

Elektrisches Antriebssystem in der A-Klasse von Mercedes-Benz – Das eoil-System^{scl}

Von Dr. Dietbert Rudolph, eoil automotive & technologies GmbH

Es wird derzeit bei praktisch allen Antriebssystemen, die bisher den Wärmekraftmaschinen – Benzin- oder Dieselmotoren – vorbehalten sind, die Möglichkeit hinterfragt, sie durch Elektroantriebe zu ersetzen, die, sofern der Strom z.B. aus Solarenergie stammt, praktisch emissionsfrei sein können. Im weiteren Rahmen der Philosophie der Firma eoil bietet es sich daher an, über den umweltfreundlichen Antrieb von größeren Dieselmotoren mit Pflanzenöl anstelle von Dieselmotoren hinaus auch an andere, vorzugsweise kleinere Antriebe zu denken. Da die Firma immer wieder mit der Frage des Pflanzenölbetriebs von PKW konfrontiert wird, eine genauere Untersuchung allerdings ergibt, dass sich der dafür notwendige Aufwand nicht wirtschaftlich darstellen lässt, bot es sich an, über einen Elektroantrieb für PKW nachzudenken.

Ein elektrischer Antriebsstrang für ein Automobil sollte weitgehend modellunabhängig einsetzbar sein. Etablierte Fahrzeughersteller bieten mit ihren Fertigungsstandards ein so hohes Maß an Qualität, Komfort, Fahrsicherheit und Design, dass sich die Eigenentwicklung eines Fahrzeugs selbst praktisch verbietet. Viele der modernen Fahrzeuge bieten auch für einen Elektroantrieb eine geeignete Plattform. Durch Rückgewinnung der Bremsenergie sind auch Gewichtseinsparungen von untergeordneter Bedeutung. Für die weiteren Schritte in Richtung einer elektromobilen Zukunft stellt also die Entwicklung eines praxistauglichen elektrischen Antriebsstranges die eigentliche Herausforderung dar. Darüber hinaus sollte der elektrische Antriebsstrang – wie andere Komponenten im modernen Automobilbau auch – modular und skalierbar aufgebaut sein, um aus technischen und wirtschaftlichen Gründen in größerem Maßstab realisierbar zu sein. Eine Möglichkeit hierfür bietet das eoil-System^{scl}.

Die Batterien sind modular und skalierbar mit einer jeweils eigenen Lade- und Überwachungstechnik der einzelnen Zellen ausgestattet. Dies ermöglicht die Verwendung von Standard-Industriezellen und vermeidet vorzeitige Kapazitätsverluste durch unzureichend ausbalancierte Zellen. Die Ladetechnik ist autoadaptiv, d. h. der Anwender kann jede beliebige Stromquelle zur Ladung nutzen, ohne irgendwelche Parameter der Ladung selbst vorgeben zu müssen. Ein externes Ladegerät gibt es nicht. Für diese Technik des Batteriemangements steht der Name *single cell loading* (=scl).

Der Benzin- oder Dieselmotor wird durch einen neu entwickelten Hybrid-Asynchronmotor mit einem Wirkungsgrad von bis zu 96% ersetzt. Über die Fahrzeugkommunikations-Schnittstelle und eine von eoil entwickelte Steuerung, die im folgenden ebenfalls beschrieben ist, werden alle Funktionen, insbesondere alle Sicherheitsfunktionen beim Betrieb mit dem Elektromotor in gleicher Weise angesteuert und betrieben, wie dies beim Betrieb mit dem ursprünglichen Motor geschieht. Die Reichweiten, die mit diesem System erreichbar sind, lassen sich durchaus schon mit denen heute üblicher Automobile mit Verbrennungsmotoren vergleichen.

Die Firma eoil automotive & technologies GmbH

Das 2005 gegründete Unternehmen eoil automotive & technologies GmbH mit Sitz in Bad Salzdetfurth und Alfeld (Leine), Niedersachsen, entwickelte und vertreibt Umrüstsysteme, die es ermöglichen, Dieselmotoren mit Pflanzenöl zu betreiben. In der Praxis hat es sich gezeigt, dass der Pflanzenölbetrieb vor allem bei Nutzfahrzeugen sinnvoll und wirtschaftlich ist.

Im Juni 2008 begann die im Jahr 2007 mit dem Deutschen Gründerpreis ausgezeichnete Firma eoil automotive & technologies GmbH mit dem Projekt „eoil-Elektroauto“. Ziel hierbei war es, einen möglichst universell verwendbaren Elektroantrieb zu entwickeln, der zunächst als Antrieb in einen PKW (Mercedes Benz, A-Klasse) Anwendung findet. Die besondere Ladetechnik der Batterien gab dem Antrieb dieses Elektrofahrzeugs den Namen eoil-System^{scl} (scl = single cell loading).

Der Elektroantrieb kann noch durch einen Generator, der mit einem Verbrennungsmotor (ggfs. mit regenerativem Kraftstoff, z.B. mit Pflanzenöl) betrieben wird, ergänzt werden. Dieser lädt die Batterie zur Erhöhung der Reichweite oder für netzunabhängigen Betrieb auf. Der Antrieb ist dann ein echter serieller Hybridantrieb.

Elektroantriebe

Es besteht derzeit allgemeiner Konsens, dass im PKW-Bereich Elektroantriebe eine große Verbreitung finden werden. Bei diesen Antrieben kann man grob drei Varianten unterscheiden:

1. Reiner Elektroantrieb
2. Paralleler Hybridantrieb
3. Serieller Hybridantrieb.

1. Reiner Elektroantrieb

Hierbei wird die gewünschte Reichweite durch den Batteriesatz bestimmt.



2. Paralleler Hybridantrieb

Hybridantriebe nutzen die Kombination von Elektro- und Verbrennungsmotor

Beim Parallelhybridantrieb sind Elektro- und Verbrennungsmotor in Serie geschaltet und wirken beide auf den Antrieb. Die Batteriekapazität kann hierbei relativ klein gehalten werden, der Elektroantrieb wird dann praktisch nur als Unterstützung bei Beschleunigung benutzt; bei negativer Beschleunigung (Bremsen) besteht die Möglichkeit, den Elektromotor als Generator arbeiten zu lassen und so erhebliche Anteile der Bremsenergie zurückzugewinnen und in die Batterie einzuspeisen (Rekuperation). Da hierbei bereits mit relativ geringen Batteriekapazitäten nennenswerte Einsparungen erreicht werden können, werden diese Antriebe derzeit noch bevorzugt. Sie eignen sich darüber hinaus auch für schwerere Nutzfahrzeuge, da sie nur zur Unterstützung bei der Beschleunigung genutzt werden.

3. Serieller Hybridantrieb

Beim seriellen Hybridantrieb wird nun der Elektromotor als Antriebsaggregat benutzt. Ein Verbrennungsmotor dient nur zur Aufladung der Batterien. Da hierbei alle Energie für Beschleunigungen den Batterien entnommen wird, muss der Verbrennungsmotor höchstens die im Mittel verbrauchte Energie nachladen. Daraus ergeben sich zwei entscheidende Vorteile: Der Verbrennungsmotor kann sehr viel leistungsschwächer ausgelegt werden als bei Direktantrieb und es bietet sich die Möglichkeit, ihn stets mit gleicher Leistung bei optimalen Betriebsbedingungen zu betreiben.

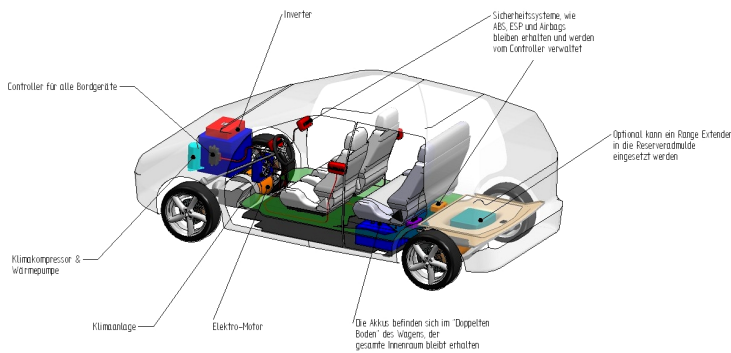
Ein serieller Hybridantrieb ist sinnvoller Weise dann einem Parallelantrieb vorzuziehen, wenn Batteriekapazitäten verwendet werden, die eine

Reichweite von mindestens etwa 100 km mit dem elektrischen Antrieb ermöglichen. Dabei sollte die Nebenbedingung eingehalten werden, dass die Batteriekapazität bei allen Betriebszuständen eine möglichst schonende Batterienutzung ermöglicht; Ströme, die zu starker Erhitzung der Batterie führen, sollten daher vermieden werden. Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben ergibt sich bei einem PKW, der im Mittel einen Kraftstoffverbrauch von ca. 6l/100km hat, eine Batteriekapazität von ca. 40kWh. Bei einer Spannung von 400V entspricht das 100Ah bei 0,5C (2 Stunden Entladezeit).

eoil-System^{sc1}

Die A-Klasse von Mercedes-Benz bietet unter dem Fahrzeugboden ein großes Platzangebot, das zum Einbau einer Batteriekonfiguration genügend hoher Kapazität geeignet ist.

Weiterhin ist die Antriebseinheit auf einem Fahrschemel angebracht, wobei der eigentlich vorgesehene bzw. vorhandene Motor leicht durch einen Elektromotor ersetzt werden kann. Es bleibt dann genügend Raum, um bei Bedarf zusätzlich einen kleinen Generator unterzubringen, der von einem Diesel- oder Benzinmotor betrieben und zur Batterieaufladung benutzt werden kann. In dieser Konfiguration liegt dann ein serieller Hybridantrieb vor. Durch geeigneten Einbau des Elektromotors sowie des Generators ist gewährleistet, dass die bei der A-Klasse infolge der sog. „Sandwichbauweise“ gegebenen Sicherheitsfunktionen bei frontalem Aufprall voll aufrecht erhalten bleiben. Als Motor wird ein neu entwickelter Hybrid-Asynchronmotor mit 96% Wirkungsgrad über einen großen Drehzahlbereich verwendet.



Rekuperation

Unter Rekuperation versteht man die Rückgewinnung der Bremsenergie. Der Antriebsmotor arbeitet dabei als Generator und speist die Bremsenergie als elektrische Energie in die Batterie zurück. Bei nahezu allen normalen Bremsvorgängen, d.h. immer dann, wenn die Sicherheitssysteme ABS, ESP und ASR* nicht benötigt werden, reicht diese Bremswirkung aus. In den Fällen, in denen die elektronische Stabilitätskontrolle benötigt wird, ist es notwendig, die Rekuperation sofort herauszunehmen.

Beim eoil-System^{sc1} ist dies so gelöst, dass bei einem leichten Antippen des Bremspedals Rekuperation den Bremsvorgang bestimmt. Wird das Bremspedal etwas stärker, also wie bei einer normalen Bremsung, betätigt, so wird die Rekuperation weggeschaltet und die Bremsung erfolgt in der ursprünglich vorgesehenen Weise unter Nutzung aller elektronischen Stabilitätsprogramme.

In der Praxis hat es sich gezeigt, dass man mit dieser Aufteilung ohne Gewöhnungsphase sehr schnell vertraut wird.

Getriebe

Ein Elektromotor ist in der Lage, selbst bei sehr geringen Drehzahlen ein sehr hohes Drehmoment zu liefern. Hieraus wird oft geschlossen, dass ein Getriebe eigentlich bei einem reinen Elektroantrieb überflüssig ist. Es gibt hingegen mehrere Gründe, Kupplung und Getriebe beizubehalten: Bei niedrigen Drehzahlen sinkt bei allen Elektromotoren der

* Allgemein und Markenunabhängig unter dem Begriff ESC (Electronic Stability Control) zusammengefasst und bekannt.

Wirkungsgrad infolge hoher Blindströme. Es ist daher sinnvoll, diesen Bereich schnell zu überwinden, hierfür eignet sich die Zwischenschaltung eines Getriebes. Ein weiterer Grund liegt darin, dass im Rekuperationsbetrieb bei niedrigen Geschwindigkeiten eine wirkungsvolle Rückspeisung von der Drehzahl abhängig ist; ein Getriebe sorgt auch hier dafür, dass der nun als Generator arbeitende Motor hinreichend schnell dreht. Im reinen Fahrbetrieb kann dann im höchsten Gang der E-Motor direkt und ohne Übersetzung als Antrieb arbeiten, dabei fallen dann auch alle Getriebeverluste weg.

Klimatisierung und Heizung

Im normalen PKW erfolgt die Heizung über den Kühlwasserkreislauf. Die Klimaanlage (AC, Aircondition) arbeitet mit einem sehr ineffizienten Kompressor. Sowohl Heizung als auch Klimatisierung können daher nicht in einem Auto mit Elektroantrieb übernommen werden.

Das eoil-System^{sc1} arbeitet sowohl für Kühlung als auch für Heizung mit einer einzigen Wärmepumpe, die vom Heizungsmodus auf den Kühlmodus umgeschaltet werden kann. Es wird ein sehr effizienter Kompressor aus industrieller Massenfertigung benutzt, so dass beide Funktionen mit dem geringstmöglichen Energieaufwand arbeiten.

Batterieaufladung über Backup-System

Der eoil^{sc1} hat eine Reichweite, die für den täglichen Bedarf an zu fahrenden Kilometern mehr als ausreichend ist. Als Option steht ein mit einem kleinen Verbrennungsmotor betriebener Generator als Backup-System zur Verfügung, mit dem die Batterien während der Fahrt oder auch im Stand aufgeladen werden können. Mit einem solchen Backup-System kann je nach Leistung eine praktisch unbegrenzte Reichweite erzielt werden.

Würde man für die Dimensionierung des Backup-Systems eine unbegrenzte Reichweite des Elektrofahrzeugs anstreben, so müsste man nur den mittleren Leistungsbedarf des Fahrzeugs zugrunde legen, der deutlich unter der Leistung liegt, die ein Verbrennungsmotor vorhält, um eine ausreichende Beschleunigung zu ermöglichen. Bei einem mittleren Leistungsbedarf von z.B. 30kW bedarf es auch nur eines 30kW-Generators um die im Dauerbetrieb im Mittel entnommene Energie nachzuladen.

Brems- und Fahrsicherheit

Bei einem Elektroantrieb sollte im Regelfall die beim Bremsen freiwerdende Energie in die Batterien zurückgespeist werden. Hierzu wird der Elektromotor als Generator benutzt. In dieser Betriebsart sind natürlich alle Brems- und Fahrsicherheitssysteme außer Kraft gesetzt. Wie im Kapitel „Rekuperation“ beschrieben wurde, wird im Falle einer unsicheren Fahrsituation, in der die Sicherheitssysteme benötigt werden, die Rekuperation abgeschaltet und es werden alle Sicherheitssysteme wieder in Betrieb genommen. Dies wird automatisch durch die bei normaler und gewohnter Fahrweise in solchen Situationen angewendete Bremspedalbetätigung ausgelöst.

Sicherheit des Batteriesystems

Hinsichtlich der inneren Sicherheit ist die Li-Ionen-Batterie das kritische Element. Die Einzelzellen erfüllen laut Herstellerdatenblatt ohne kritische Reaktionen zu zeigen extreme Tests. Dazu gehören:

- Stauch- und Aufpralltests (crash and crush tests)
- Kurzschlußtests bei verschiedenen Temperaturen
- Nageltest, bei dem ein 3mm dicker Nagel durch die Zelle getrieben wird und für 2 Stunden dort verbleibt

Je drei Zellpacks zu je 50 Zellen befinden sich samt Lade- und Steuer-elektronik in einem Edelstahlgehäuse vergossen. Die benutzte Vergussmasse entwickelt im Brandfall flammhemmende Eigenschaften. Durch das Vergießen wird auch jedes Eindringen von Wasser in die Zellen verhindert, eine Gefahr, die bei ungeschützter Montage zu vorzeitigem Leistungsverlust und zur Zerstörung der Zellen führen kann.

Ladung von Batterien aus mehreren in Serie geschalteten Einzelzellen

Das Lade-/Entladeverhalten einzelner Zellen von Akkus gleichen Typs und gleicher Bauart kann innerhalb festgelegter Toleranzgrenzen durchaus unterschiedlich sein. Batterien entstehen aus der Serienschaltung von Einzelzellen. Durch das unterschiedliche Lade-/Entladeverhalten dieser Einzelzellen kann es nach mehreren Lade-/Entlade-Zyklen zu unterschiedlichen Ladezuständen kommen, die besonders in den jeweiligen Endzuständen (voll geladen und vollständig entladen) durch Überladung bzw. Tiefentladung zu Schädigungen der Zellen führen, die bis zur Zerstörung fortschreiten können. Eine konsequente Vermeidung solcher unterschiedlicher Ladezustände ist nur durch Einzelüberwachung aller Zellen einer Batterie möglich.

In der Praxis ist es bisher wegen des hohen Aufwandes nicht üblich, eine derartige Einzelüberwachung durchzuführen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Batterien in Untergruppen aufzuteilen, die überwacht werden. Die Auswahl der Untergruppen kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Eine ausführlichere Darstellung der derzeit üblichen Energiemanagement-Verfahren findet sich z.B. in (1)*.

Eine Möglichkeit der Einzelladung aller Zellen einer Batterie soll im Folgenden beschrieben werden.

Moderne elektrische Antriebssysteme werden derzeit nahezu ausschließlich mit Li-Ionen-Akkus in verschiedenen Ausführungen realisiert. Dabei werden Einzelzellen, die je nach Typ eine Nominalspannung von ca. 3,6 V (3V bis 4,2V) liefern, zu Batterien zusammengeschaltet. Auf diese Weise werden Batterien mit Spannungen zwischen ca. 12 V und 400V konfektioniert (zwischen 4 und über 100 Zellen). Die einzelnen Zellen können dabei wiederum aus Parallelschaltung mehrerer Zellen bestehen. Abweichungen einzelner Zellen in einem solchen Parallelverband werden bei Ladung/Entladung untereinander ausgeglichen, so dass hier keine Überwachung der Einzelzellen notwendig ist. Unter einer „Zelle“ soll daher im Folgenden entweder eine Einzelzelle oder ein Parallelverband mehrerer Einzelzellen verstanden werden.

Bei diesem Verfahren werden jeweils die Zellen mit der Nominalspannung geladen. Hierfür wird für jede Zelle ein eigenes Ladegerät mit galvanisch getrenntem Ausgang benutzt.

Gegenüber herkömmlichen Ladeschemata, bei denen die Ladung mit der Gesamtspannung der Batterie erfolgt und die Balancierung der Zellen getrennt (nach verschiedenen Verfahren) erfolgt, hat dieses Ladeverfahren mehrere Vorteile:

1. Eine vom Ladevorgang getrennte Balancierung entfällt, da jede Zelle bis zur Ladeendspannung geladen wird.
2. Statt eines Hochleistungsladegerätes (z. B. im 10 KW-Bereich bei 400V Einheiten) wird eine größere Anzahl kleiner Einheiten (im genannten Beispiel im Leistungsbereich von 100W) benötigt, die als elektronische Massenware auch in der Summe preiswerter sind.
3. Einzelne Zellen der Nominalspannung lassen sich zu beliebigen Batterien konfigurieren, ohne dass für jede Endspannung ein spezielles Ladegerät erforderlich ist; Zelle und Ladegerät bilden jeweils eine Einheit.

Die Möglichkeit dieses Ladeverfahrens ergibt sich aus der Tatsache, dass Schaltnetzteile im Bereich bis zu einigen 100W noch elektronische Massenware sind, während derzeit Schaltnetzteile im 10KW Bereich sehr teure Spezialanfertigungen sind, die auch ein deutlich höheres Gefahrenpotential darstellen.

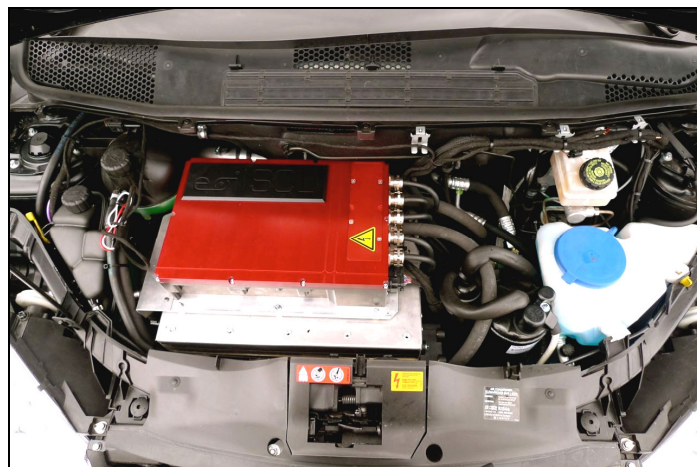
Die Wettbewerbssituation beim Elektroauto

Die Liste der Elektro-Fahrzeuge in der Literatur verlängert sich täglich. Allerdings entsprechen viele dieser Elektroautos noch nicht dem Standard, der heute beim PKW hinsichtlich Sicherheit und Komfort üblich ist.

* (1) Energy Management of Hybrid Electric Vehicles, Dennis Dörffel; Mphil/PhD project – 9 month report, University of Southampton, School of Engineering Sciences, 2002

Aus heutiger Sicht ist es eine realistische Annahme, dass die Kombination des eoil-Elektroantriebs in seiner Verbindung mit der Mercedes A-Klasse für die nächsten Jahre als echtes Elektroauto mit der zurzeit nachgewiesenen Reichweite allen Anforderungen gerecht wird.

Das Antriebssystem auf der scl-Basis wird sich zukünftig auch für andere Antriebe einsetzen lassen. Ein breites Anwendungsfeld wird sich z.B. bei Bootsantrieben eröffnen, insbesondere dann, wenn der Trend, in Erholungsgebieten Sportboote mit reinen Verbrennungsmotoren zu verbieten, zunimmt.



Technische Daten des eoil-System^{scl}

1	Zellenzahl	4800
2	Betriebsspannung	400 V
3	Art der Zellen	Lilon
4	Spannung/Kapazität pro Zelle	3,6 V/2,6 Ah
5	Gesamtkapazität	46 kWh
6	Reichweite	160 km Min/400 km Max
7	Backup-System/range-extender	4 kW
8	Elektromotor	80 kW wassergekühlt
9	AC/Heizung	Kompressor Wärmepumpe
10	Getriebe	Schaltgetriebe

Erläuterungen zur Tabelle:

- 1 P50 S96 (50 Einzelzellen parallel, 96 Sätze in Serie)
- 2 Je nach Ladezustand zwischen 3 V/Zelle und 4,2 V/Zelle entsprechend zwischen 288 V und 403 V Betriebsspannung. Im Interesse einer hohen Lebensdauer (Zyklenanzahl) des Akkus werden in der Praxis die Zellen nicht bis 3V/Zelle heruntergeladen und nur bis etwa 4V/Zelle aufgeladen.
- 4 Mittlere Kapazität
- 5 Mittlere Kapazität
- 6 400 km: Betrieb mit Sommerreifen auf trockener Straße
160 km: Betrieb mit Winterreifen auf nasser Straße/Schnee und Matsch
- 7 4 kW System als Range-extender optional verfügbar, Ottomotor für Benzin oder Äthanol. Leistungsstärkere Systeme in Entwicklung, werden nach Bedarf verfügbar sein.
- 8 Neu entwickelter Hybrid-Asynchronmotor mit einem Wirkungsgrad von 96% über einen weiten Drehzahlbereich.

Kontakt:

eoil automotive & technologies GmbH, TecCenter
31162 Bad Salzdetfurth, Tel.: 05181-8554 0

Ansprechpartner: Geschäftsführer Dr. Dietbert Rudolph

e-mail: info@eoil.de - Internet: www.eoil.de