

**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik  
**Band:** 99 (2008)  
**Heft:** 1

**Artikel:** Hybridantriebe : der erste Schritt zum Elektroauto?  
**Autor:** Dietrich, Philipp  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-855806>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 30.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Hybridantriebe – der erste Schritt zum Elektroauto?

## Eine Übersicht über die verschiedenen Hybridkonzepte

Seit 1997 sind erste Personenwagen mit Hybridantrieben auf dem Markt käuflich erwerbbar. Heute – 10 Jahre später – künden die Mehrheit der Automobilhersteller Hybridkonzepte als Antriebsvariante einiger Modelle an oder haben diese schon eingeführt. Es stellt sich die Frage, ob dies eine momentane Entwicklung ist oder ob sich hier eine generelle Veränderung des Antriebsstrangs ankündigt.

Hybride sind schon lange ein bekanntes Vorgehen bei der Lösung von Problemen – vor allem, wenn es um die Anwendung neuer Technologien geht: So wurde 1885 beispielsweise das Schiff «Rheinland» mit Segel und Dampfmaschine als Hybrid-

*Philipp Dietrich*

antrieb vom Stapel gelassen. Das Ziel der Hybridlösung ist jeweils die Kombination von Vorteilen zweier unterschiedlicher Lösungsansätze unter Vermeidung der aufgrund der Unausgereiftheit der neuen Technologien bestehenden Nachteile.

Wenn man von Hybridantrieben im Fahrzeug spricht, ist meist die Kombination eines Verbrennungsmotors mit einem Elektromotor gemeint, wobei der Verbrennungsmotor sowohl ein Diesel- als auch ein Ottomotor sein kann oder – speziell in neuerer Zeit – ein Verbrennungsmotor, der mit Erdgas oder anderen alternativen Treibstoffen betrieben wird.

Die Zielsetzungen haben sich im Laufe der Zeit gewandelt. Da die mit vertretbarem Aufwand erreichbare Leistungsfähigkeit der Batterien in den 80er- und zu Beginn der 90er-Jahre nicht für ein rein elektrisch angetriebenes Fahrzeug mit einer Reichweite von mindestens 400 km ausreichen, lag die Motivation für die Fabrikation von Hybriden darin, lokal und kurzzeitig emissionslos zu fahren. Bei der lokal emissionslosen Fahrt muss darauf geachtet werden, dass bei der Produktion des Stroms für die Batterieladung nicht grosse Emissionen beim Kraftwerk hingenommen werden müssen. Heute hingegen steht der Energieverbrauch an zentraler Stelle der Zielsetzungen. Zudem kann mit der Kombination von Verbrennungs- und Elektromotor auch das Drehmomentangebot vom Stillstand bis zu

mittleren Drehzahlen markant gesteigert werden.

Die Mehrheit der heutigen Konzepte sind autarke Lösungen, bei denen keine Ladung der Batterie aus dem Netz erfolgt. Das Hauptinteresse besteht in der Substitution von Betriebszuständen von Verbrennungsmotoren mit ungünstigem Wirkungsgrad durch elektrischen Betrieb – speziell bei tiefer Teillast und bei Leerlauf. Zudem ermöglicht der autarke Betrieb, dass das Lademangement der Batterie vollständig dem Lenker entzogen wird und somit Fahrstrategien unter Berücksichtigung der Optimierung der Lebensdauer der Batterie möglich werden.

Neuerdings wird mit dem Plug-in-Hybrid die Ankoppelung der Fahrzeuge ans Stromnetz von Neuem diskutiert, wobei sich die

Vorzeichen stark verändert haben. Zum einen sind die Batterien leistungsstärker geworden, zum anderen ist absehbar, dass das Stromnetz zunehmend mit fluktuierenden Einspeisungen zu rechnen hat und mit Batterien versucht wird, die Speicherkapazität, die am Netz angeschlossen ist, zu erhöhen, um ein stabileres Netz garantieren zu können. Inwieweit sich die Anforderungen der mobilen und stationären Bedürfnisse kombinieren lassen, bedarf noch einer vertieften Analyse.

### Klassifizierung

Die Hybridantriebe können nach dem Leistungsfluss klassiert werden (Bild 1).

### Klassifizierung nach Leistungsfluss: Parallelhybrid, serieller Hybrid, Split-hybrid

Beim Parallelhybrid können sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor je autonom Leistung ans Fahrzeug abgeben. Die Koppelung der beiden Leistungen kann über ein gemeinsames Getriebe erfolgen, oder die beiden Motoren liefern die Leistung an je eine Achse.

Beim seriellen Hybrid wird die Leistung des Verbrennungsmotors vollständig in elektrische Energie umgewandelt. Die An-

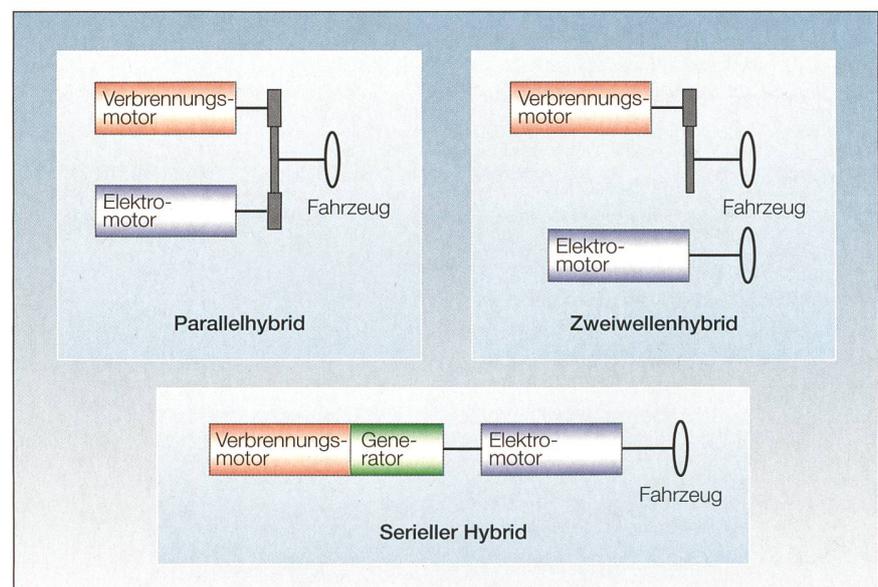


Bild 1 Struktur von Hybridantrieben.

triebsleistung wird über einen Elektroantrieb auf die Räder gebracht, wobei die Leistung aus dem vom Verbrennungsmotor angetriebenen Generator oder aus der Batterie stammen kann. Der Elektroantrieb kann aus einem zentralen Elektromotor oder aus 2 bzw. 4 Einheiten bestehen, die je nachdem bis zu Einzelradantrieben ausgebaut werden können.

Als Mischform dieser beiden Hybridkonzepte gibt es den Splithybrid, bei dem der Antrieb – je nach Schaltung des mechanischen und des elektrischen Pfads – von einem rein parallelen Hybrid zu einem seriellen, rein elektrische Leistung übertragenden Antrieb umgeschaltet werden kann.

### Klassifizierung nach funktionaler Gewichtung: Mikrohybrid, Mildhybrid

Als zweite Klassierung wird die funktionale Gewichtung des elektrischen Anteils herangezogen. Mikrohybride sind Lösungen, bei denen der Elektromotor nur wenig grösser als der Starter und die Lichtmaschine ist – typisch 2–6 kW. Damit kann neben den Funktionen «Starten» und «Speisen des Bordnetzes» auch ein kurzzeitiges Leistungsloch überbrückt und die Start-Stop-Funktion ermöglicht werden. Mildhybride verfügen über etwas grössere Elektromotoren, die eine Unterstützung des Verbrennungsmotors im Bereich bis etwa 10 kW ermöglichen. Bei Mildhybriden können bis etwa 50% der Bremsvorgänge rekuperiert werden. Beide Hybridkonzepte sind in der Regel als Parallelhybride ausgebildet.

### Grosse Bandbreite von realisierten Hybridkonzepten

Wenn man in den Bereich der Vollhybride vorstösst, bei denen ein substanzieller Anteil des Betriebsgebiets (zumindest im Stadtverkehr) elektrisch gefahren werden kann, gibt es eine Vielfalt von Lösungsvorschlägen. So sind hier viele Splithybride anzusiedeln. Man findet aber auch Parallelhybride. Sogar serielle Konzepte kann man sich hier vorstellen.

Serielle Hybridantriebe sind vor allem dort zu finden, wo der elektrische Antrieb eher dominiert und der Verbrennungsmotor eher die Funktion eines Batterieladegeräts (Auxilliary Power Unit, APU) erfüllt. Hier sind grössere Batterien oder zumindest sehr leistungsfähige Elektrizitätsspeicher gefragt. Ein Vorteil der seriellen Anordnung liegt darin, dass der Verbrennungsmotor vollständig entkoppelt vom aktuellen Fahrerwunsch betrieben werden kann. Damit können der Betriebspunkt und die Dynamik weitgehend für die Emissionsminimierung eingesetzt werden. Mit den zunehmend

leistungsfähigeren Motormanagementsystemen und den hoch entwickelten Abgasnachbehandlungsmöglichkeiten ist man allerdings weniger auf diese Betriebsweise angewiesen, um Niedrigstmissionskonzepte darstellen zu können.

Die Nutzung der Netzladung (Plug-in-Hybrid) kann in Kombination mit allen Konzepten verwendet werden. Sie machen aber erst ab einer Batteriegrösse Sinn, die einen relevanten Anteil der durchschnittlichen Tagesfahrstrecke abdeckt. Diese liegt je nach Region zwischen 10 und 30 km.

Wie die Entwicklung der letzten 20 Jahre zeigt, sind die Variationsmöglichkeiten in der Kombination der Elemente und deren Anwendung sehr gross, sodass heute bereits eine grosse Bandbreite von realisierten Hybridkonzepten, zumindest im Umfang von fahrbaren Versuchsträgern, vorhanden ist. Die im Handel erhältlichen Hybridvarianten sind entsprechend dem noch jungen Marktsegment etwas limitiert, wobei die nächsten 2 Jahre hier eine grössere Vielfalt bringen dürften.

### Der Elektroantrieb

Die Integration eines elektrischen Antriebs – oder Zusatzantriebs – macht die Erhöhung des verfügbaren Drehmoments möglich. Vor allem ab Stillstand kann – je nach Bauart des Elektromotors – das Drehmoment stark gesteigert werden. Zudem kann innerhalb der thermischen Erwärmung des Motors das verfügbare Drehmoment um den Faktor 2 bis 2,5 vergrössert werden, was die Auslegung auf eine kurzfristige Spitzenleistung ermöglicht. Dies wird umso interessanter, je näher die geforderte Dauerleistung und die Spitzenleistung in einem Verhältnis von etwa 2 liegen (Bild 2).

Die Nutzung des Elektromotors als Generator, um Bremsenergie zu rekuperieren, oder die Möglichkeit, mit dem Elektromotor im Idealfall die mechanischen Bremsen

ganz zu ersetzen, sind weitere Vorteile, die genutzt werden können. Beide Eigenschaften alleine rechtfertigen aber die Elektrifizierung nicht, sondern sind willkommene Zusatznutzen.

Durch innovative Rotorgestaltung und durch leistungsfähigere Leistungselektronik können heute Hochleistungselektromotoren gebaut werden, die den ganzen Drehzahlbereich eines Fahrzeugantriebs ohne Schaltgetriebe abdecken können.

### Der Speicher

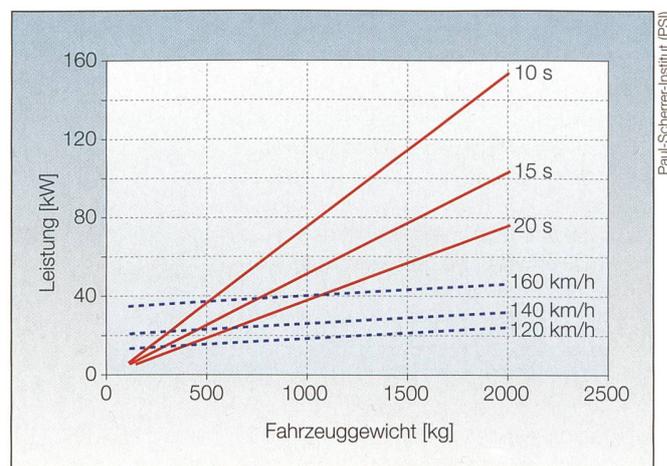
Neben dem Tank für den Betrieb des Verbrennungsmotors wird in einem Hybridfahrzeug als zweite Energiespeichereinheit meist eine Batterie (NiMH<sup>1)</sup>, Li-Ion<sup>2)</sup>, oder Zebra<sup>3)</sup> verwendet.

Als Ersatz der Batterien sind Superkondensatoren denkbar, sofern das Konzept hohe Spitzenleistungen bei niedrigem Energiebedarf verlangt. Bei Superkondensatoren sind 4–5 Wh/kg nutzbare Energiedichte realisierbar. Somit kann mit einer Einheit von etwa 50 kg die kinetische Energie einer Abbremsung aus rund 120 km/h genutzt werden. Für längere lokal emissionsfreie Fahrten ist man auf Batterien angewiesen.

Unter dem Aspekt der Lebensdauer der Batterie wird der nutzbare Bereich der Batterie in weiten Betriebsbereichen eingeschränkt. Im Falle der autarken Hybride kann die Ladung der Batterie im Voraus vollautomatisiert optimiert werden. Beim Plug-in-Hybrid kann eine eingeleitete Ladung durch den Fahrer oder durch das Netz nicht vorhersehbar unterbrochen werden. Dies führt zu weiteren Einschränkungen des Betriebsbereichs, was für eine spezifiziertere lokal emissionsfreie Reichweite zu einer grösseren Batterie führt.

Ein weiteres Speichermedium ist das Schwungrad, wobei dieses als schweres mechanisch verbundenes Schwungrad oder als hoch drehende, im Vakuum fixierte

**Bild 2 Leistungsbedarf eines Fahrzeugs für die Höchstgeschwindigkeit und die Beschleunigung von 0 auf 100 km/h.**



Welle ausgelegt werden kann. Beiden Ausführungsformen ist es eigen, dass sie eine weitere Wandlungsstufe benötigen. So muss bei der mechanischen Verbindung eine stufenlose Drehzahlanpassung sichergestellt werden, während es beim hoch drehenden Rotor einen elektrischen Wandler braucht, um die Leistung ins Vakuumgehäuse hinein- und herauszubringen.

## Verbrauchsreduktion

Das Potenzial der Verbrauchseinsparung ist gekoppelt mit dem Anteil an elektrischem Fahren. So kann beispielsweise bei einem Mikrohybrid, der im Wesentlichen einen Start-Stopp-Betrieb ermöglicht, eine Reduktion von 3–12% erzielt werden. Die grosse Spanne hängt vom gefahrenen Fahrprofil – also Stadt-, Überland- oder Autobahnfahrt – sowie von der Fahrzeugklasse ab.

Bei Hybridantrieben, die eine vollständig lokal emissionsfreie Fahrt erlauben, ist eine Verbrauchseinsparung von 25–45% möglich. Dabei wird von einer ausgeglichenen Ladebilanz der Batterie ausgegangen.

Die Mehrkosten für den Hybridantrieb sind in erster Näherung proportional zur Grösse des elektrischen Leistungsanteils und des Verbrauchseinsparpotenzials. Neben der Grösse der Elektromaschinen und der Leistungselektronik ist die Batterie der grösste Kostenfaktor.

Interessant sind auch die verschiedenen Betriebsstrategien. Einerseits können bestehende Verbrennungsmotoren in verbrauchsgünstigen und emissionsarmen Betriebspunkten betrieben werden, und andererseits können durch den Start-Stopp-Betrieb Leerlaufphasen eliminiert und die Fahrzeuge über den Elektromotor mit deutlich höheren Startdrehzahlen beschleunigt werden, bevor der gefeuerte Motorbetrieb gestartet wird.

Ein alternatives Betriebskonzept besteht darin, den Motor von Grund auf mit einer anderen Drehmomentcharakteristik auszuliegen, sodass der Verbrauch generell verbessert werden kann. Als Beispiel kann hier eine Motorauslegung nach dem Miller-Cycle<sup>4)</sup> erwähnt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, die vorhandene elektrische Energie zu nutzen, um das Abgasnachbehandlungssystem auf Temperatur zu bringen. Damit kann die Warmlaufphase stark verkürzt werden.

Die automatisierte Lastverteilung zwischen dem Verbrennungsmotor und dem Elektromotor einerseits und dem Energiespeicher andererseits reduziert auch die Möglichkeit des Fahrers, suboptimale Betriebspunkte zu wählen. Es bleibt immer noch ein weiter Spielraum, um als Fahrer die Dynamik der Leistungsentfaltung zu be-

stimmen und so zwischen Fahrspass und Verbrauchsminimum zu entscheiden.

## Bewertung der Konzepte

Bei der energetischen Bewertung und Gegenüberstellung von Hybridkonzepten und konventionellen Antrieben – dies gilt aber auch ganz generell bei Systembetrachtungen – ist nicht nur der Verbrauch vom Tank bis zum Rad zu betrachten, sondern es muss der Gesamtenergieaufwand während der Herstellungs- und Nutzungsphase (inklusive der Entsorgung und Wiederverwendung) des Fahrzeugs beurteilt werden. Für ein Mittelklassefahrzeug gilt die grobe Abschätzung, dass je etwa 10% des Energieaufwands für die Herstellung des Fahrzeugs und für die Herstellung des Treibstoffs aufgewendet werden müssen. Die Nutzung im Fahrbetrieb verschlingt etwa 80% des Energieaufwands, während für die Entsorgung etwa 1% des Gesamtenergiebedarfs benötigt wird. Bei einem sparsamen Fahrzeug reduziert sich der Anteil im Fahrbetrieb zulasten der Herstellung. Falls nun energieintensive Komponenten wie die Batterie ersetzt werden müssen, bedeutet dies eine zusätzliche Erhöhung des Energieverbrauchs während der Herstellung des Fahrzeugs.

Es ist allerdings auch klar, dass die energetische Bewertung nur eines von verschiedenen Kriterien zur Bewertung eines Fahrzeugs bzw. eines Antriebstrangs sein kann, die zudem auch stark von den Anforderungen des Nutzers abhängen.

## Ausblick

Der Hybridantrieb ist auf bestem Weg, bei verschiedenen Automobilanbietern einen Platz im Sortiment der Antriebe zu finden. Je mehr der Anteil des elektrischen Antriebs zunehmen wird, umso mehr kann man sich die Frage stellen, wie der Anteil

der an Bord erzeugten Elektrizität erzeugt wird, denn umso weniger spielt die dynamische Charakteristik dieses Aggregats eine Rolle. Man kann sich beispielsweise den kleinen Verbrennungsmotor mit integriertem Generator vorstellen. Eine andere Alternative ist eine Brennstoffzelle, die den Strom herstellt und die Batterie lädt, aber gleichzeitig das Fahrzeug auch direkt antreiben kann. In diesem Fall muss neben dem Energiewandler auch die Speicherung des chemischen Treibstoffs (hier des Wasserstoffs) angepasst werden.

Man kann sich aber auch vorstellen, dass die Batterie eine hohe Energiedichte aufweisen und gleichzeitig so billig sein wird, dass eine reine Speisung vom Netz verbunden mit einer genügenden Reichweite möglich wird, wobei die Frage der Ladung der Batterie noch genauer evaluiert werden muss.

Die Zukunft wird entscheiden, welche Technologie welchen Anteil an den Personenwagenantrieben erzielen kann. Weiter wird es interessant sein zu sehen, ob die heutige Form des Personenwagens so bestehen bleibt oder ob neue Konzepte der Personenmobilität in grösserem Massstab Akzeptanz finden werden.

## Angaben zum Autor

Dr. **Philipp Dietrich** arbeitet seit 1999 am Paul-Scherrer-Institut. Seit 2006 leitet er dort das Kompetenzzentrum Energie und Mobilität des ETH-Bereichs.  
PSI, 5232 Villigen, philipp.dietrich@psi.ch, www.ccem.ch

<sup>1</sup> NiMH: Nickel-Metallhydrid.

<sup>2</sup> Li-Ion: Lithium-Ionen.

<sup>3</sup> Zebra: Wiederaufladbare Hochtemperaturbatterie. Der Südafrikaner Johan Coetzer gab der von ihm entwickelten Batterie den Namen seines Lieblingstiers, des Zebras.

<sup>4</sup> Miller-Cycle: Arbeitsverfahren für Verbrennungsmotoren nach Ralph H. Miller mit dem Ziel, eine tiefere Temperatur bei Kompressionsbeginn zu erzielen, um so die NO<sub>x</sub>-Emissionen zu reduzieren.

## Résumé

### Les systèmes de propulsion hybrides – un premier pas vers la voiture électrique?

*Aperçu des différents concepts hybrides.* Depuis 1997, les premières voitures de tourisme à propulsion hybride sont disponibles sur le marché. Et actuellement – 10 ans plus tard – la plupart des constructeurs automobiles annoncent ou ont déjà lancé des concepts hybrides comme variante de propulsion pour certains modèles. On peut se demander s'il s'agit d'un phénomène passager ou si un changement général du groupe propulseur s'annonce.