Fahrt, in: DIW-Wochenbericht Nr. 50/2013, S. 13-23.

DLR 2013: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung, CNG und LPG – Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs, Berlin u.a.O. 2013.

DNV GL 2014: Det Norske Veritas/Germanischer Lloyd (DNV GL), Alternative Fuels for Shipping, Høvik, 2014.

DVFG 2011: Deutscher Verband Flüssiggas (DVFG), Natürlich und auch regenerativ: Flüssiggas. BioFlüssiggas hat viele Perspektiven, Berlin 2011.

DVFG 2014: Deutscher Verband Flüssiggas e.V. (DVFG), Jahresbericht 2013, Berlin 2014.

DVFG/DVGW-TRF 2012: Deutscher Verband Flüssiggas e.V. (DVFG), Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), Hrsg., Technische Regeln Flüssiggas (TRF) 2012, Berlin/Bonn 2012.

DVGW 2012: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), DVGW-Arbeitsblatt G 280-1: Odorierung, Bonn 2012.

DVGW 2013: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), DVGW-Technische Regel, Arbeitsblatt G 260: Gasbeschaffenheit, Bonn 2013.

EBTP 2011: European Biofuels Technology Plattform (EBTP), Biofuel Fact Sheet Dimethyl Ether (DME), European Biofuels Technology Plattform 2011.

EIA 2014: Energy Information Administration (EIA), Annual Energy Outlook 2014. Issues in Focus: Potential of liquefied natural gas use as a railroad fuel, Washington 2014, http://www.eia.gov/forecasts/aeo/liq_nat_gas.cfm.

EIvers 2008: Barbara Eivers, Handbook of Fuels: Energy Sources for Transportation, Weinheim 2008.

EP/Rat 2009a: Europäisches Parlament/Rat (EP/Rat), Verordnung 28/2009/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 140/16-62, Brüssel, den 5. Juni 2009.

EP/Rat 2009b: Europäisches Parlament (EP)/Rat, Richtlinie 2009/30/EG zur Änderung der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Spezifikationen für Otto-, Diesel- und Gasölkraftstoffe und die Einführung eines Systems zur Überwachung und Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates im Hinblick auf die Spezifikationen für von Binnenschiffen gebrauchte Kraftstoffe, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L140/1-15, Brüssel, den 5.6.2009.

EP/Rat 2009c: Europäisches Parlament (EP)/Rat, Verordnung EG/443/2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L140/88-113, Brüssel, den 5.6.2009.

EPA 2015: US Environmental Protection Agency (EPA), Ozone Layer Protection: List of Class 1 Ozone-depleting Substances, <http://www.epa.gov/ozone/snap/subsgwps.html>, Stand: 03. Mai 2015.

EU-COM 2014: European Commission (EU-COM), Proposal for a Directive on laying down calculation methods and reporting requirements pursuant to Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council relating to the quality of petrol and diesel fuels, COM(2014) 617 final, 2014/0286 (NLE), Brussels, 6.10.2014.

EU-KOM 2011: Europäische Kommission (EU-KOM), Weißbuch. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem, KOM(2011) 144 endgültig, Brüssel, den 28.3.2011.

EU-KOM 2012a: Europäische Kommission (EU-KOM), Richtlinie 2012/46/EU zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 353/80-127, Brüssel, den 21.12.2012.

EU-KOM 2012b: Europäische Kommission (EU-KOM), Richtlinie 2012/33/EU zur Änderung der Richtlinie 1999/32/EG des Rates hinsichtlich des Schwefelgehalts von Schiffskraftstoffen, in: Amtsblatt der Europäischen Union, L 327/1-13, Brüssel, den 27.11.2012.

EU-KOM 2014a: Europäische Kommission (EU-KOM), Verordnung (EU) Nr. 133/2014 zur Anpassung der Richtlinie 2007/46/EG, der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 sowie der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 an den technischen Fortschritt hinsichtlich der Emissionsgrenzwerte, Brüssel, den 31.1.2014.

EU-KOM 2014b: Europäische Kommission (EU-KOM), Vorschlag für eine Verordnung über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, COM(2014) 581 final, Brüssel, den 25.9.2014.

Forster et al. 2007: Piers Forster et al.: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, in: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge/New York 2007.

Geitmann 2010: Sven Geitmann, Alternative Kraftstoffe: womit fahren ich am besten? Erdgas & Flüssiggas, Biodiesel & Pflanzenöl, Ethanol & Wasserstoff, Oberkrämer 2010.

Gruden 2008: Dusan Gruden, Umweltschutz in der Automobilindustrie: Motor, Kraftstoffe, Recycling, Praxis, Wiesbaden 2008.

GTÜ 2014: Gesellschaft für Technische Überwachung mbH (GTÜ), Wissenswertes rund um das Thema Gasfahrzeuge, Stuttgart 2014.

Hempel 2007: Peter Hempel, Flüssiggas. Mobiler, umweltschonender Energieträger für Haushalt, Freizeit und Gewerbe, München 2007.

Hirsch/Brandes 2014: W. Hirsch, E. Brandes, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Sicherheitstechnische Kenngrößen bei nicht atmosphärischen Bedingungen; Gase und Dämpfe. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 2014.

HWK-München 2014: Handwerkskammer für München und Oberbayern (HWK-München), Normen und technische Regeln. Zusammenhänge, Begriffe, Bedeutungen, München 2014.

ICCT 2012: International Council on Clean Transportation (ICCT), A Technical Assessment of Emissions and Fuel Consumption Reduction Potential from Two and Three Wheelers in India, Washington 2012.

ICCT 2013: International Council on Clean Transportation Europe (ICCT), From Laboratory to Road. A comparison of official and „real-world“ fuel consumption and CO₂ values for cars in Europe and the United States, Berlin u.a.O. 2013.

ICCT 2014: International Council on Clean Transportation Europe (ICCT), From Laboratory to Road – A 2014 update of official and „real-world“ fuel consumption and CO₂ values for passenger cars, Berlin u.a.O. 2014.

IEA 2006: International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2006, Paris 2006.

IEA 2010: International Energy Agency (IEA), Natural Gas Liquids. Supply Outlook 2008-2015, Paris 2010.

IEA 2013: International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2013, Paris 2013.

IEA 2014: International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2014, Paris 2014.

IEA/AMF 2008: International Energy Agency/Advanced Motor Fuel Implementing Agreement (IEA/AMF), Outlook on standardization of Alternative Vehicle Fuels. Global, regional and national level. Annex XXVIII. Sub task Report, Stockholm 2008.

IFA 2015: Institut der Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), GESTIS-Stoffdatenbank, <http://www.dguv.de/ifa/Gefahrstoffdatenbanken/GESTIS-Stoffdatenbank/index.jsp>, Stand: 15.01.2015.

ifeu 2012: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“ (TREMODO, Version 5.3) für die Emissionsberichterstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011). Endbericht, Heidelberg 2012.

IGA 2015: Industrie-Gemeinschaft Aerosole e.V. (IGA), Aerosole – Faszination Spraydose, Frankfurt am Main, Stand: 11. Februar 2015.

ika 2014: Institut für Kraftfahrzeuge (ika), CO₂-Emissionsreduktion bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nach 2020, Aachen 2014.

IMO 2008: International Maritime Organisation, Marine Protection Committee (IMO), Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (Revised MARPOL Annex VI), Resolution MEPC.176(58), Annex 13, Adopted on 10 October 2008.

InnoZ 2010: Innovationszentrum für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel (InnoZ), Eco Rail Innovation – Herausforderungen für das System Bahn 2020, Berlin, 2010.

IPCC 2007: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2007: The Physical Science Basis; contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge/New York 2007.

JEC 2014a: Joint Research Centre-EUCAR-Concawe collaboration (JEC), Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Well-to-Wheels Report, Version 4.a, Luxemburg 2014.

JEC 2014b: Joint Research Centre-EUCAR-Concawe collaboration (JEC), Well-to-Tank Appendix 2. Summary of WTW Energy and GHG balances, Version 4.a, Luxemburg 2014.

JEC 2014c: Joint Research Centre-EUCAR-Concawe collaboration (JEC), Well-to-Tank Appendix 1. Conversion factors and fuel properties, Version 4.a, Luxemburg 2014.

KBA 2014a: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2014 gegenüber 1. Januar 2013, nach Segmenten und Modellreihen. Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes, Flensburg 2014.

KBA 2014b: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen 1. Januar 2014. FZ 13, Flensburg 2014.

KBA 2015a: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2015, Pressemitteilung Nr. 5, Flensburg 2015.

KBA 2015b: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Individualauswertung „Autogas-Pkw“ des Bestands an M1-Fahrzeugen nach Segmenten, Kraftstoff-Code, Merkmal privat/gewerblich und CO₂-Angaben für den Stichtag 01.01.2014, Flensburg 2015.

LANUV 2009: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Entsorgung FCKW-haltiger Haushaltskühlgeräte in Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen 2009.

List 2008: Helmut List, Grundlagen und Technologien des Ottomotors, Der Fahrzeugantrieb, Wien 2008.

LUBW 2015: Landesanstalt für Umwelt, Messung und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Füllanlagen für Treibgas oder Autogas, <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/207991>, Stand 03. Mai 2015.

MAN 2014: MAN Diesel & Turbo, ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines. A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas, Augsburg 2014.

MAN 2015: MAN Diesel & Turbo, Turn to Gas, Low-emission ship propulsion and onboard power solutions, Augsburg 2015.

- Mortimer/Müller 2010: Charles E. Mortimer, Ulrich Müller, Chemie: Das Basiswissen der Chemie, Stuttgart 2010.
- MTU 2012: MTU Aero Engines (MTU), Alternative Kraftstoffe für die Luftfahrt. Biogene Gaskraftstoffe eine Alternative für die Luftfahrt?, Leipziger Biokraftstoff- und ForNeBiK-Fachgespräche, Leipzig 2012.
- MWV 2014: MWV-Jahresbericht 2013/Mineralöl-Zahlen, Berlin 2014.
- NFM 2010: Dem Diesel Gas geben, in: Nutzfahrzeuge Management (NFM), 22. Jg. (2010), Nr. 10, S. 44f.
- NIST 2015: National Institute of Standards and Technology, NIST Chemistry WebBook, <http://webbook.nist.gov/chemistry/>, Stand: 29.01.2015.
- Pabst et al. 2007: K. Pabst, G. Schaub, M. Lüft, A. Velji, Neuartige Kraftstoffe und zukünftige Abgasemissionen bei Kraftfahrzeugen – eine Übersicht, Karlsruhe 2007.
- Pfeifer 2007: Herbert Pfeifer, Industrielle Wärmetechnik, Grundlagen, Berechnungen, Verfahren, Essen 2007.
- Ravishankara et al. 2009: A. R. Ravishankara, et al.: Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century, Science, 2 October 2009, Vol. 326, no. 5949, pp. 123-125, DOI:10.1126/science.1176985.
- Richards 2014: Paul Richards, Automotive Fuels Reference Book, Warrendale 2014.
- Rolls Royce 2012: Rolls Royce, Designing a new level of performance. Design an ship technology, Aalesund 2012.
- SAE 2013: Society of Automotive Engineers (SAE), Fuel Effect on Particle Emissions of a Direct Injection Engine, Y. Kim, S. Park et al., SAE2013-01-1559, 8. April 2013.
- SAE 2014: Society of Automotive Engineers (SAE), Comparative Evaluation of Engine Control Strategy on Regulated Emissions and Nano-Particle Characteristics of LPG Direct Injection (LPDI) Vehicle During the Cold Start and the Hot Phases in the FTP-75 Cycle, J. Kim et al., SAE2014-01-1232, 1. April 2014.
- Shell 2010: Shell Lkw-Studie. Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030, Hamburg 2010.
- Shell 2012: Nach Super E10: Welche Rolle für Biokraftstoffe? Fakten, Trends und Perspektiven, Hamburg 2012.
- Shell 2013: Shell, Erdgas – eine Brückentechnologie für die Mobilität der Zukunft? Hamburg 2013.
- Shell 2014: Shell PKW-Szenarien bis 2040. Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität, Hamburg 2014.
- Shell/BDH 2013: Shell/Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e.V. (Shell/BDH), Klimaschutz im Wohnungssektor – wie heizen wir morgen? Fakten, Trends und Perspektiven für Heiztechniken bis 2030, Hamburg 2013.
- Todsens 2012: Uwe Todsens, Verbrennungsmotoren, München 2012.
- trans aktuell 2013: Die Diesel-Alternative, trans aktuell, 1.-19. Dezember 2013, S. 13.
- UBA 2010: Umweltbundesamt (UBA), Natural Refrigerants for mobile Air-Conditioning in Passenger Cars, Dessau 2010.
- UBA 2013a: Umweltbundesamt (UBA), Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen. Emissionsentwicklung für klassische Luftschadstoffe 1990-2012, Dessau 2013.
- UBA 2013b: Umweltbundesamt (UBA), Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen. Emissionsentwicklung für Treibhausgasemissionen 1990-2012, Dessau 2013.
- UBA 2014: Umweltbundesamt (UBA), Luftqualität. Hintergrund, Dessau 2015.
- UN 2015: United Nations (UN), Sustainable Energy for All Initiative of the United Nations, URL www.se4all.org, Stand: 11. Februar 2015.
- VDA 2014: Verband der Automobilindustrie (VDA), Fakten und Argumente zum Kraftstoffverbrauch, Frankfurt 2014.
- Vossloh 2014: Vossloh Locomotives, Company presentation, Kiel 2014.
- Wartsilä 2014: Wartsilä Ship Power, The path to cleaner inland waterway shipping, in: Wartsilä Technical Journal, Issue No. 01, 2014, S. 38-43.
- Watkins 2011: David E. Watkins, Heating Services in Buildings: Design, Installation, Commissioning and Maintenance, 1. Edition, Chichester, West Sussex 2011.
- WFCC 2013: World Fuels Charter Committee (WFCC), World Fuels Charter. 5th edition, 2013.
- Wietschel et al. 2013: Patrick Plötz, Till Gnann, André Kühn, Martin Wietschel, Markthochlaufsenarien für Elektrofahrzeuge. Langfassung, Fraunhofer ISI, Karlsruhe 2013.
- WLPGA 2014: World LP Gas Association (WLPGA), Autogas Incentive Policies. A country-by-country analysis of why and how governments encourage Autogas and what works. Update 2014, Neuilly-sur-Seine 2014.
- WLPGA 2015: World LP Gas Association (WLPGA) First Biopropane on the way in Europe, Presse-Mitteilung, Frankfurt, den 24. September 2014.
- WLPGA/Argus 2014: World LP Gas Association (WLPGA)/Argus, Statistical Review of Global LP Gas 2014, London/Neuilly-sur-Seine 2014.
- World Bank 2011, World Bank, The Role of Liquefied Petroleum Gas in Reducing Energy Poverty, Washington 2011.
- Wu/Yin 2008: Jiangtao Wu, Jianguo Yin, Vapor Pressure Measurements of Dimethyl Ether from (213 to 393) K State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, J. Chem. Eng. Data 2008, 53, 2247-2249.



Shell Deutschland Oil GmbH
22284 Hamburg
www.shell.de

Hamburg, 2015