

## Kapitel 2

# Definitionen und Klassifizierung der Hybridkonzepte

Entsprechend der Grundstrukturen der Kombination von Verbrennungsmotor, E-Maschine, Generator, Batterie und Getriebe können Hybridantriebe in:

- Serielle Hybridantriebe,
- Parallele Hybridantriebe und
- Leistungsverzweigte und kombinierte Hybridantriebe (gemischthybride Antriebe)

eingeteilt werden, siehe Abb. 2.1.

Außerdem können Hybridfahrzeuge auch nach ihrem Hybridisierungsgrad eingeteilt werden. Man unterscheidet:

- Micro-Hybrid
- Mild-Hybrid
- Full-Hybrid
- Plug-In-Hybrid

Eine Übersicht über die Funktionen und Nutzen der verschiedenen Hybridvarianten gibt Tab. 2.1.

Micro-, Mild- und Full-Hybride werden, sofern sie keine Möglichkeit zur Nachladung des elektrischen Energiespeichers über das Stromnetz haben, auch als autarke Hybridantriebe bezeichnet.

### 2.1 Serieller Hybrid

Der serielle Hybrid oder fallweise auch Serienhybrid benannt (oder „elektrisches Getriebe“) besteht aus einem Verbrennungsmotor, der mit einem Generator gekoppelt ist sowie einer Elektromaschine zum Antrieb der Räder. Es besteht keine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und der Antriebsachse, die Verbindung erfolgt nur elektrisch über 2 Umrichter (oder einen Gleichrichter und

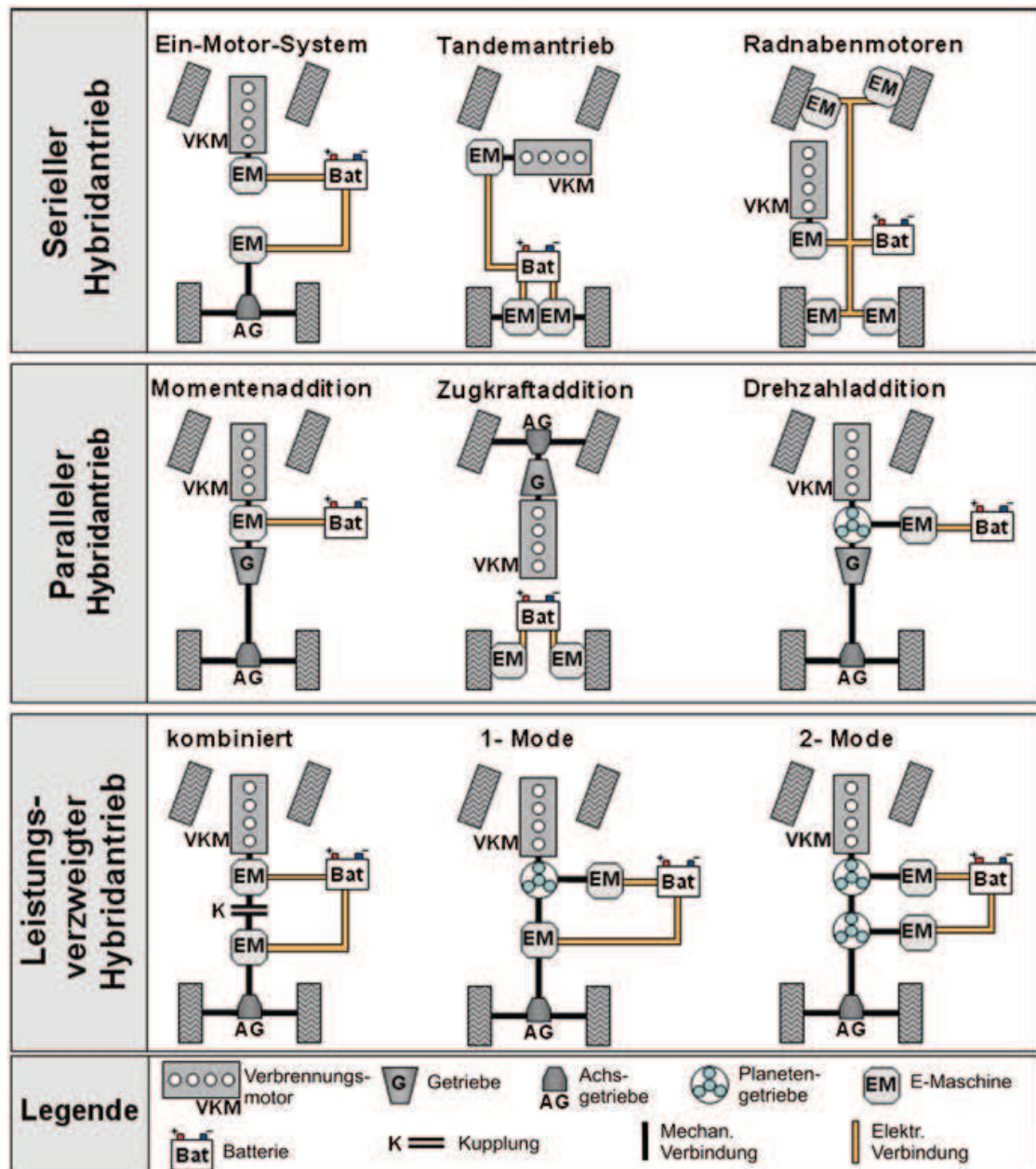


Abb. 2.1 Verschiedene Strukturen von Hybridantrieben

einen Umrichter) und dem so genannten „elektrischen Zwischenkreis“. Die Antriebskomponenten sind „elektrisch“ in Serie geschaltet, siehe Abb. 2.1.

Die Energie wird von der „Ladegruppe“ Verbrennungsmotor und Generator erzeugt und sowohl direkt zum Elektrofahrmotor transferiert als auch zum Nachladen der Batterie benützt. Die Ladegruppe kann unabhängig vom Fahrzustand – auch im Stillstand – laufen und die Batterie laden. Es existieren sowohl Varianten mit einem Fahrmotor und Differential als auch Konzepte mit zwei Fahrmotoren pro Achse unter Wegfall des Differenzials bis hin zu Radnabenmotoren, siehe Abb. 2.1.

**Tab. 2.1** Übersicht Funktionen, Charakteristika und Beispiele der verschiedenen Hybridvarianten

Funktionen, Charakteristika und Beispiele	Autarker Hybrid			Plug-In-Hybrid		Batterie elektrisches Fahrzeug (BEV)
	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Full-Hybrid	Klassische Auslegung	Batterie elektr. Fzg. mit Range Extender (REEV)	
Konstruktive Merkmale	Leistungsfähiger Anlasser und regelbarer Generator oder Riemenstarter-Generator (RSG)	Kurbelwellen-Starter-Generator (KSG)	Trennkupplung zum Verbrennungsmotor oder mehrere E-Maschinen	Wie Full-Hybrid aber mit zusätzlichem Anschluss zur Nachladung der Batterie über das externe Stromnetz	BEV mit Range Extender Einheit (z.B. Verbrennungsmotor) zur Reichweiten-Verlängerung	Batterie-elektrisches Fahrzeug
Hybridstrukturen	RSG (parallel)	KSG (parallel)	seriell, parallel, leistungsverzweigt	seriell, parallel, leistungsverzweigt	seriell, parallel, leistungsverzweigt	
Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Start/Stop</li> <li>Eingeschränkt Rekuperation (über intelligentes Generatormanagement)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Start/Stop</li> <li>Rekuperation</li> <li>Boosten</li> <li>Generatorbetrieb</li> <li>Eingeschränkt E-Fahren bei niedriger Geschw.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Start/Stop</li> <li>Rekuperation</li> <li>Boosten</li> <li>Generatorbetrieb</li> <li>E-Fahren für kurze Reichweiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Start/Stop</li> <li>Rekuperation</li> <li>Boosten</li> <li>Generatorbetrieb</li> <li>E-Fahren für mittlere Reichweiten</li> <li>Ext. Nachladung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>E-Fahren für größere Reichweiten (Hauptantrieb)</li> <li>Rekuperation</li> <li>Ext. Nachladung</li> <li>Range Extender Generatorbetrieb bei niedrigem Batterieladezustand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>E-Fahren für größere Reichweiten</li> <li>Rekuperation</li> </ul>
Leistung E-Maschine	2 – 3 kW (8kW)	10 – 15 kW	>> 25 kW	>> 25 kW	>> 40 kW	>> 40 kW
Spannungsniveau	12 – 48 V	48 – 150 V +12 V Bordnetz	> 200 V +12 V Bordnetz	> 200 V +12 V Bordnetz	> 200 V +12 V Bordnetz	> 200 V +12 V Bordnetz
Hybridisierungsgrad $P_E/(P_E+P_{VKM}) \times 100\%$	< 5% (bei 48V bis 10%)	5 - 10%	10 - 50%	30-60%	50 - 80%	100%
Typische Batterietechnologie	Blei-Säure, Super Caps, AGM	NiMH, Li-Ion, Super Caps, +Blei-Säure	NiMH, Li-Ion, (+Blei-Säure)	NiMH, Li-Ion, (+Blei-Säure)	Li-Ion, (+Blei-Säure)	Li-Ion, (+Blei-Säure)
Batteriekapazität	<< 1kWh	< 1kWh	1 - 5 kWh	5 – 10 kWh	8 – 15 kWh	> 15 kWh
Energiezufuhr	Kraftstoff (Tankstelle)					Strom aus Stromnetz
Verbrauchseinsparung (CO <sub>2</sub> ) <sup>a</sup> (NEFZ basiert)	5 –10 %	10 – 20 %	> 15 %	- 50 %	- 50 %	100 %
Ausgeführte Beispiele	<ul style="list-style-type: none"> <li>BMW 1er und 3er efficient Dynamics</li> <li>Smart mhd</li> <li>Mercedes A,B-Klasse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Honda Insight IMA</li> <li>Mercedes S400h</li> <li>Honda CR-Z</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toyota Prius</li> <li>Mercedes E300 BlueTEC Hybrid</li> <li>Audi Q5 Hybrid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Toyota Prius Plug-In</li> <li>Volvo V60 Plug-in-Hybrid</li> <li>Audi Duo 1997</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Opel Ampera (Chevrolet Volt)</li> <li>Audi A1 e-tron</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mitsubishi i-MiEV</li> <li>Nissan Leaf</li> <li>Smart fortwo electric drive</li> </ul>

<sup>a</sup> Strom aus Stromnetz wird beim Verbrauch nicht berücksichtigt bzw. als „CO<sub>2</sub>-frei“ bewertet.

### 2.1.1 Klassische Auslegung

Der klassische Serienhybrid kombiniert drei gleich groß dimensionierte Maschinen: Verbrennungskraftmaschine, Generator und Fahrmotor. Für eine gewünschte Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs muss der Fahrelektromotor so groß dimensioniert werden, dass er diese Leistung auch kontinuierlich abgeben kann. Auf Grund der begrenzten Speicherkapazität kann die elektrische Energie nicht dauerhaft aus der Batterie entnommen werden. Die erforderliche Leistung muss daher von der Ladegruppe direkt erzeugt werden können, was dazu führt, dass die Maschinen der Ladegruppe gleich groß oder wegen der Verluste sogar größer dimensioniert werden müssen.

Da sich diese Auslegung an der Höchstleistung (Höchstgeschwindigkeit) orientiert, sind die Maschinen zumeist so groß dimensioniert, dass alle Antriebsaggregate im Stadtbetrieb in der extremen Teillast betrieben werden oder ein stark intermittierender Betrieb mit einem hohen Anteil an zwischengespeicherter Energie in der Batterie resultiert. Dies hat relativ schlechte Wirkungsgrade und daher einen vergleichsweise hohen Kraftstoffverbrauch zur Folge.

### ***2.1.2 Auslegung auf Grundlast***

In diesem Fall wird die Ladegruppe auf eine im Durchschnitt benötigte Leistung im Stadtbetrieb ausgelegt und in der Regel auch in einem verbrauchs- und emissionsgünstigen Lastpunkt (1-Punktbetrieb meistens bei Volllast) betrieben. Die dynamischen Anforderungen aus dem realen Betrieb wie Leistungsspitzen zum Beschleunigen oder Rekuperationsphasen beim Verzögern werden von der Batterie abgedeckt. Eine derartige Auslegung ist meistens nur dann anwendbar, wenn das Belastungsprofil im Wesentlichen bekannt ist, wie beispielsweise bei Stadtbussen. Die Ladegruppe kann in diesem Fall nicht die elektrische Energie erzeugen, die für eine kontinuierliche Höchstgeschwindigkeit nötig wäre.

### ***2.1.3 Auslegung für Plug-In-Hybridfahrzeuge ausgeführt als Elektrofahrzeuge mit Range Extender<sup>1</sup>***

Eine ähnliche Auslegung wird fallweise auch bei Plug-In-Hybridfahrzeugen angewendet, die als Elektrofahrzeuge mit Range Extender in serieller Hybridbauweise ausgeführt sind. Die Motor-Generatoreinheit, auch als „Range Extender“ bzw. Auxiliary Power Unit (APU) bezeichnet, wird wesentlich kleiner dimensioniert als der Elektrofahrmotor und nur bei Bedarf zur Reichweitenerhöhung eingesetzt. Die Hauptenergie zur Fortbewegung wird über extern am Stromnetz aufgeladene Batterien bereitgestellt (Plug-In-Hybridfahrzeuge). Je nach Beladungszustand der Batterie sowie der Betriebsstrategie dient die Ladegruppe nur zur Vermeidung des „Liegenbleibens“ bei leerer Batterie oder deckt den Grundlastbetrieb ab, während die Energie für die Dynamikanforderungen im Verkehr bzw. für hohe Geschwindigkeiten aus der Batterie stammt. Den Vorteilen in Bezug auf Gewicht, Bauraum und Kosten stehen Nachteile bei hohen Performanceanforderungen und niedrigem Batterieladezustand entgegen, da nur eine Art Notbetrieb möglich ist.

---

<sup>1</sup> Die Begriffe Plug-In Hybrid und Elektrofahrzeuge mit Range Extender werden hier nach ihrer technischen Funktion verwendet, siehe auch Kap. 2.7. Aus förderrechtlichen Gründen kann die Bedeutung und Abgrenzung zueinander in verschiedenen Ländern unterschiedlich definiert werden.

Auch diese Auslegung vermeidet den Teillastbetrieb der Ladegruppe – sie wird in einem verbrauchs- und emissionsgünstigen Lastpunkt (meistens 1-Punktbetrieb bei Vollast) betrieben.

#### **2.1.4 Vor- und Nachteile des Serienhybridantriebs**

Der Vorteil des Serienhybridantriebs ist die grundsätzliche Möglichkeit, dass die Ladegruppe gänzlich unabhängig vom Radantrieb geregelt werden kann.

Daher hat dieser Antrieb auch das größte Potenzial für Emissionsverminderungen, wie die Aufzählung folgender Möglichkeiten zeigt:

- Verzögerter Start der Ladegruppe, dadurch kann der Verbrennungsmotor und im Speziellen die Abgasnachbehandlung auf den Start vorbereitet werden, Motor- und Katalysatorvorwärmung sind möglich
- Emissionsoptimierte Startstrategie
- Betrieb der Verbrennungskraftmaschine (VKM) im Bestpunkt (Verbrauch und/oder Emissionen)
- Stationärer Betrieb mit Vermeidung von dynamischen Emissionsspitzen
- Abschaltstrategie
- Strategien für den intermittierenden Betrieb (z. B. abhängig von der Katalysator-Auskühlung)
- Freiere Positionierung der Ladegruppe – Ermöglichung neuer Fahrzeugkonzepte

Der Nachteil des Serienhybridantriebs ist die mehrmalige Energieumwandlung, die je nach Ausführung und Konzept im Extremfall bis zu 11 Einzelverluste mit sich bringen kann, siehe Abb. 2.2. Dies erklärt, warum bisher mit einem Serienhybridantrieb kaum die Kraftstoffverbrauchswerte eines konventionellen Direktantriebs erreicht werden können. Der Vorteil, der durch den Betrieb des Verbrennungsmotors im verbrauchsoptimalen Bereich erreicht wird, kann leicht durch die elektrischen und chemischen Energieumwandlungsverluste aufgezehrt werden. Speziell wenn viel Energie in der Batterie zwischengespeichert werden muss, ist mit schlechten Verbrauchswerten zu rechnen. Die Betriebsstrategie muss gegensteuern und versuchen, die Verluste zu minimieren. Ein großer Fortschritt wurde diesbezüglich mit dem Einsatz von Li-Ionen-Batteriesystemen erreicht, da diese deutlich geringere Be- und Entladeverluste aufweisen.

Bisher konnten sich serielle Hybridsysteme nicht im PKW Bereich etablieren. Auch das vorerst serielle Opel-Flextrime Antriebskonzept von GM wurde für die Serieneinführung des Opel Ampera auf ein leistungsverzweigtes Konzept umgestellt, siehe auch Kap. 6: Ausgeführte Hybridkonzepte. Einzig einige Plug-In-Hybrid Konzeptfahrzeuge mit einem kleinen Verbrennungsmotor als Range Extender nützen diese Variante.

Auf Grund des bekannten Fahrprofils und den spezifischen Anforderungen werden Serienhybridsysteme allerdings gerne bei Hybridbussen für den Stadtbereich eingesetzt.

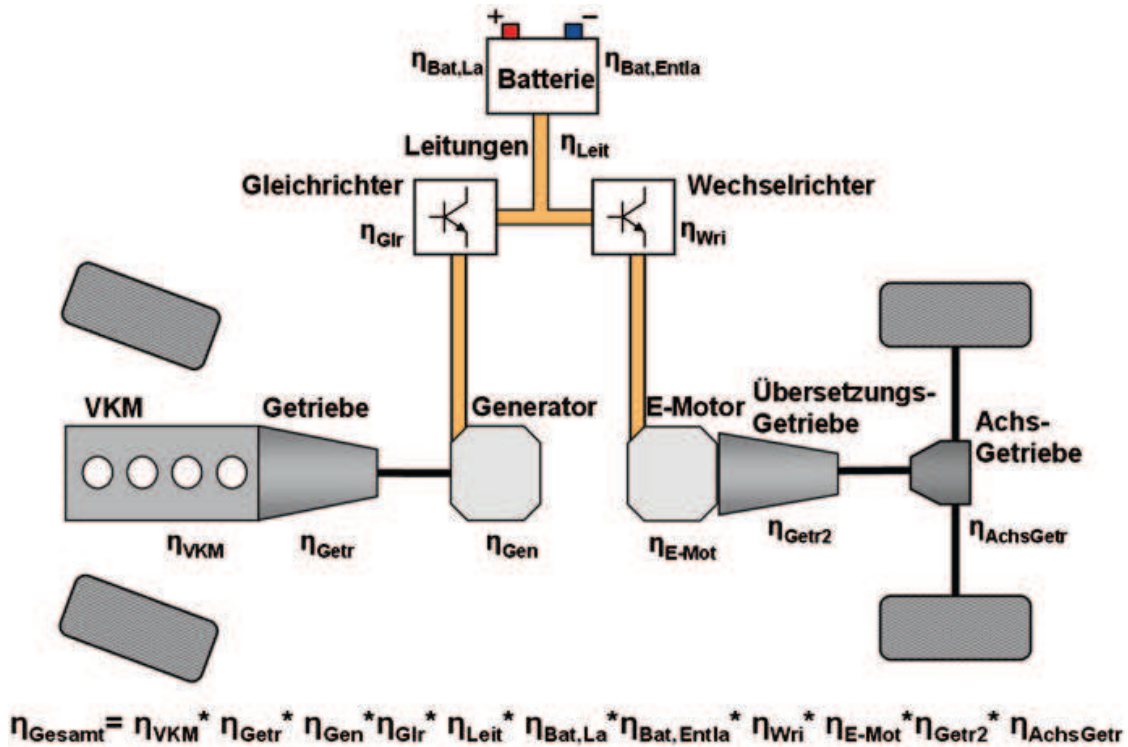


Abb. 2.2 Wirkungsgradkette bei einem Serienhybrid

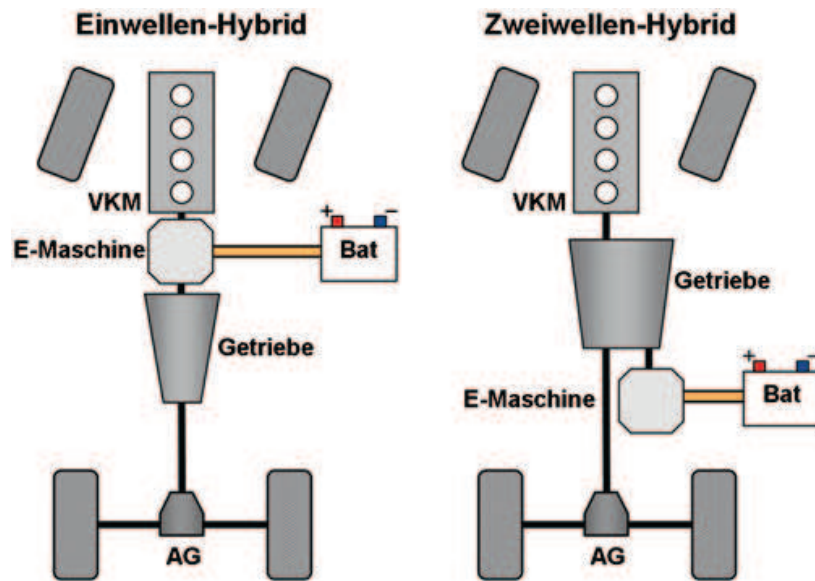
## 2.2 Parallelhybrid

Die zweite große Gruppe von Hybridantrieben sind die so genannten Parallelhybriden, bei denen ein direkter, mechanischer Durchtrieb vom Verbrennungsmotor bis zum Rad möglich ist. Der elektrische Zweig ist sozusagen „parallel“ und kann nach Belieben zu- oder abgeschaltet werden, siehe Abb. 2.1. Der Verbrennungsmotor und der Elektromotor sind idealerweise abkuppelbar – das Fahrzeug kann dann rein elektrisch, konventionell oder gemischt betrieben werden. Ein Addieren der abgegebenen Leistungen ist möglich. Solche Konzepte beinhalten neben den beiden Antriebsmotoren und Energiespeichern ein oder auch mehrere Getriebe, Kupplungen oder Freiläufe.

Die abgegebenen Leistungen von Elektro- und Verbrennungsmotor können mechanisch mittels Drehzahladdition (mit einem Planetengetriebe), Momentenaddition (direkte Kopplung, mit Stirnradgetriebe oder Kette) oder Zugkraftaddition (Elektromotor und Verbrennungsmotor wirken auf unterschiedliche Antriebsachsen) überlagert werden.

### 2.2.1 Parallelhybrid mit Momentenaddition

Bei der Momentenaddition lässt sich das Verhältnis der Drehmomente der beiden Energiewandler frei variieren, während die Drehzahlen in einem starren Verhältnis



**Abb. 2.3** Einwellen- und Zweiwellen-Parallelhybridsysteme

zueinander stehen. Eine Entkopplung der beiden Antriebssysteme kann über einen Freilauf oder eine Kupplung realisiert werden.

Man unterscheidet zwischen der Einwellenlösung, wobei der Elektromotor und der Verbrennungsmotor auf die gleiche Getriebeeingangswelle wirken, und der Zweiwellenlösung, wobei der Elektromotor und der Verbrennungsmotor auf unterschiedliche Getriebewellen (Getriebe-Ein- bzw. -Ausgangswelle) angekuppelt sind, siehe Abb. 2.3. Beispiel für die Einwellenlösung sind Kurbelwellenstartergeneratoren – eine Zweiwellenlösung ist in Kap. 6.2.1 AVL ECO Target oder auch beim Audi Duo in der Einleitung bei der Historie von Hybridfahrzeugen, siehe Abb. 1.17, beschrieben.

### 2.2.2 Parallelhybrid mit Drehzahladdition

Bei der Drehzahladdition werden die Leistungen der Energiewandler mittels eines Planetengetriebes zusammengeführt, wobei das Momentenverhältnis starr durch die Übersetzung des Getriebes vorgegeben ist. Die Drehzahlen der Antriebssysteme können frei gewählt werden, siehe Abb. 2.1.

### 2.2.3 Parallelhybrid mit Zugkraftaddition

Bei einem Hybrid mit Zugkraftaddition handelt es sich im physikalischen Sinne ebenfalls um eine Momentenaddition, wobei die beiden Energiewandler auf unterschiedliche Achsen des Fahrzeugs wirken (z. B. Verbrennungsmotor auf Vorder-

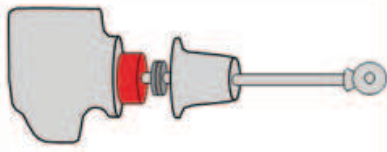
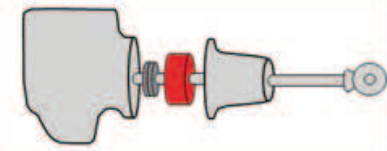
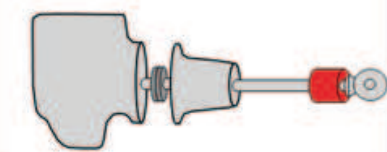
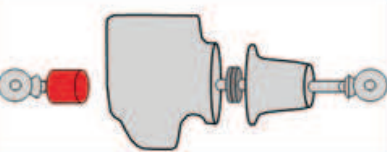
<b>P1</b>		E-Motor drehfest mit Verbrennungsmotor verbunden
<b>P2</b>		E-Motor am Getriebeeingang, durch Kupplung vom Verbrennungsmotor getrennt
<b>P3</b>		E-Motor hinter dem Getriebe
<b>P4</b>		E-Motor an separater, vom Verbrennungsmotor nicht angetriebener Achse

Abb. 2.4 Nomenklatur für Parallel-Hybridantriebssysteme [Quelle: Daimler]

achse, elektrischer Antrieb auf Hinterachse). Bekanntestes Beispiel hierfür ist der Peugeot 3008 Hybrid4, siehe Abb. 6.92 in Kap. 6.10.1.

Fallweise werden auch verschiedene Hybridsysteme kombiniert wie beispielsweise beim Lexus RX400h, siehe Kap. 6.6.1. Bei diesem wirkt auf die Vorderachse ein leistungsverzweigter Hybridantrieb, siehe auch nächstes Kap. 2.3, sowie ein Elektroantrieb auf die Hinterachse, wodurch eine Zugkraftaddition realisiert werden kann.

Eine von Daimler definierte Nomenklatur für Parallelhybridantriebssysteme hat sich mittlerweile in der Branche durchgesetzt. Darin wird ein P für „Parallel“ und eine Ziffer für die Positionierung der E-Maschine verwendet, siehe Abb. 2.4.

### 2.2.4 Vor- und Nachteile des Parallelhybridantriebes

Vorteil dieser Konfiguration ist, dass nur mehr eine elektrische Maschine nötig ist, die wahlweise als Fahrmotor oder als Generator arbeitet. Die Dimensionierung der Antriebskomponenten kann besser gestaltet werden, da sich die Auslegung der VKM an der Höchstgeschwindigkeit und die der elektrischen Komponenten am Stadtbetrieb orientieren kann (große VKM, kleiner elektrischer Antrieb). Allerdings ist auch eine umgekehrte Dimensionierung möglich (kleine VKM, großer E-Antrieb).

Weiters bildet der direkte mechanische Durchtrieb vom Verbrennungskraftmotor bis zum Rad vor allem im höheren Geschwindigkeitsbereich die besten Wirkungs-



grade, weil die elektrischen Umwandlungsverluste wegfallen. Somit besitzt dieser Antrieb das höchste Potenzial für das Erzielen eines geringen Kraftstoffverbrauchs.

Etwas nachteilig für Abgasemission und Energieverbrauch kann je nach Ausführung sein, dass der Verbrennungsmotor nicht mehr stationär und somit nicht unabhängig vom Radantrieb arbeiten kann. Somit entfallen einige der beim Serienhybrid erwähnten Möglichkeiten, z. B. den Verbrennungsmotor stationär im verbrauchs- bzw. emissionsoptimalen Punkt zu betreiben.

## 2.3 Leistungsverzweigter Hybrid

Bei leistungsverzweigten Hybriden (engl. Power Split Hybrid) oder auch „gemischthybriden Antrieben“ wird die zu übertragende mechanische Leistung in einen mechanischen und einen elektrischen Pfad aufgeteilt. Leistungsverzweigte Getriebe bieten die Möglichkeit, den Aufwand an mechanischen Getriebekomponenten bei gleichen Fahrleistungen des Fahrzeugs im Vergleich zu Automatik- und automatisierten Schaltgetrieben zu verringern.

Einen Sonderfall stellt der so genannte kombinierte Hybrid dar, der mit zwei E-Maschinen und einer Kupplung eine serielle und eine parallele Betriebsweise erlaubt, siehe Abb. 2.5. Eine ausführliche Beschreibung dieses Systems samt den möglichen Betriebsstrategien befindet sich in Kap. 6.15.4 VW twinDRIVE.

Elektrisch leistungsverzweigte Getriebe, fallweise auch electrically continuous variable transmission (E-CVT) genannt, bestehen aus der Kopplung von Getriebeelementen mit einem elektrischen Variator. Dieser setzt sich aus mindestens zwei elektrischen Maschinen, wobei eine motorisch und eine generatorisch arbeitet, und zugehöriger Leistungselektronik zusammen. Mit der Wandlung von mechanischer in elektrische Energie wird die Einstellung unterschiedlicher Drehzahlen und Drehmomente der Wellen des Variators ermöglicht. Ein wesentliches Merkmal dieser Getriebe ist die Aufteilung der durch die Verbrennungskraftmaschine (VKM) erzeugten Leistung auf einen mechanischen und einen elektrischen Zweig. Abbildung 2.6 zeigt schematisch die Struktur eines leistungsverzweigten Getriebes mit zwei elektrischen Maschinen, bei der diese in Verbindung mit einem Radsatz die Aufgabe eines Variators übernehmen. Der Radsatz kann dabei aus einer Anordnung von Planetensätzen, einfachen Übersetzungen und Kupplungen bestehen. Die Auswahl eines geeigneten Radsatzes sowie die Wahl der Übersetzungen sind von hoher Bedeutung für die auftretenden Leistungen an den elektrischen Maschinen.

$\omega_{VKM}$	Winkelgeschwindigkeit der Verbrennungskraftmaschine [ $s^{-1}$ ]
$M_{VKM}$	Drehmoment der Verbrennungskraftmaschine [Nm]
$P_{VKM}$	Leistung der Verbrennungskraftmaschine [kW]
$\omega_{VE}$	Winkelgeschwindigkeit am Variatoreingang [ $s^{-1}$ ]
$M_{VE}$	Drehmoment am Variatoreingang [Nm]
$P_{VE}$	Leistung am Variatoreingang [kW]
$\omega_{VA}$	Winkelgeschwindigkeit am Variatorausgang [ $s^{-1}$ ]

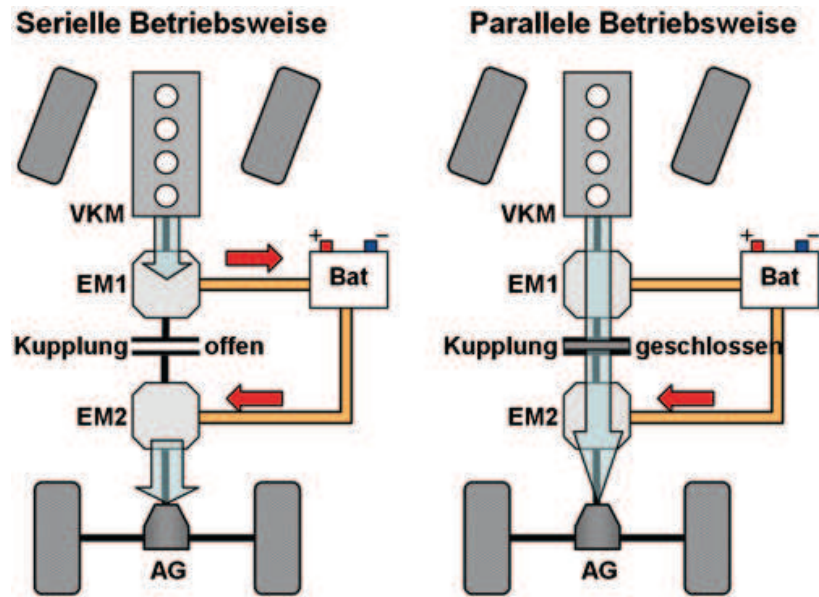


Abb. 2.5 Kombiniertes Hybridantriebsstrang in serieller und paralleler Betriebsweise

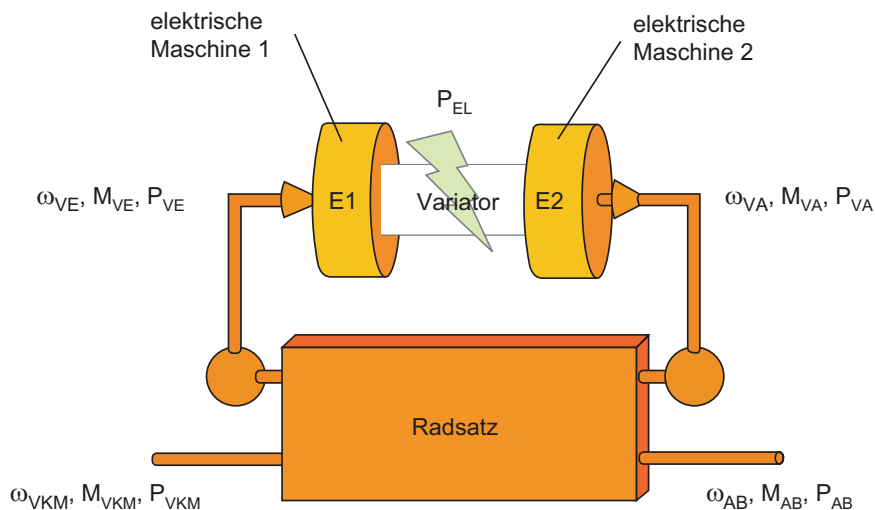


Abb. 2.6 Genereller Aufbau eines leistungsverzweigten Getriebes mit 2 elektrischen Maschinen [1]

$M_{VA}$	Drehmoment am Variatorausgang [Nm]
$P_{VA}$	Leistung am Variatorausgang [kW]
$\omega_{AB}$	Winkelgeschwindigkeit am Getriebeausgang [ $s^{-1}$ ]
$M_{AB}$	Drehmoment am Getriebeausgang [Nm]
$P_{AB}$	Leistung am Getriebeausgang [kW]

Bei einem leistungsverzweigten Getriebe mit den elektrischen Maschinen E1 und E2 wird die von der Verbrennungskraftmaschine bereitgestellte Leistung  $P_{VKM}$  im Falle reiner Leistungsteilung zu einem Teil über einen mechanischen Pfad mit hohem Wirkungsgrad  $\eta_{MECH}$  und zum anderen Teil über den elektrischen Zweig mit geringerem Wirkungsgrad  $\eta_{E1} \times \eta_{E2}$  übertragen, siehe Abb. 2.7. Die Aufteilung der