

Künftige Mobilität auf Basis erneuerbarer Energien

Fraunhofer ISE

Dr. Günther Ebert
 guenther.ebert@ise.fraunhofer.de

ZSW

Prof. Werner Tillmetz
 werner.tillmetz@zsw-bw.de

Dr. Michael Specht
 michael.specht@zsw-bw.de

Fraunhofer IWES

Dr. Michael Sterner
 msterner@iset.uni-kassel.de

Dr. Bernd Krautkremer
 bkrautkremer@iset.uni-kassel.de

DLR

Dr. Thomas Pregger
 thomas.pregger@dlr.de

Jülich

Dr. Wilhelm Kuckshinrichs
 w.kuckshinrichs@fz-juelich.de

Der Verkehr ist in Deutschland für etwa 20 % der gesamten CO₂-Emissionen verantwortlich. Dabei ist der Individualverkehr, also PKW- und LKW-Verkehr, mit etwa 80 % der Hauptverursacher. Der Durchschnittsverbrauch an fossilen Treibstoffen pro Fahrzeug ist zwar in den letzten Jahren gesunken, weltweit steigt aber die Gesamtzahl der Fahrzeuge von derzeit etwa 900 Millionen weiter an und damit auch der Verbrauch an fossilen Energien und die CO₂-Emissionen. Hohe CO₂-Emissionen, die unsere Umwelt akut bedrohen und die Endlichkeit der Vorräte an fossilen Energien wie Öl und Gas sind deshalb neben der zunehmenden Luftverschmutzung in Ballungsgebieten auch die Hauptgründe dafür, dass derzeit bei fast allen großen Fahrzeugherstellern intensiv an alternativen Fahrzeugkonzepten gearbeitet wird.

Die Bundesregierung hat das Problem erkannt und unterstützt mit ihrem „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ die Entwicklung von Technologien für **batterie-** und **brennstoffzellengestützte** Elektrofahrzeuge. Beiden gemeinsam ist der extrem energieeffiziente Elektroantrieb sowie die Möglichkeit, die Energieversorgung auf erneuerbare Quellen wie Sonnen- oder Windenergie zurückzuführen. Ein weiteres erfolgversprechendes Konzept ist die Versorgung auf Basis von **Biotreibstoffen**. Das ökologische Potenzial und die Eigenheiten aller

drei Fahrzeugkonzepte sollen im folgenden kurz beschrieben und gegenübergestellt werden (*Abbildung 1*).

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)

Rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge besitzen im Gegensatz zu den herkömmlichen Verbrennungsmotoren, die mit Benzin- oder Diesel angetrieben werden, einen Elektromotor, der seine Energie von einer an Bord befindlichen Batterie bezieht. Sie wird regelmäßig am stationären Stromnetz geladen. Elektroantriebe gehen sehr effizient mit Energie um. Benzin- oder Dieselfahrzeuge setzen den größten Teil der im Treibstoff chemisch gebundenen Energie in Wärme um. Elektroantriebe dagegen nutzen die in der Batterie gespeicherte elektrische Energie fast vollständig für den Antrieb. Sie benötigen daher nur etwa ¼ der Energie, die ein Verbrennungsmotorantrieb braucht (*Abbildung 2*).

Allerdings gibt es heute noch einen entscheidenden Nachteil: Batterien können nur eine relativ kleine Menge Energie pro Volumen oder Gewicht speichern, die im Vergleich zu den bekannten flüssigen Treibstoffen mehr als eine Größenordnung geringer ist. Das führt dazu,

Abbildung 1
 Fahrzeugkonzepte auf Basis von erneuerbaren Energien

Antrieb	(Mobiler) Energie-Träger	Energie-Quelle
Elektromotor	Batterie	Strom aus EE
Elektromotor	Brennstoffzelle	H ₂ aus EE
Verbrennungsmotor	Biotreibstoffe	Biomasse

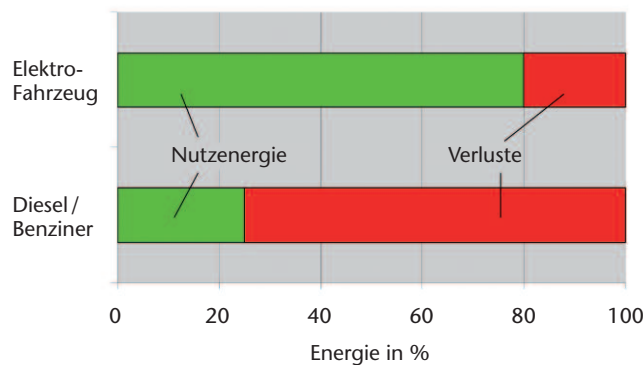


Abbildung 2
Elektrofahrzeuge sind sehr effizient.

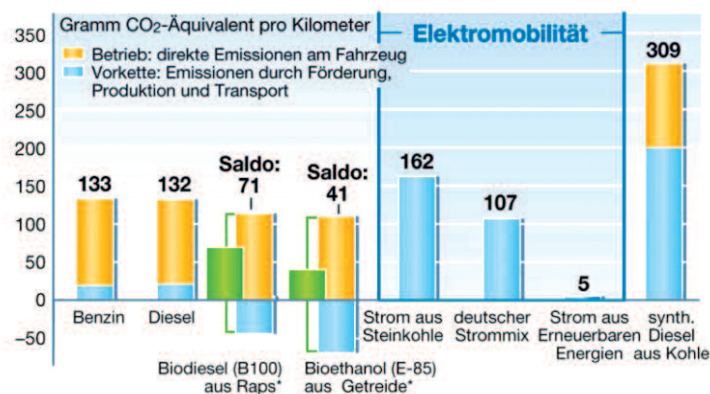


Abbildung 3
Elektrofahrzeuge brauchen Strom aus Erneuerbaren.
(Quelle: BMU)

dass heute die Reichweiten solcher Elektrofahrzeuge noch auf etwa 150–200 km begrenzt sind. Dennoch sind solche Fahrzeuge für viele Anwendungen ausreichend, da die meisten unserer täglichen Fahrten relativ kurz sind; etwa die Fahrt zur Arbeitsstätte oder zum Supermarkt. Sie sind deshalb ideal als Pendler-, Zweit- oder Stadtfahrzeug.

Für Fahrzeugnutzer, die hin und wieder auch mal weitere Strecken zurücklegen müssen, eignen sich sogenannte Plug-In-Hybride (PHEV) besser. Diese Fahrzeuge besitzen neben einem Elektroantrieb noch eine Verbrennungsmaschine, so dass diese bei leerer Batterie zugeschaltet werden kann. Im Extremfall fungiert der Verbrennungsmotor nur als Antrieb für die Stromerzeugung zur Ladung der Batterie. Dies ermöglicht eine besonders einfache Fahrzeugkonstruktion ohne mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und Rädern. Solche Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge sind ideal für die Übergangsphase vom Verbrenner zum Elektrofahrzeug. Sie ermöglichen einen hohen elektrischen Fahranteil, nehmen aber den Nut-

zern die Angst vorm Stehenbleiben und haben als Universalfahrzeug ein großes Marktpotenzial. Elektrofahrzeuge weisen praktisch keine lokalen CO₂-Emissionen auf. Für die Gesamtbilanz ist aber die Herkunft des Stromes entscheidend. Kommt er aus Kohlekraftwerken, die ebenfalls einen hohen Anteil der Primärenergie in Wärme statt in Strom verwandeln, liegen die Emissionen mit etwa 160 g CO₂-Äquivalent für einen Kleinwagen höher als bei Benzin- und Dieselfahrzeugen. In diesem Fall wäre also nichts gewonnen.

Beim heutigen deutschen Strommix sieht es schon etwas besser aus. Hier ist knapp unter 110 g bereits eine moderate Verbesserung gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen erzielbar.

Richtig Sinn machen Elektrofahrzeuge aber erst, wenn der Strom weitgehend aus erneuerbaren Energien kommt. Dann sind vernachlässigbar kleine CO₂-Emissionen erzielbar. Deshalb muss die Einführung von Elektrofahrzeugen untrennbar mit der raschen Steigerung des Anteils von erneuerbaren Energien an unserer Stromerzeugung verbunden werden (Abbildung 3).

Abbildung 4
Elektrofahrzeuge
benötigen Infrastruktur.



Dieser Anteil liegt heute bei etwa 16 %. Er soll gemäß der Leitstudie der Bundesregierung im Jahr 2020 bei 30 %, im Jahr 2030 bei 50 % und im Jahr 2050 bereits bei 80 % liegen. Da die Umstellung der Fahrzeugflotte auf Elektroantrieb sich in ähnlichen Zeiträumen abspielen dürfte, wäre mittelfristig auch die Versorgung der Elektrofahrzeuge mit erneuerbaren Energien gewährleistet.

Elektrofahrzeuge beziehen ihre Energie primär aus dem Stromnetz. Dem sparsamen Elektroantrieb ist es zu verdanken, dass dies die Stromversorgung ohne Probleme bewältigen kann. Wenn gemäß dem Ziel der Bundesregierung im Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren, würde sich unser gesamter Stromverbrauch nur um weniger als 0,5 % erhöhen und selbst wenn in einigen Jahrzehnten alle etwa 45 Millionen Fahrzeuge elektrisch fahren sollten, würde der Stromverbrauch nur um etwa 20–25 % ansteigen. Allerdings können zeitliche Konzentrationen von Ladevorgängen zu unerwünschten Lastspitzen führen. Wenn alle Fahrzeugbesitzer ihre Fahrzeuge am Abend laden würden, könnte es bei hoher Durchdringung mit Elektrofahrzeugen durchaus zu Netzüberlastungen kommen. Diese Effekte können aber mit moderner Steuerungstechnik und flexiblen Tarifen, die nach Einführung der elektronischen Zähler möglich werden, vermieden werden: Denn batteriegestützte Elektrofahrzeuge müssen zwar regelmäßig geladen werden, beim Ladezeitpunkt besteht aber eine gewisse

Flexibilität. Dies ermöglicht es vielfach, die Fahrzeuge dann zu laden, wenn die Erzeugung- und Verbrauchssituation dafür günstig ist (Abbildung 4).

Ungleichgewichte in Energieerzeugung und -verbrauch lassen sich durch Wahl des Ladezeitpunkts in gewissen Grenzen ausgleichen. Neben diesen zeitlichen Lastverschiebungen ist es sogar möglich, elektrische Energie aus den Fahrzeugbatterien ins Stromnetz zurückzuspeisen und so Defizite, beispielsweise durch hohe Nachfrage oder momentane Flaute bei Windkraftwerken, auszugleichen oder zumindest zu mildern. Möglich wird dies, weil die Fahrzeuge im Mittel mehr als 90 % der Zeit stehen und so mit dem Netz verbunden sein können. Bei hohem Anteil von Elektrofahrzeugen kann so ein gewaltiger Speicher für elektrische Energie realisiert werden, der die Fluktuationen von Wind- und Sonnenenergie wirksam dämpfen kann und so den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien noch mehr erleichtert.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Neben der Weiterentwicklung des Fahrzeugleichtbaus, der für Elektrofahrzeuge besonders wichtig ist, muss vor allem die Weiterentwicklung der Batterietechnologie vorangetrieben werden. Speichervermögen, Lebensdauer, Kosten, Sicherheit und Ladezeiten sind allesamt noch nicht wirklich ausreichend für eine breite Akzeptanz der Elektrofahrzeuge.

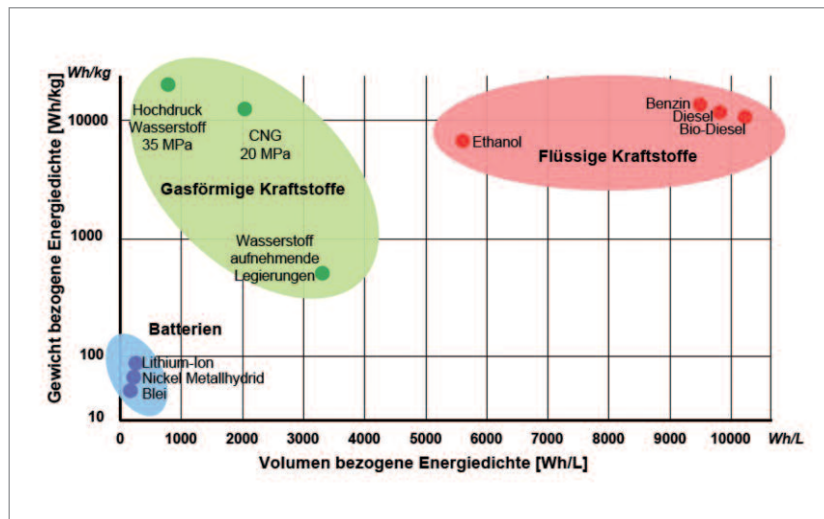


Abbildung 5
Energiedichten
verschiedener
Speichermedien
(Quelle: Toyota)

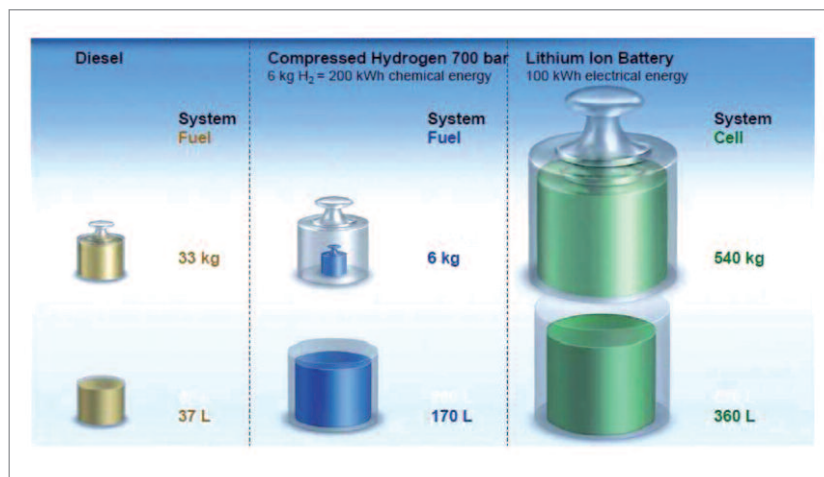


Abbildung 6
Vergleich von Diesel-,
Wasserstoff- und
Batteriefahrzeugen:
Volumen und Gewicht
für eine Reichweite von
500 km

Darüber hinaus erfordert die Einführung von Elektrofahrzeugen den Aufbau einer Ladeinfrastruktur. Gerade weil Elektrofahrzeuge nur eine begrenzte Reichweite haben, müssen sie möglichst immer, wenn sie stehen, auch mit dem Netz verbunden werden können. Neben den häuslichen Steckdosen, die für eine Grundversorgung verwendet werden können, müssen zukünftig Lademöglichkeiten beim Arbeitgeber, in Supermärkten, in Parkhäusern und auch auf öffentlichen Parkplätzen entstehen. Einzelne Ladesäulen, die heute bereits an handselektierten Plätzen installiert sind, sind dafür nicht ausreichend und vor allem zu teuer, um sie in ausreichender Dichte zu realisieren. Erforderlich ist ein universelles, preiswertes, nutzerfreundliches Lade- und Abrechnungsverfahren, das dem Verbraucher die Angst vor der Suche nach der Lademöglichkeit nimmt.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge

Eine ganze Reihe großer Fahrzeughersteller arbeitet seit vielen Jahren an Elektrofahrzeugen mit Brennstoffzellen als Energiequelle. Es gibt weltweit viel Praxiserfahrung mit PKW, LKW und Bussen. Derzeit fahren Fahrzeuge der zweiten und dritten Generation auf der Straße. Beispielsweise plant Daimler im Jahr 2010 eine Weiterentwicklung seiner Brennstoffzellen-Technologie in Form der B-Klasse im Versuchsbetrieb. Für 2015 ist dann die breite Markteinführung geplant. Gegenüber den Vorgängerversionen konnten Verbesserungen bei der Lebensdauer des Brennstoffzellen-Stacks (> 2000 h), der Leistung (von 65 kW auf 100 kW), der Reichweite (von 160 km auf über 400 km), der Zuverlässigkeit und der Kaltstartfähigkeit erzielt werden.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge besitzen ebenfalls einen Elektroantrieb, der seine Energie aus einer Brennstoffzelle bezieht. Die Brennstoffzelle wird mit reinem Wasserstoff, der meist in komprimierter Form in einem Tank mitgeführt wird, betrieben. Ähnlich wie bei batterieelektrischen Fahrzeugen entstehen im Fahrbetrieb praktisch keine CO₂-Emissionen. Von größerer Bedeutung für die Umwelt sind aber die Gesamtemissionen des Systems. Diese hängen davon ab wie der Wasserstoff erzeugt und aufbereitet wurde. Die heute übliche Gewinnung aus Erdgas führt zu ähnlich hohen Emissionswerten wie bei batterieelektrischen Fahrzeugen, die mit dem derzeitigen deutschen Strommix betrieben werden, sind also nur moderat günstiger als bei herkömmlichen Diesel- und Benzin-Fahrzeugen. Erst durch die Erzeugung des Wasserstoffs mittels erneuerbarer Energien, beispielsweise durch Elektrolyse, können die CO₂-Emissionen auf sehr niedrige Werte reduziert werden (Abbildung 9). Die Voraussetzung ist aber auch hier, dass der Strom aus erneuerbaren Energien verfügbar ist.

Ein Unterschied zu batterieelektrischen Fahrzeugen besteht dennoch: Im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen beträgt der Energieverlust über die gesamte Kette von der Strombereitstellung für die Elektrolyse bis zur Beladung des Drucktanks ein Mehrfaches woraus sich zukünftig ein entscheidender Kostennachteil für Brennstoffzellen-Fahrzeuge ergeben könnte.

Durch die höhere Energiedichte (Abbildung 5) von Wasserstoff lassen sich durchaus akzeptable Reichweiten erzielen, die 400 km und mehr betragen können (Abbildung 6). Damit ist der Ein-

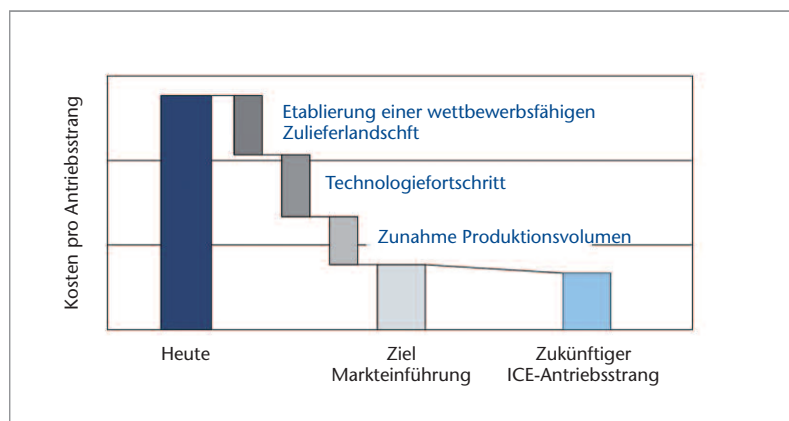
satz von Brennstoffzellen auch für Omnibusse und LKW interessant. Aber auch bei der Brennstoffzellen-Technologie bleibt noch viel Raum für Verbesserungen. Allen voran sind es die derzeit noch zu hohen Kosten, die durch weiteren technischen Fortschritt aber vor allem durch den Start der Massenproduktion deutlich gesenkt werden dürften (Abbildung 7).

Des Weiteren sind Verbesserungen bei Lebensdauer, Robustheit und der Speicherfähigkeit von Wasserstoff wünschenswert. Als weitere große Hürde für eine Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen gilt die fehlende Wasserstoff-Versorgungsstruktur. Für die Akzeptanz beim Verbraucher ist ein ausreichend dichtes Netz von Wasserstoff-Tankstellen Grundvoraussetzung was aber mit hohen Investitionen verbunden ist. Dennoch hat sich kürzlich ein Industriekonsortium bestehend aus Automobilherstellern und Energieversorgern bereit erklärt bis 2015 ein dichtes Tankstellennetz aufzubauen.

Biotreibstoffe

Neben Batterie- und Brennstoffzellen-Fahrzeugen weist auch der Betrieb von Fahrzeugen mit Biotreibstoffen hohes ökologisches Potenzial auf. Biotreibstoffe sind entweder ein Teil eines Kreislaufprozesses und die zu Grunde liegenden Pflanzen absorbieren in der Wachstumsphase ähnliche Mengen CO₂ wie sie beim Betrieb von Fahrzeugen emittiert werden oder sie werden aus ohnehin schon vorhandener Biomasse hergestellt. Die Spannweite der CO₂-Emissionen reicht dabei von geringfügig bis erheblich

Abbildung 7
Kostenentwicklung
für Brennstoffzellen-
Fahrzeuge
(Quelle: Daimler)



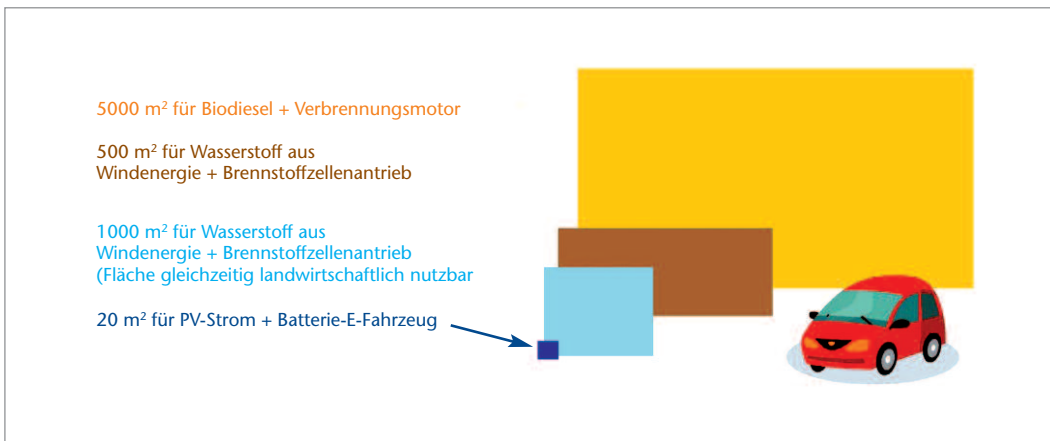


Abbildung 8
Flächenbedarf im
Vergleich

gegenüber fossilen Treibstoffen und hängt sowohl vom jeweiligen Verfahren als auch von der individuellen Ausführung ab.

Biosprit der ersten Generation wie Biodiesel aus Raps oder Ethanol aus Zuckerrohr, bei dem nur bestimmte Pflanzenteile verwendet werden, gilt als eher moderat ökologisch wirksam. Im Unterschied dazu wird bei Biosprit der zweiten Generation die ganze Pflanze verwendet, wodurch eine erheblich höhere CO₂-Reduzierung erreichbar ist.

Biosprit findet heute in einigen Ländern vor allem als Beimischung zu Diesel bzw. in Form von Ethanol bereits breiten Einsatz. Weltweit werden dadurch allerdings nur etwa 2,4 % fossile Treibstoffe substituiert. Generell ist Biosprit eine begrenzte Ressource. Würde man das gesamte Flächenpotenzial in Deutschland von 3,2 Mio ha für den Anbau von Biosprit-Pflanzen nutzen, ließen sich maximal 20 % des heutigen Bedarfs an Treibstoffen decken.

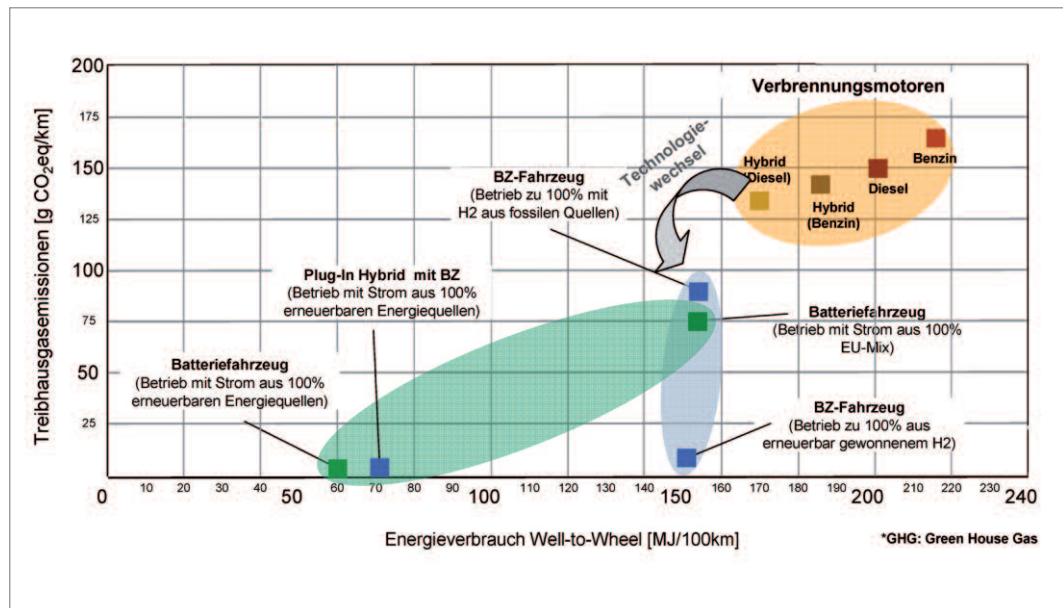
Allerdings konkurrieren neben dem Individualverkehr auch die Luftfahrt, für die möglicherweise Biosprit die einzig praktikable Alternative zu fossilen Treibstoffen darstellt, sowie der stationäre Bereich mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in dem Biosprit sogar noch vorteilhafter eingesetzt werden kann. So können beispielsweise aus 6 t Holz zwar 1 t Diesel entstehen, sie können aber auch 2 t Heizöl ersetzen. Die Verwendung des Biosprits sollte deshalb vorrangig dort stattfinden, wo seine Vorteile voll zum Tragen kommen. Ein solches Einsatzgebiet sind

natürlich auch Plug-In-Hybridfahrzeuge oder Fahrzeuge, bei denen eine Elektrifizierung deutlich schwerer zu realisieren sein wird.

Nachteilig ist der hohe Flächenbedarf bei der Produktion von Biotreibstoffen im Vergleich zur Energieerzeugung aus Wind- oder Sonnenenergie. Für die Erzeugung des Jahresenergiebedarfs eines Kleinwagens, der mit Biosprit betrieben wird, werden etwa 5000 m² Ackerfläche benötigt. Für ein Elektrofahrzeug mit derselben Jahresfahrleistung reicht dafür schon das Dach eines Einfamilienhauses mit etwa 20 m² aus (*Abbildung 8*).

Ein relativ neues Konzept baut auf der Erzeugung von Erdgassubstitut SNG auf. Wasserstoff, der mittels Elektrolyse aus Wind- oder Sonnenstrom erzeugt wurde, wird unter Zufuhr von CO₂ methanisiert (siehe *Abbildung 6* auf S. 118). Das Methan kann nun in den üblichen Erdgasleitungen räumlich einfach verteilt werden und neben der Nutzung zur lokalen Strom- bzw. Wärmeerzeugung auch für den Betrieb von Erdgasautos eingesetzt werden. Der Vorteil dieses Konzepts ist die Rückführung der Fahrzeugversorgung auf erneuerbaren Energien, die einfache Langzeitspeicherung, das Vorhandensein einer Verteilungs-Infrastruktur und die universelle Verwendbarkeit des Energieträgers Methan. Darüber hinaus lässt sich auch die Erzeugung von Methan aus Biomasse mit einbinden. Nachteilig sind allerdings die hohen Energieverluste in der Prozesskette.

Abbildung 9
Well to Wheel-Bilanzen
der verschiedenen
Fahrzeugtypen zeigen
deren Energiever-
brauch und Treibhaus-
gasemissionen
(Quelle: Daimler)



Zusammenfassung

Es ist davon auszugehen, dass Fahrzeuge mit batterie- oder/und brennstoffzellengestützten Elektroantrieben auf Grund ihrer potenziellen ökologischen Vorteile in den nächsten Jahrzehnten unsere herkömmlichen, vorwiegend fossil angetriebenen Fahrzeuge im Individualverkehrsbereich sukzessive ablösen werden.

Voraussetzung dafür ist allerdings eine konsequente Fokussierung auf Forschung und Entwicklung, um die heute noch vorhandenen Schwachpunkte wie zu geringe Energiedichte, Lebensdauer, Sicherheit, Alltagstauglichkeit zu verbessern und zu hohe Kosten zu senken. Zudem muss rasch für den Aufbau einer entsprechenden Tank- bzw. Ladeinfrastruktur gesorgt werden.

Bei der Biosprit-Technologie sind es vor allen Dingen die CO₂-Emissionen bei der Herstellung, die reduziert werden müssen. Die heutigen Verfahren zur Herstellung von Biodiesel können da nur ein Anfang sein. Generell wird Biosprit eine sehr begrenzte Ressource bleiben und sollte deshalb vorwiegend in Nischen, für die es keine andere Lösung gibt, eingesetzt werden.

Seitens der Bundesregierung werden erfreulicherweise alle angesprochenen Bereiche mit Fördermitteln unterstützt. Die Aufgabe teilen sich dabei fünf Ministerien, die für Forschung und Entwicklung, Wirtschaft, Umwelt, Verkehr und Landwirtschaft zuständig sind.