

# Die Integration elektrischer Achsantriebe in Hybrid – und Elektrofahrzeuge

## Inhalt

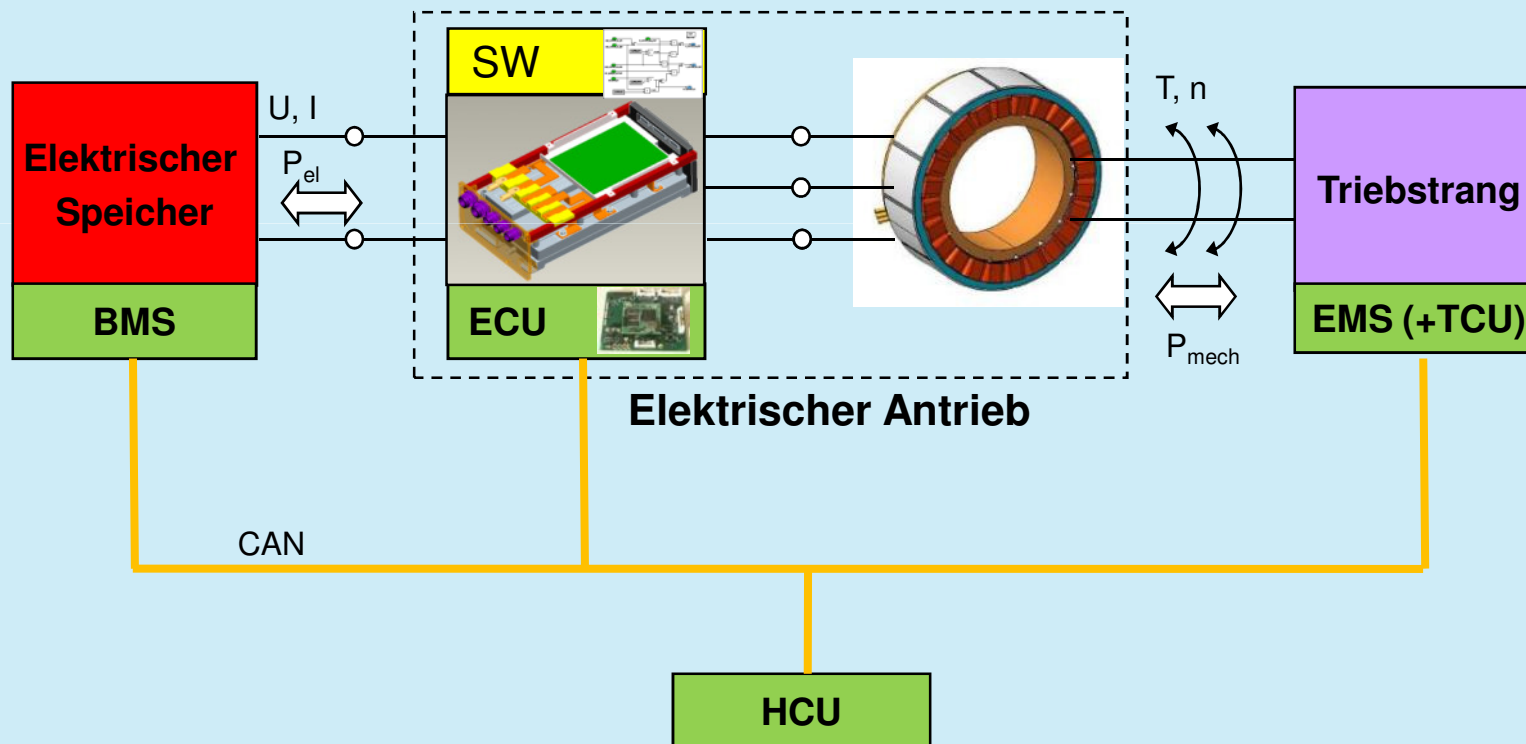
- ↻ Einführung
- ↻ Topologie eines elektrischen Antriebes
- ↻ Integrierte elektrische Antriebseinheit
- ↻ Elektrische Maschinen für elektrische Achsantriebe
- ↻ Wachstumsgesetze elektrischer Maschinen
- ↻ Wahl der Getriebeübersetzung
- ↻ Elektrische Achsantriebe mit automatisiertem Schaltgetriebe
- ↻ Hybridgetriebe mit elektrischer Leistungsverzweigung
- ↻ Zusammenfassung

## Einführung

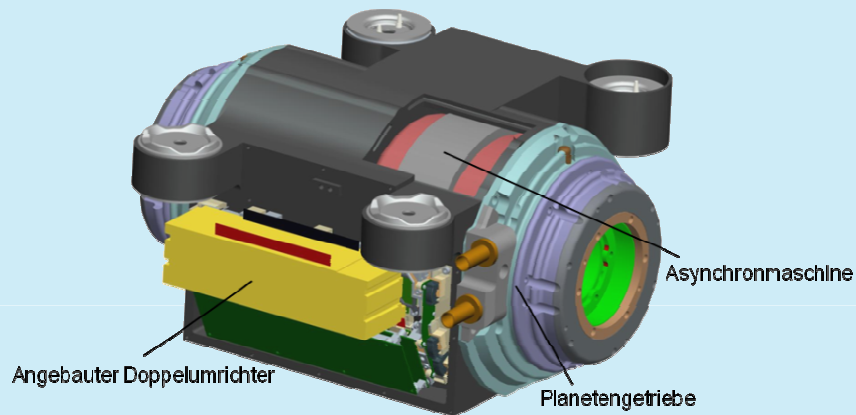
Im Vergleich zu einer elektrischen Maschine die zwischen dem Verbrennungsmotor und dem Fahrzeuggetriebe eingebaut ist und einer elektrischen Maschine die in einem Achsantrieb integriert ist ergeben sich signifikante Unterschiede:

- ☞ Der Einbauraum für die EM ist nicht das Hauptmerkmal
- ☞ Es kann eine hocheffiziente EM mit kleiner Baugröße gewählt werden
- ☞ Der Achsantrieb kann modular aufgebaut werden, da er keine Schnittstelle zum Verbrennungsmotor und Fahrzeuggetriebe besitzt.
- ☞ Ein hochintegriertes Achsmodul einschließlich der Leistungselektronik ist realisierbar
- ☞ Abhängig von der Art der EM ist eine Trennkupplung vorzusehen um unerwünschte und unkontrollierbare Brems- u. Pendelmomente im Fehlerfall und Schleppmomente im Normalfall vom Rad bzw. den Rädern fernzuhalten

## Topologie eines elektrischen Antriebs



## Integrierte elektrische Antriebseinheit



### Vorteile der Integration:

- ☞ Reduzierung von Steckverbindungen und Zuleitungen
- ☞ Reduzierung des Bauraumes
- ☞ Günstige Beeinflussung des EMV – Verhaltens
- ☞ Modulare Bauweise mögliche

Elektrische Drehstrommaschinen sind besonders geeignet für den Einsatz als Achsantriebe.

Drehstrommaschinen		
Asynchronmaschine	Synchronmaschinen	
Mit Kurzschluss - Käfig	Mit Permanentmagneterregung	Mit Fremderregung

### Asynchronmaschinen

- ↻ Robust
- ↻ Hohe Überlastfähigkeit
- ↻ Betriebsverhalten unkritisch im Fehlerfall
- ↻ Hohe Drehzahlen möglich
- ↻ Einfache Herstellbarkeit, Montage freundlich
- ↻ Kostengünstigste Drehstrommaschine
- ↻ Wirkungsgradnachteile im unteren und Wirkungsgradvorteile im oberen Drehzahlbereich
- ↻ Keine Probleme mit der Verfügbarkeit von Magnetmaterial

#### 1. Permanentmagneterregte Maschinen ( PSM/IPM)

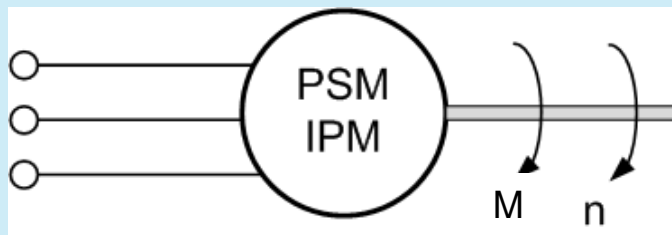
- ↻ Vergleichsweise hoher Wirkungsgrad im unteren Drehzahlbereich  
aber niedriger Wirkungsgrad im oberen Drehzahlbereich
- ↻ Baugröße im Vergleich zur ASM ca. 15% kleiner
- ↻ Im Fehlerfall kritisch zu bewerten ( Überspannung, Bremsmoment, Pendelmoment)
- ↻ Die Verfügbarkeit von Magnetmaterial könnte zukünftig problematisch werden
- ↻ Schleppverluste im Leerlauf
- ↻ Im Vergleich zur ASM ca. 30 % höhere Herstellkosten



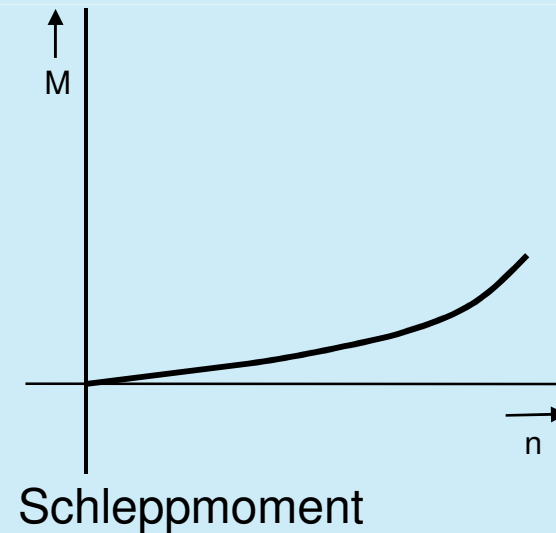
### Synchronmaschinen

Permanentmagneterregte Synchronmaschine PSM / IPM

Verhalten im Normalbetrieb



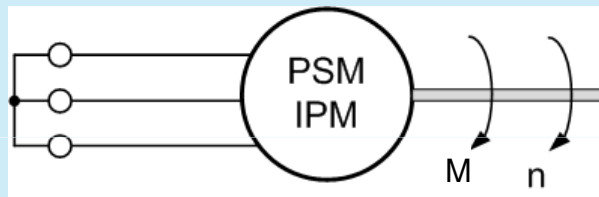
Leerlauf



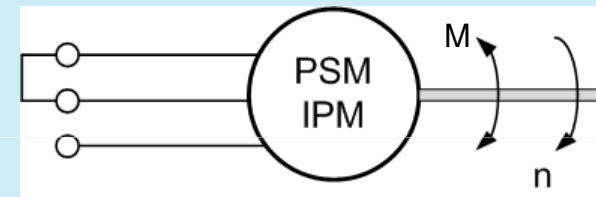
## Synchronmaschinen

Permanentmagneterregte Synchronmaschine

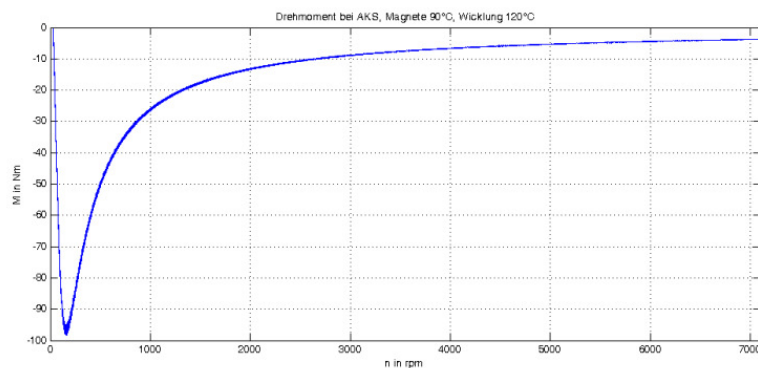
Verhalten im Fehlerfall



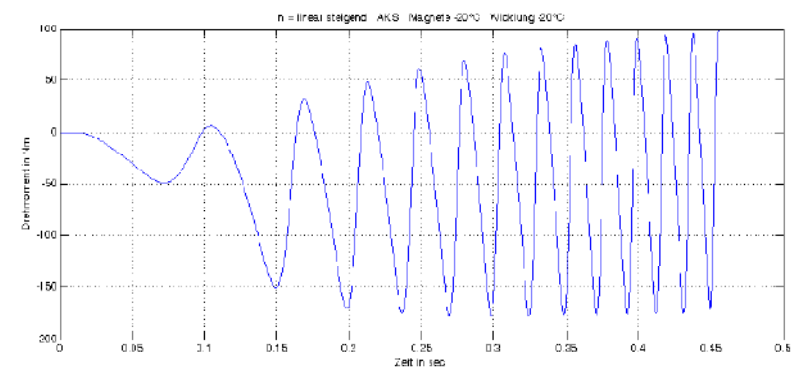
Dreiphasiger Kurzschluss



Zweiphasiger Kurzschluss



Bremsmoment



Pendelmoment

### Synchronmaschinen

#### 2. Fremderregte Synchronmaschinen

- ↻ Unkritischer im Fehlerfall als die PSM/IPM bei aktiver Entregung des Feldes
- ↻ Entwärmung der isolierten Feldwicklung im Rotor problematisch
- ↻ Schutz der Feldwicklung im Rotor gegenüber Fliehkräfte erforderlich
- ↻ Zusätzliches Feldstellgerät und Bürstensystem mit Schleifring notwendig
- ↻ Relativ hoher Wirkungsgrad im unteren und bei eingeschränkter Leistung auch im oberen Drehzahlbereich
- ↻ Keine Schleppmomente im Leerlauf
- ↻ Die Herstellkosten entsprechen etwa denen der PSM / IPM
- ↻ Baugröße inklusive Schleifring – u. Bürstensystem vergleichbar mit ASM

## Wachstumsgesetze elektrischer Maschinen

### 1. Gleichung

$$f_s \cdot n_s = \frac{P_{mech}}{V \cdot 2\pi}$$

$P_{mech}$ : Mechanische Leistung

$f_s$ : Drehschub

mit  $V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot l$

$n_s$ : Rotordrehzahl

$\widehat{B}$ : Magnetische Flussdichte

und  $f_s \sim \widehat{B} \cdot \widehat{A}$

$\widehat{A}$ : Strombelag

Hält man  $f_s$  konstant, dann haben schnell laufende Maschinen eine kleinere Baugröße bei gleicher Leistung als langsam laufende Maschinen.

## Wachstumsgesetze elektrischer Maschinen

### 2. Gleichung

$$f_s \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot l = M$$

D: Rotordurchmesser

l: Rotorlänge

$$f_s \cdot V = M$$

V: Rotorvolumen

M: Drehmoment

Die Größe einer elektrischen Maschine wird durch das Drehmoment  $M$  bestimmt, wenn  $f_s$  konstant gehalten wird.

## Wahl der Getriebeübersetzung

Die Getriebeübersetzung ist hauptsächlich von der maximalen Fahrzeuggeschwindigkeit und der maximalen Drehzahl der elektrischen Maschine abhängig.

Die Raddrehzahl kann nach der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$n = \frac{v}{0.377 \cdot r} \quad v = [\text{km/h}], \text{ Fahrzeuggeschwindigkeit}$$

$$n = [\text{l/min}], \text{ Raddrehzahl}$$

$$r = [\text{m}], \text{ Dynamischer Radius}$$

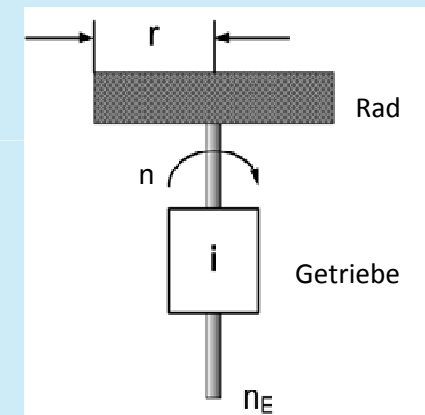
Die Getriebeübersetzung ergibt sich dann zu:

$$i = 0.377 \frac{r \cdot n_E}{v}$$

### Beispiel:

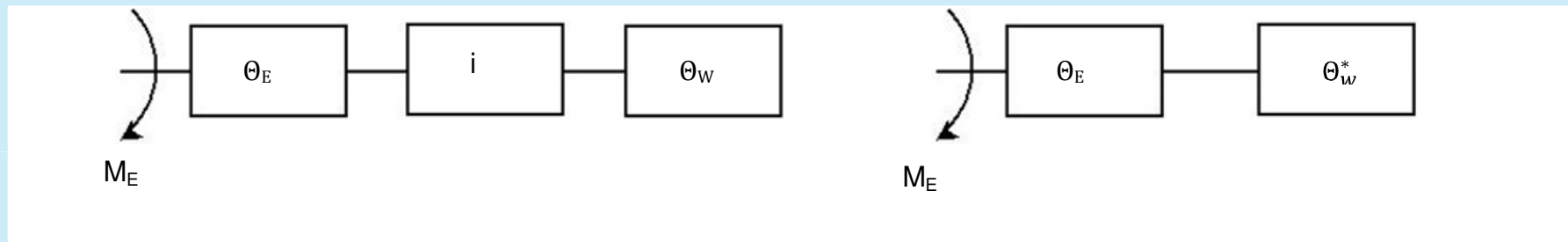
$v = 190 \text{ km/h}$ ,  $r = 0,3\text{m}$ . (Raddrehzahl:  $n = 1700 \text{ rpm}$ )

Für eine max. Drehzahl der EM von  $15000 \text{ rpm}$  ergibt sich eine Getriebeübersetzung von  $i \approx 9$



## Wahl der Getriebeübersetzung

Mechanisches Modell eines Achsantriebes



Die unten angegebene Gleichung für die Getriebeübersetzung gilt nur, wenn kein Fahrwiderstand während der Beschleunigung angenommen wird.

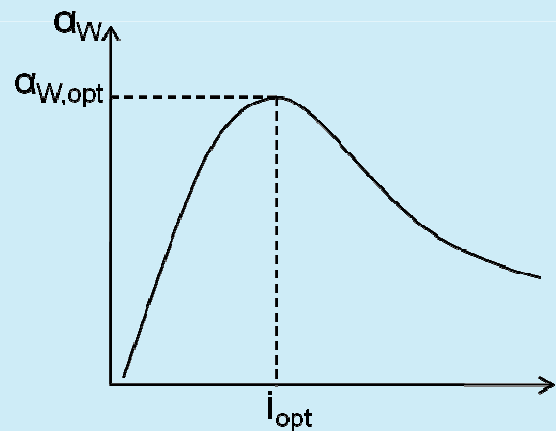
$$i_{opt} = \sqrt{\frac{\theta_W}{\theta_E}}$$

oder

$$\theta_W^* = \frac{\theta_W}{i_{opt}^2} = \theta_E$$

## Wahl der Getriebeübersetzung

Mit einem bestimmten Drehmoment der elektrischen Maschine erhält man die Kennlinie der Beschleunigung über der Getriebeübersetzung



$$\alpha_{w, opt} = \frac{T_E}{\sqrt{\Theta_w \cdot \Theta_E}}$$

Beispiel: (Allradantrieb)

$$m = 1600 \text{ Kg}$$

$$\Theta_v = 160 \text{ Kgm}^2$$

$$\Theta_w = 40 \text{ Kgm}^2$$

$$\Theta_E = 0,04 \text{ Kgm}^2$$

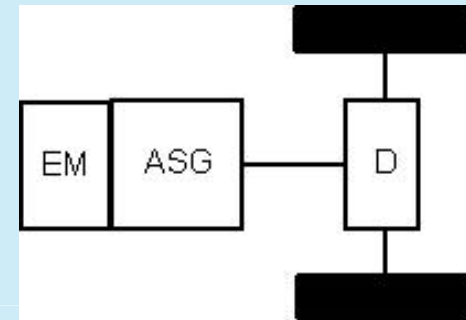
$$\longrightarrow i_{opt} \approx 30$$



## Elektrischer Achsantrieb mit automatisiertem Schaltgetriebe (ASG)

Hierbei wird die nachfolgende Schaltstrategie vorgeschlagen:

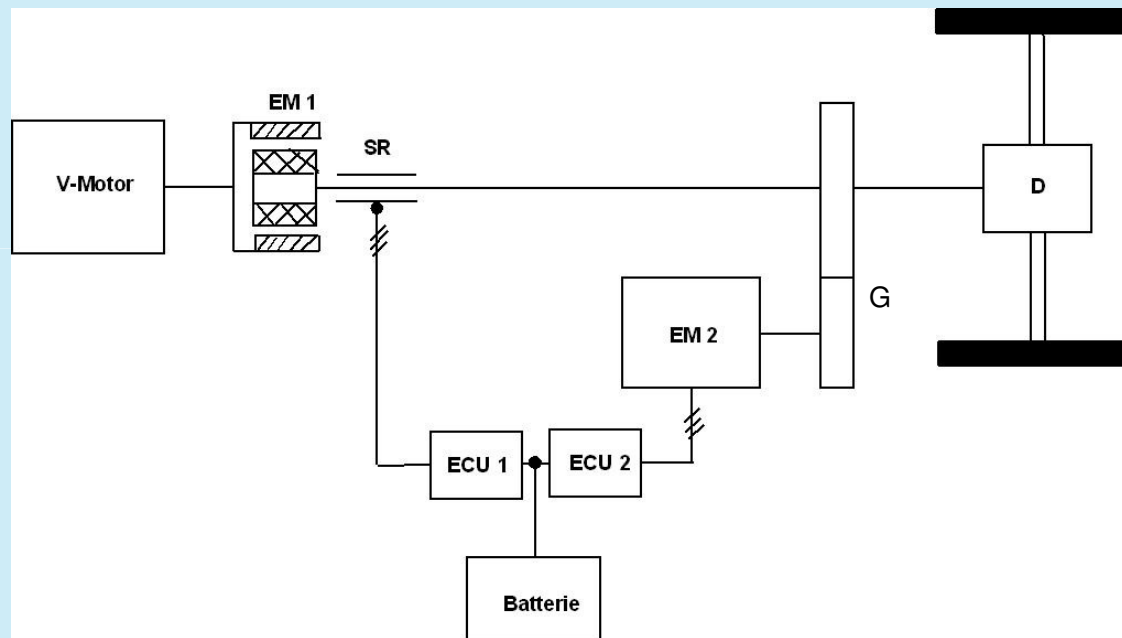
- ☞ Drehmomentsollwert der EM auf Null setzen
- ☞ Ausschalten der alten Gangstufe
- ☞ Drehzahl der Getriebeeingangswelle mittels EM auf die Drehzahl der neuen Gangstufe anheben bzw. absenken
- ☞ Synchronisation noch bestehender kleiner Differenzdrehzahlen im Getriebe
- ☞ Einschalten der neuen Gangstufe
- ☞ Drehmomentsollwert der EM auf das gewünschte Drehmoment setzen



Mit dieser Schaltstrategie ist es möglich die Unterbrechungszeit für das Drehmoment beträchtlich im Vergleich zur herkömmlichen Lösung zu reduzieren.

## Hybridgetriebe mit elektrischer Leistungsverzweigung für eine Antriebsachse

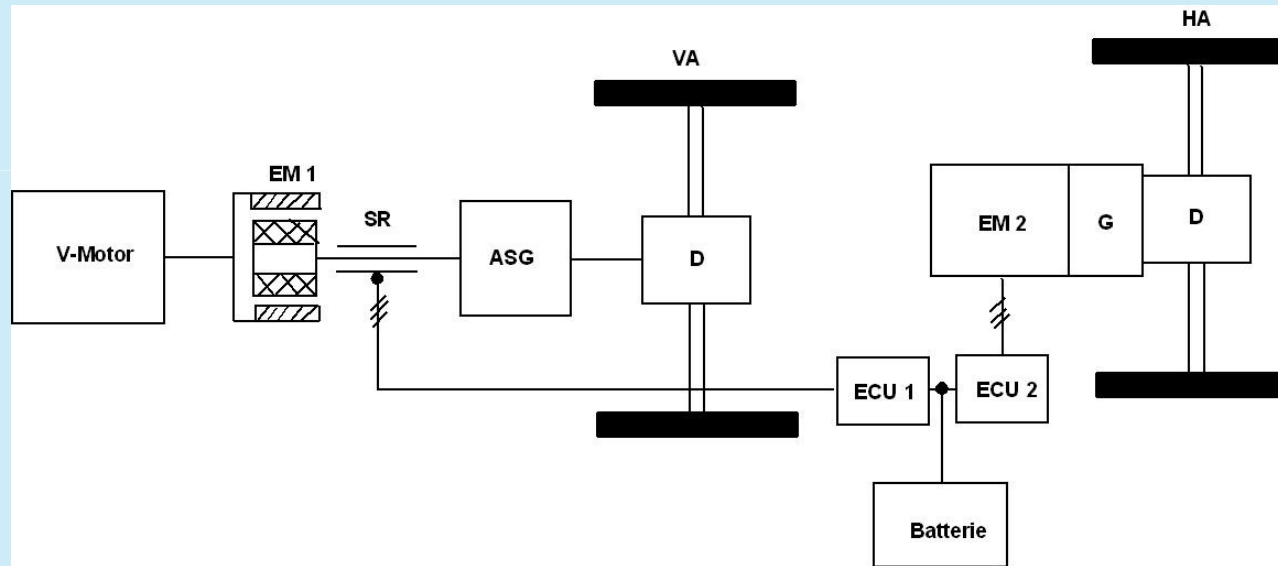
Das Grundprinzip soll anhand des nachfolgenden Bildes erläutert werden.



- ☞ Vollhybrid darstellbar
- ☞ Elektrisch variables Getriebe (EVT)
- ☞ Grad der Leistungsverzweigung wird durch die Differenzdrehzahl in EM1 bestimmt

## Hybridgetriebe mit elektrischer Leistungsverzweigung für zwei Antriebsachsen

Die Basisvariante kann durch die im nachfolgenden angegebene Variante zu einem Allradfahrzeug erweitert werden.



☞ Vollhybrid als permanenter Allrad darstellbar

☞ EVT für Hinterachse

☞ EVT z.B. mit zwei Schaltstufen auch für Vorderachse

## Zusammenfassung

Neben der funktionalen Integration eines elektrischen Achsantriebes gewinnt auch die mechanische Integration der elektrischen Maschine mit dem Getriebe und der Leistungselektronik zunehmend an Bedeutung.

Um bei elektrischen Achsantrieben die Kosten gering zu halten empfiehlt sich der Einsatz hochdrehender elektrischer Maschinen mit einer großen Getriebeübersetzung.

Zur Erreichung einer optimalen Getriebeübersetzung und damit maximaler Fahrzeugbeschleunigung kann es sinnvoll sein ein ASG einzusetzen.

Mit Hilfe eines neuartigen Hybridgetriebes mit elektrischer Leistungsverzweigung kann mit minimalem Aufwand sowohl in der Basisvariante als auch in der Allradvariante ein Vollhybrid dargestellt werden.