

© loraks/shutterstock.com

## Hybrid, elektrisch, Brennstoffzelle: alternative Antriebe im Vergleich

von Sebastian Martin

Das Bedürfnis der Gesellschaft nach individueller Mobilität wächst seit Jahrzehnten beständig, wobei Verbrennungsmotoren auf Basis der Ölprodukte Benzin und Diesel bislang die dominierende Antriebs-Technologie darstellen. Alternative Antriebe gewinnen jedoch zunehmend an Bedeutung. Unter dem Begriff der „Elektromobilen Antriebskonzepte“ werden sämtliche Pkw, Nutzfahrzeuge und Zweiräder im Straßenverkehr zusammengefasst, die zumindest teilweise elektrisch angetrieben werden. Diese Definition erfolgt unabhängig davon, ob die Fahrzeuge ihre für die Fortbewegung notwendige Energie aus einer Batterie, einer Brennstoffzelle oder einem Range-Extender-Verbrennungsmotor beziehen.<sup>1</sup>

Alternative Antriebe sind attraktiv, weil sie Möglichkeiten zur Reduktion lokaler Emissionen bieten und darüber hinaus

bei konsequenter Nutzung regenerativer Energiequellen zur Reduktion von globalen Treibhausemissionen beitragen können.<sup>2</sup> Der Elektromobilität, einschließlich der Brennstoffzellenfahrzeugtechnologie, wird dementsprechend für die kommenden Jahre eine bedeutsame Rolle zugeschrieben. Dabei unterscheiden sich die derzeit verwendeten Technologien hinsichtlich ihrer ökonomischen, technischen und ökologischen Aspekte deutlich, sodass sich ein direkter Vergleich lohnt.

Bei der Einordnung der Antriebskonzepte können Elektrofahrzeuge in zwei Gruppen eingeteilt werden: Rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV) mit zusätzlichem Verbrennungsmotor gehören zu den Fahrzeugen, die direkt am Stromnetz geladen werden können. Während die zweite Gruppe, die der Mi-

cro-, Mild- oder Vollhybride (HEV), Strom an Bord des Fahrzeuges generieren und nicht extern geladen werden können. Plug-In- und Vollhybride haben die Nutzung von sowohl Elektro- als auch konventionellem Antrieb gemeinsam. Erstere verfügen jedoch in der Regel über eine größere Traktionsbatterie und sind dementsprechend den batterieelektrischen Fahrzeugen näher als die Vollhybride.<sup>3</sup>

HEV werden in drei verschiedene Klassen unterteilt: Mikrohybrid-, Mildhybrid-, Vollhybridfahrzeuge. Bei Mikrohybridfahrzeugen dient der elektrische Motor nicht dem Antrieb, sondern kommt bei der Start-Stopp-Automatik und der Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation) zum Einsatz und wird in diesem Fall als Starter-Generator bezeichnet. Ein Beispiel für HEV mit dieser Technologie sind BMW-Pkw der 1-er Baureihe.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> e-mobil BW – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation & Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.) (2015). Strukturstudie BWe Mobil 2015. Elektromobilität in Baden-Württemberg. E-mobil BW GmbH: Stuttgart, S. 6.

<sup>2</sup> Jochem, P., Poganietz, W.-R., Grunwald, A. & Fichtner, W. (Hrsg.) (2012). Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen, Tagungsbeiträge vom 08. und 09. März 2012 am KIT. KIT Scientific Publishing: Karlsruhe, S. 51.

<sup>3</sup> Thielmann, A., Sauer, A. & Wietschel, M. (2015). Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, S. 4.

<sup>4</sup> Anand Kishor Asekar (2013). Stop-start system using micro-hybrid technology for increasing fuel efficiency, International Journal of Mechanical and Production Engineering, 11(6), S. 1.

Der Mildhybrid nutzt den Elektroantrieb als Unterstützung für den Verbrennungsmotor. Ein Beispiel für den Mildhybrid ist der BMW ActiveHybrid 7.<sup>5</sup> Sobald der Fahrer bei diesem Fahrzeug den Fuß vom Gaspedal nimmt, wechselt der Elektromotor von der Antriebs- in die Generatorfunktion. Der mittels dieser Rekuperation verbrauchsneutral gewonnene Strom wird in die beiden Bordnetze des Fahrzeugs eingespeist: Der ActiveHybrid 7 verfügt über einen konventionellen 12-V-Kreislauf und eine Hochvolt-Lithium-Ionen-Batterie. Der Lithium-Ionen-Akku versorgt den Elektromotor mit der gespeicherten elektrischen Energie, wenn dieser während der Fahrt eine ergänzende Antriebsfunktion übernimmt oder beim Anfahren und Beschleunigen den Verbrennungsmotor unterstützt. Die übrigen elektrisch betriebenen Fahrzeugkomponenten werden über das herkömmliche 12-V-Netz betrieben, wobei beide Bordnetze über einen Spannungswandler miteinander verbunden sind. Dieses flexible Energiemanagement ermöglicht, dass alle elektrisch betriebenen Fahrzeugkomponenten mit verbrauchsneutral erzeugtem Strom versorgt werden.<sup>6</sup>

Der Vollhybrid ist ein elektromobiles Antriebskonzept, bei dem zeitweise vollständig mit dem Elektromotor gefahren werden kann, während der Verbrennungsmotor außer Betrieb ist. Im Vergleich zu Mikro- und Mildhybridfahrzeugen ist der Elektromotor bei den Vollhybriden deutlich größer ausgelegt. Der erste Vertreter dieser Kategorie war der Toyota Prius. Je nach Kapazität der Hybridbatterie kann sich ein solches Fahrzeug einige Kilometer rein elektrisch fortbewegen. So lässt sich ein großer Teil des städtischen Stop-and-Go-Verkehrs bewältigen, ohne dass der Treibstoff-Verbrauch nennenswert ansteigt. Die Leistungen der Batterie und des Elektromotors erlauben darüber hinaus eine erhebliche Unterstützung bei der Beschleunigung des Fahrzeuges sowie eine effiziente Rekuperation.<sup>7</sup>

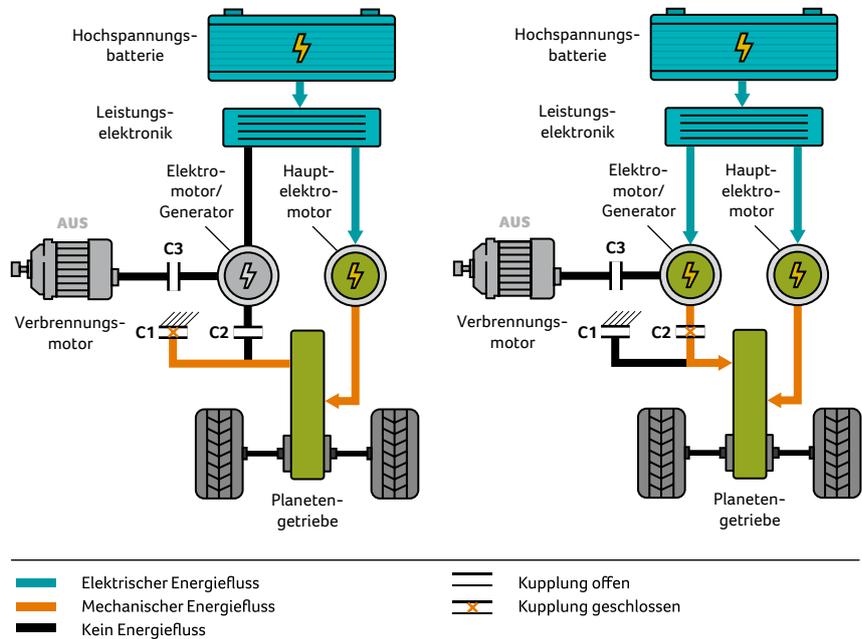


Bild 1: Rein elektrischer Fahrmodus – Range Extender Electric Vehicle. Quelle: atene KOM GmbH, nach Opel.

Bild 2: Rein elektrisches Fahren bei hoher Geschwindigkeit - Range Extender Electric Vehicle. Quelle: atene KOM GmbH, nach Opel.

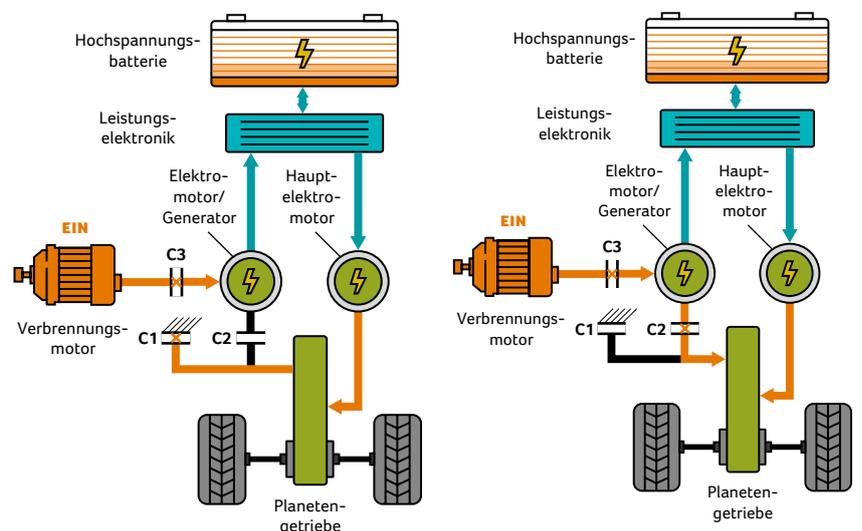


Bild 3: Fahrt mit Range-Extender im Normalbetrieb – Range Extender Electric Vehicle. Quelle: atene KOM GmbH, nach Opel.

Bild 4: Fahrt bei hohen Geschwindigkeiten mit Elektromotor und Range-Extender. Quelle: atene KOM GmbH, nach Opel.

<sup>5</sup> Austrian Mobile Power (2018). Antriebsarten E-Fahrzeuge. Factsheet #02, S. 1.

<sup>6</sup> Blessing, U. (2009). BMW ActiveHybrid 7 2009. Abgerufen von [http://www.hybrid-autos.info/index.php?option=com\\_content&view=article&id=238%3Abmw-activehybrid-7-009&catid=149&Itemid=598&lang=de](http://www.hybrid-autos.info/index.php?option=com_content&view=article&id=238%3Abmw-activehybrid-7-009&catid=149&Itemid=598&lang=de) am 12.3.2018.

<sup>7</sup> RP-Energie-Lexikon. Hybridantrieb. Abgerufen von <https://www.energie-lexikon.info/hybridantrieb.html> am 12.3.2018.

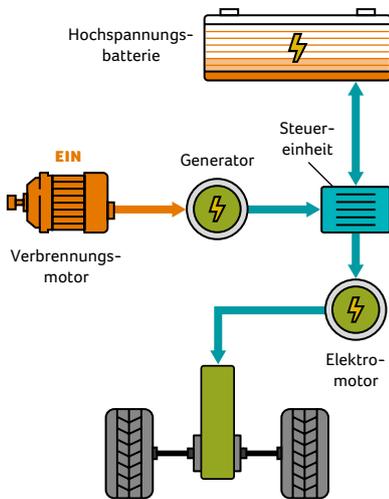


Bild 5: Serieller Hybrid: Aufbau und Funktion eines seriellen Hybridantriebs.  
 Quelle: atene KOM GmbH, nach GreenGear.de.

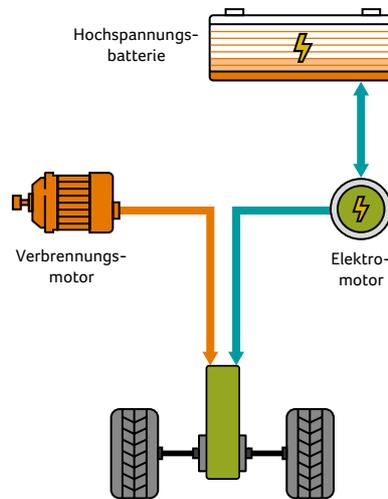


Bild 6: Paralleler Hybrid: Aufbau und Funktion eines parallelen Hybridantriebs.  
 Quelle: atene KOM GmbH, nach GreenGear.de.

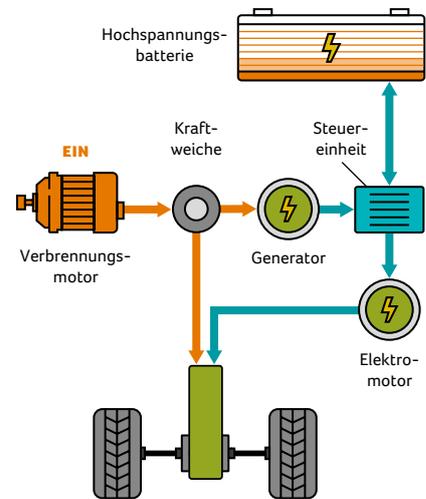


Bild 7: Mischhybrid: Aufbau und Funktion eines Mischhybridantriebs.  
 Quelle: atene KOM GmbH, nach GreenGear.de.

### BEV mit oder ohne REX

Rein batteriebetriebene Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle – BEV) werden ausschließlich von einem Elektromotor angetrieben und beziehen ihre Energie aus einer Batterie im Fahrzeug, die extern über das Stromnetz aufgeladen werden muss. Zurückgewonnene Bremsenergie kann ebenfalls in der Fahrzeugbatterie gespeichert werden.

Batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge erzeugen keine lokalen Abgasemissionen und tragen vor allem in Städten und urbanen Ballungszentren deutlich zur Reduzierung von Lärmemissionen bei.<sup>8</sup>

Einige BEV setzen sogenannte „Reichweitenverlängerungssysteme“ (Range Extender Electric Vehicle – REX oder REEV) ein. Da Batterien mit hoher Kapazität und dementsprechend hohen Reichweiten noch relativ kostenintensiv sind, stattdessen einige Hersteller ihre Elektroautos zusätzlich mit kleinen Verbrennungsmotoren aus, die durch den

hieran angeschlossenen Generator die Traktionsbatterie nachladen können.

Die Fahrzeugbatterie von REX-Fahrzeugen kann jedoch auch extern über das Stromnetz geladen werden. Für die Verknüpfung von elektrischem und mechanischem Energiefluss in REX-Fahrzeugen existieren verschiedene Konzepte. Ein Beispiel hierfür sind die Fahrmodi des Opel Ampera der ersten Generation. Bei vollgeladener Batterie und niedrigen Geschwindigkeiten (Stadtverkehr) gibt die Hochvoltbatterie dieses Fahrzeuges ihre Energie über eine Leistungselektronik an den primären Elektromotor ab, der über ein Planetengetriebe auf den Antrieb wirkt.<sup>9</sup>

Bei rein elektrischem Fahren mit hoher Geschwindigkeit dient der Generator dieses REX-Fahrzeuges als sekundärer Motor. Wenn die Hochvoltbatterie weitgehend entladen ist, erzeugt der Range Extender über den Generator die notwendige elektrische Energie für den Antriebsmotor (den Haupt-Elektromo-

tor). Die Leistungselektronik steuert den REX-Motor in diesem Betriebsmodus so, dass der Ladezustand der Traktionsbatterie stets auf einem relativ niedrigen Niveau bleibt.

Sobald bei entladener Traktionsbatterie mehr Leistung abgefragt wird, schaltet sich der Range-Extender parallel zum primären Elektromotor. Der Generator des REX gibt in diesem Betriebsmodus einen Anteil der erzeugten Energie direkt an das Planetengetriebe des Fahrzeuges weiter, während der überschüssige Energieanteil zum Aufladen der Batterie genutzt wird.

### Serielle, parallele und Misch-Hybridantriebe

Grundsätzlich ist bei den verschiedenen Hybrid-Varianten zwischen seriellen und parallelem Hybridantrieb zu unterscheiden. Diese Unterscheidung erfolgt nach der Art, wie der Verbrennungsmotor mit einem oder mehreren Elektromotoren kombiniert wird.<sup>10</sup>

<sup>8</sup> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [BMUB]. Fahrzeugkonzepte für Elektroautos. Abgerufen von <http://www.bmub.bund.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/elektromobilitaet/fahrzeugkonzepte-fuer-elektroautos/> am 12.3.2018.

<sup>9</sup> Vollmer, A. (2012). Ein Blick auf das Gesamtkonzept. So funktioniert der Opel Ampera. Abgerufen von <http://www.all-electronics.de/so-funktioniert-der-opel-ampera/> am 12.3.2018.

<sup>10</sup> GreenTech Germany (2018). Hybridautos: Was ist eigentlich ein Hybridantrieb? Abgerufen von <http://www.greentech-germany.com/hybridautos-was-ist-eigentlich-ein-hybridantrieb-a4324656> am 12.3.2018.

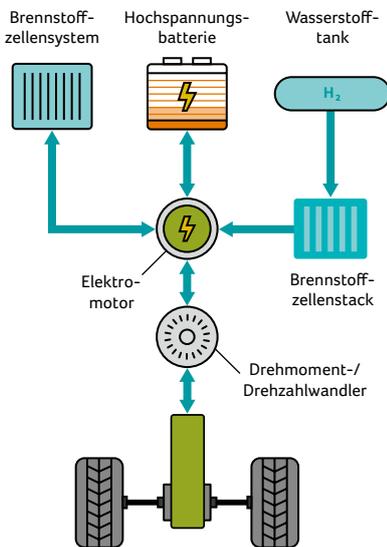


Bild 8: Funktionsprinzip Brennstoffzellenfahrzeug. Quelle: atene KOM GmbH, nach Lechner/Naunheimer.

Beim seriellen Hybridantrieb werden die Laufräder ausschließlich vom verbauten Elektromotor angetrieben. Der Verbrennungsmotor hat bei diesem Antriebskonzept keine mechanische Verbindung zur Antriebsachse. Er dient ausschließlich dazu, über seinen Stromgenerator die Energie für den Betrieb des elektrischen Motors bereitzustellen und gegebenenfalls die Traktionsbatterie zu laden.<sup>11</sup> Ein typisches Beispiel für dieses Prinzip ist der BMW i3.

Von einem parallelen Hybridantrieb spricht man hingegen, wenn sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor mit der Antriebsachse mechanisch verbunden sind. Der Vortrieb des

Fahrzeuges kann bei diesem Antriebskonzept durch einen der beiden Antriebe allein oder gleichzeitig durch beide erfolgen. Drehmomente und Leistung der beiden Motoren addieren sich im kombinierten Betriebsmodus.

Die Kombination aus seriellen und parallelem Hybridantrieb wird als Misch- oder leistungsverzweigter Hybrid bezeichnet. Der Verbrennungsmotor dient im Mischhybrid sowohl als Antriebsaggregat als auch zum Laden der Traktionsbatterie. Elektro- und Verbrennungsmotor sind mit den Laufrädern mechanisch verbunden und können einzeln oder gemeinsam auf den Antriebsstrang wirken. Die meisten Hybridfahrzeuge sind als Mischhybride konzipiert, zu denen auch der bereits genannte Opel Ampera gehört.

#### Elektroantriebe mit Brennstoffzelle

Eine weitere Form der Elektromobilität stellen die Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV auch FCH EV) dar. Sie werden rein elektrisch angetrieben und verfügen dementsprechend über einen Elektromotor. Die benötigte elektrische Energie zum Antrieb des E-Motors wird durch die chemische Umwandlung eines anderen Energieträgers erzeugt. Hierfür können prinzipiell Wasserstoff, Erdgas, Methanol oder sonstige Kohlenwasserstoffverbindungen genutzt werden, wobei die Kohlenwasserstoffverbindungen<sup>12</sup> als Träger für den benötigten Wasserstoff dienen. Bei den heutigen Serienfahrzeugen wird hochkomprimierter Wasserstoff als Energieträger eingesetzt, der in Drucktanks

aus kohlenstofffaserverstärkte Kunststoff an Bord des Fahrzeuges gespeichert wird.

Der Brennstoffzellen-Antriebsstrang von Wasserstoffautos ist modular aufgebaut. Er besteht aus:

- Brennstoffzellen-Stack
- Brennstoffzellensystem
- Wasserstofftank
- Batterie
- Elektromotor

Das zentrale Element des Antriebssystems bildet der Brennstoffzellen-Stack. Als hocheffizienter Energiewandler erzeugt er den benötigten Fahrstrom für den Betrieb des Elektromotors durch einen elektrochemischen Prozess aus Wasserstoff und dem Sauerstoff der Umgebungsluft.<sup>13</sup> Im Wasserstofftank wird gasförmiger Wasserstoff in speziellen Druckspeichertanks bei einem Druck von bis zu 700 bar gespeichert. Gegenwärtig haben fast alle Brennstoffzellenfahrzeuge eine zusätzliche Batterie verbaut, die den Gesamtwirkungsgrad durch Rekuperation verbessert und die Dynamik des gesamten Antriebs unterstützt.<sup>14</sup> Ein Fahrzeug mit diesem Antriebskonzept ist der Toyota Mirai.

Brennstoffzellenfahrzeuge tragen ebenso wie batterieelektrische Antriebe zur Reduktion von Lärmemissionen bei und können CO<sub>2</sub>-neutral betrieben werden, wenn die Erzeugung des Treibstoffes aus nachhaltigen Quellen erfolgt. ■

<sup>11</sup> Hofmann, P. (2014). Hybridfahrzeuge. Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft. Wien: Springer, S. 5.

<sup>12</sup> Blesl, M., Bruchof, D., Hartmann, N., Özdemir, D., Fahl, U., Eltrop, L. & Voß, A. (2009). Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität. Endbericht. Universität Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, S. 18.

<sup>13</sup> Geitmann, S. (o. J.). Funktionsweise von Brennstoffzellen. Hydrogeit. Der Wasserstoff-Guide. Abgerufen von <http://www.hydrogeit.de/brennstoffzellen.htm>, zuletzt aufgerufen am 19.06.2019.

<sup>14</sup> Deutsche Energie-Agentur GmbH [dena] (o. J.). Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) Abgerufen von <https://www.pkw-label.de/alternative-antriebe/brennstoffzellenfahrzeuge-fcev> am 19.06.2019.



### Über den Autor

Sebastian Martin hat Kunststoff- und Elastomertechnik an den Hochschulen für angewandte Wissenschaften Rosenheim und Würzburg studiert. Seit 2017 arbeitet er als Projektmanager für die atene KOM GmbH. Die Schwerpunkte seiner Arbeit liegen in den Themenbereichen Digitalisierung, nachhaltige Technologien und Energieeffizienz.

[s.martin@atenekom.eu](mailto:s.martin@atenekom.eu)

---

### Über die atene KOM

Die atene KOM GmbH aus Berlin begleitet den öffentlichen Sektor bei der Projektentwicklung in den Bereichen Digitalisierung, Energie, Mobilität, Gesundheit und Bildung.

Wir bringen Kommunen, Landkreise und Unternehmen zusammen und entwickeln gemeinsam die Infrastruktur für die Zukunft. Die Stärkung des ländlichen Raums steht im Fokus unserer Arbeit.

[www.atenekom.eu](http://www.atenekom.eu)