

Kraftfahrzeugantriebe

5 Elektromotoren und Hybridantriebe

Dr.-Ing. Klaus Herzog

Überblick

5.1 Elektroantriebe

5.1.1 Gleichstrommaschinen

5.1.2 Drehstrommaschinen

5.1.3 Energiespeicher und Wandler für Elektroantriebe

5.1.4 Elektrofahrzeuge

5.1.5 Vergleich von Verbrennungs- und Elektromotor

5.2 Hybridantriebe

5.2.1 Energiespeicher

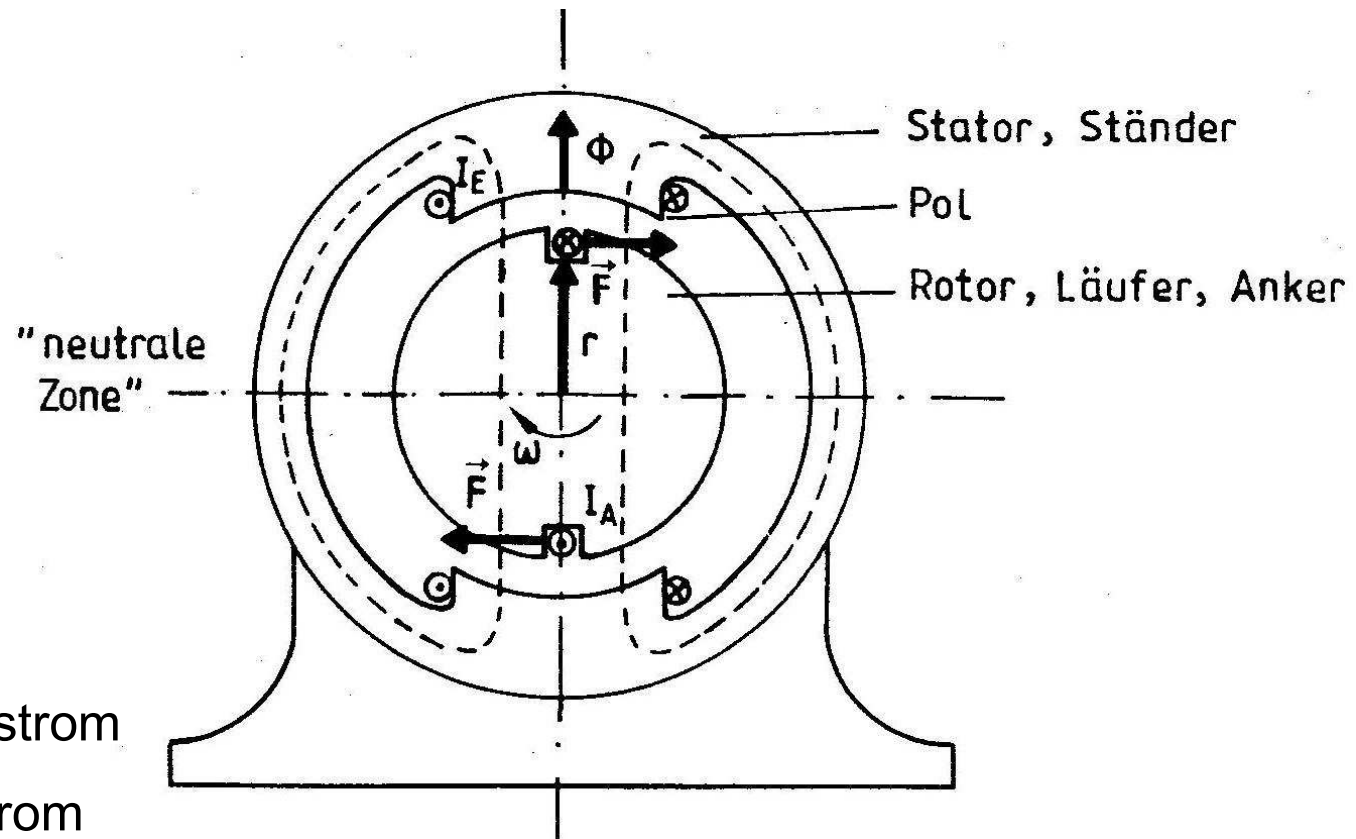
5.2.2 Elektrische Hybridantriebe

5.2.3 Mechanische Hybridantriebe

5.1 Elektroantriebe

- Gleichstrommaschinen
 - Fremderregte Gleichstrommaschine
 - Reihenschlussmaschine
 - Nebenschlussmaschine
- Drehstrommaschinen
 - Asynchronmaschine
 - Synchronmaschine

5.1.1 Gleichstrommotoren



I_E = Erregerstrom

I_A = Ankerstrom

Φ = magnetischer Fluss

Generatorbetrieb

Bei Generatorbetrieb ist die in der Ankerwicklung induzierte Spannung U_i proportional zur Umfangsgeschwindigkeit v und zum magnetischen Fluss Φ :

$$U_i \sim v \cdot \Phi$$

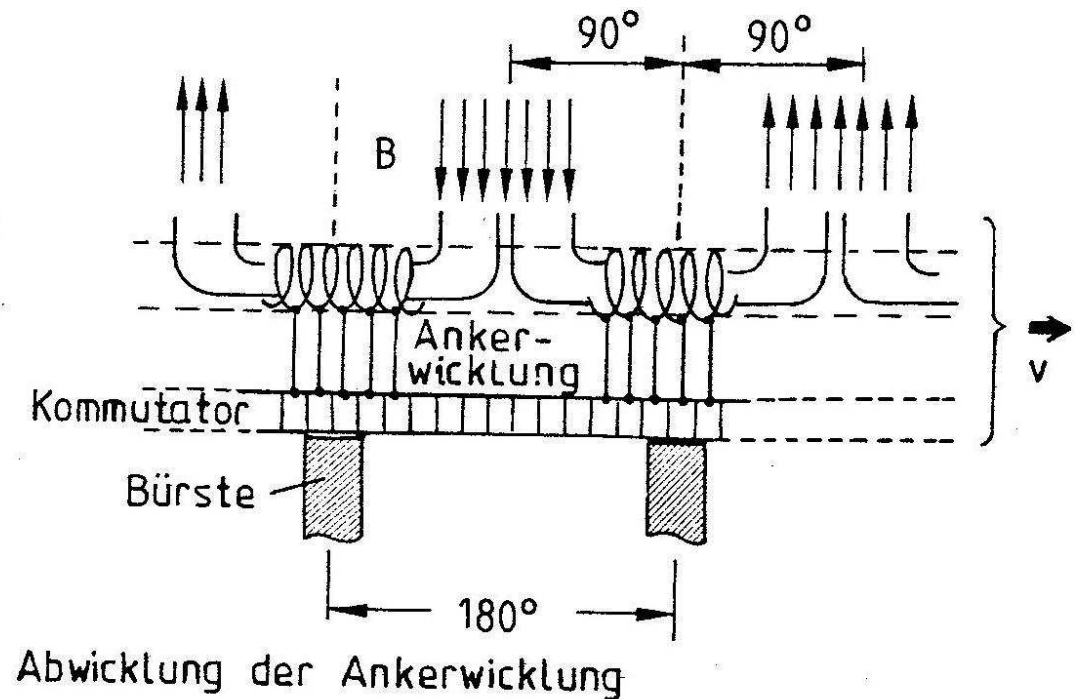
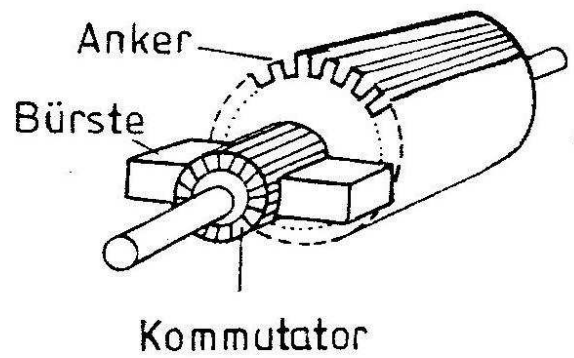
Da die Geschwindigkeit proportional zur Drehzahl n und der magnetische Fluss proportional zum Erregerstrom I_E ist, ergibt sich:

$$U_i \sim n \cdot I_E$$

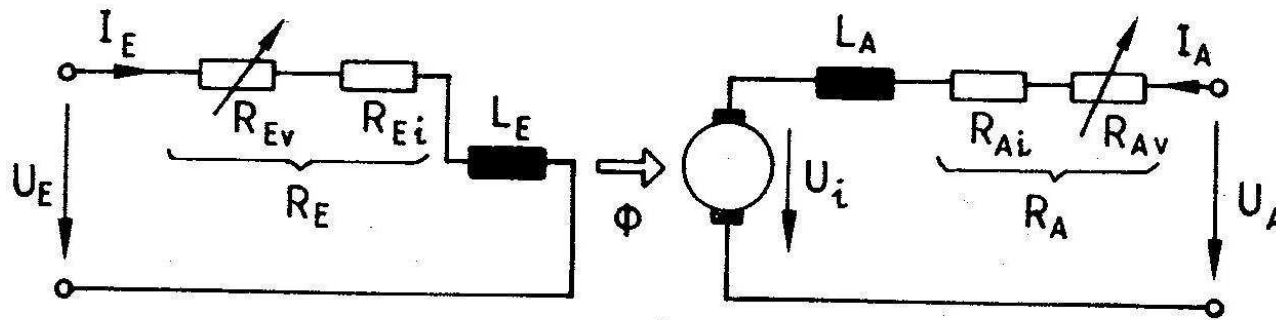
Der Ankerstrom erzeugt eine proportionale Kraft bzw. ein Moment:

$$M_d \sim I_A \cdot \Phi \sim I_A \cdot I_E$$

Kommutierung



Fremderregte Gleichstrommaschine



$$U_A = U_i + I_A \cdot R_A$$

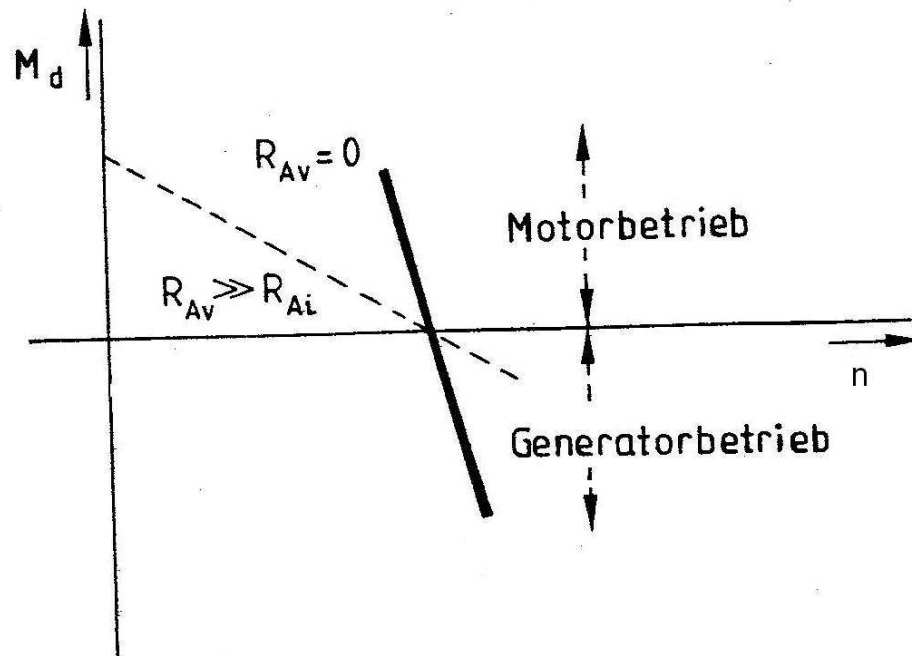
$$U_i = k_U \cdot I_E \cdot n$$

$$M_d = k_M \cdot I_E \cdot I_A \quad k_U, k_M = \text{Gerätekonstanten}$$

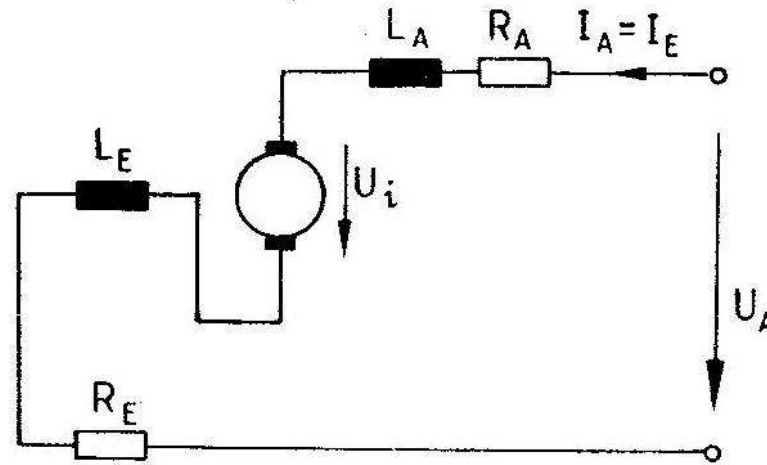
$$U_A = k_U \cdot I_E \cdot n + \frac{M_d \cdot R_A}{k_M \cdot I_E}$$

Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der fremderregten Gleichstrommaschine

$$M_d = k_M \cdot \frac{I_E}{R_A} (U_A - k_U \cdot I_E \cdot n)$$



Gleichstrom-Reihenschlussmotor



$$U_A = U_i + I_A \cdot R_A + I_A \cdot R_E$$

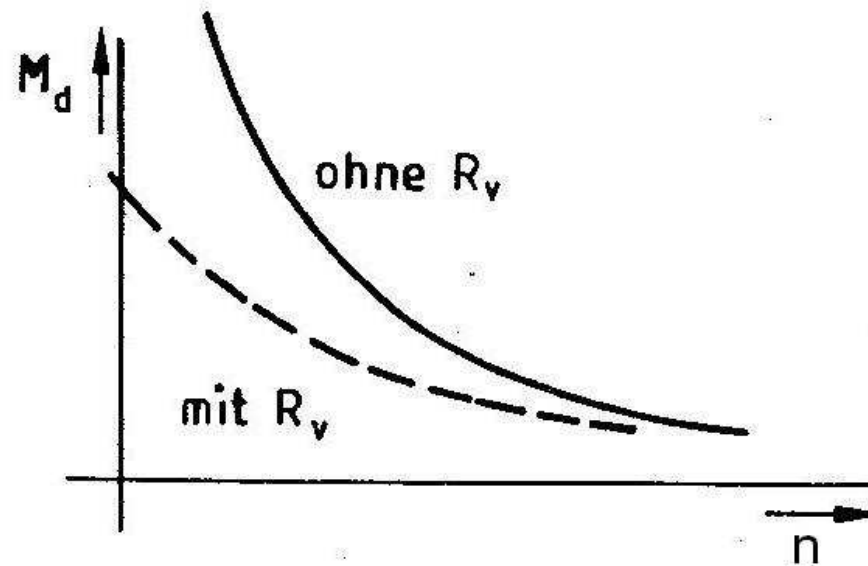
$$U_i = k_U \cdot I_A \cdot n$$

$$M_d = k_M \cdot I_A^2$$

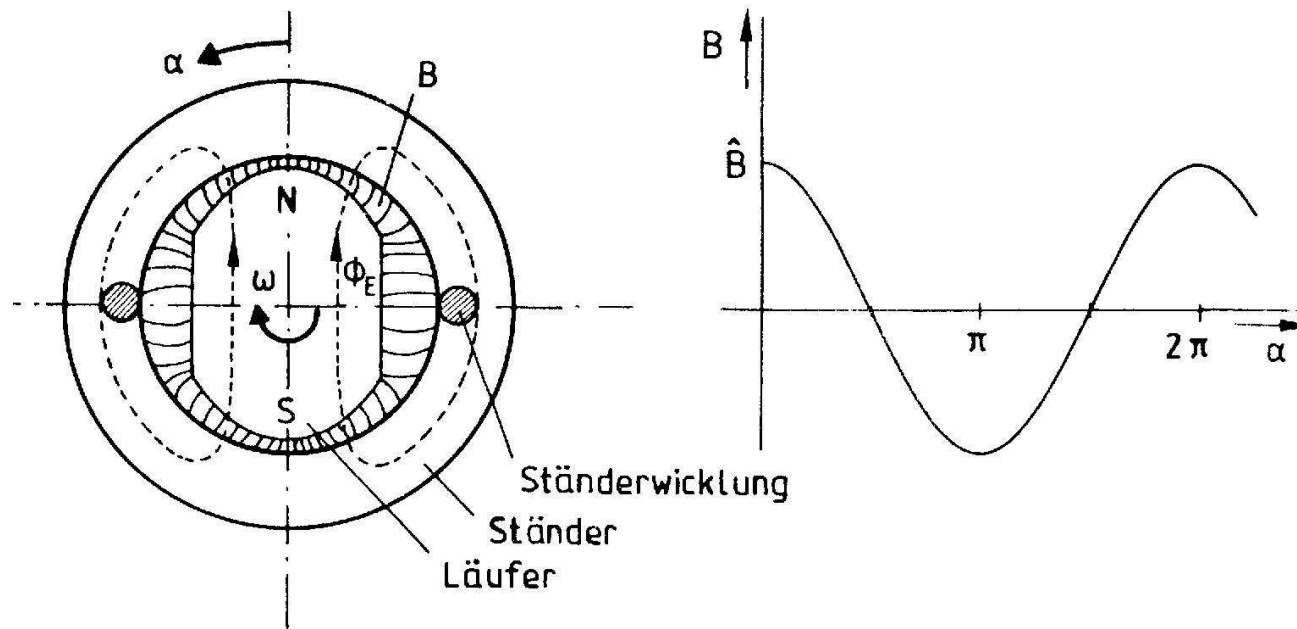
$$U_A = k_U \cdot n \cdot I_A + (R_A + R_E) \cdot I_A = (k_U \cdot n + R_A + R_E) \cdot \sqrt{M_d / k_M}$$

Kennlinie Reihenschlussmotor

$$M_d = k_M \cdot \left(\frac{U_A}{k_U \cdot n + R_A + R_E} \right)^2$$



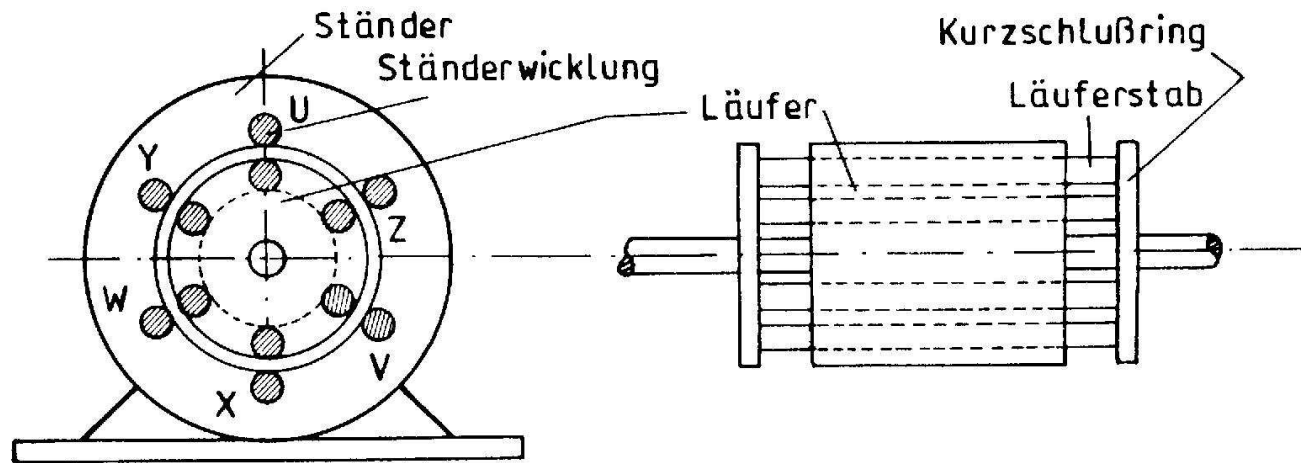
5.1.2 Drehstrommaschinen



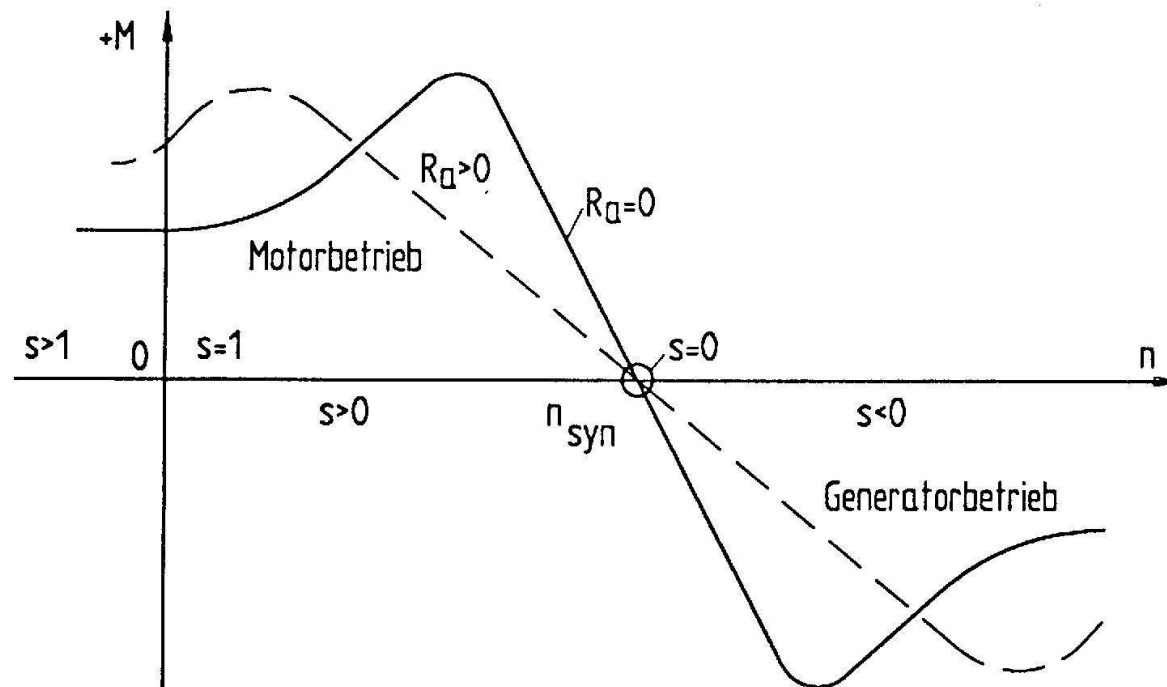
Drehstrommotoren

- Synchronmotor
 - In die Statorwicklungen wird ein Drehfeld eingespeist
 - Rotor besteht aus Permanentmagneten oder einer Erregerwicklung, die mit Gleichstrom beaufschlagt wird
 - Drehzahl ist synchron zum Drehfeld
- Asynchronmotor
 - In die Statorwicklungen wird ein Drehfeld eingespeist
 - In den Rotorwicklungen wird eine Spannung induziert, solange die Rotordrehzahl von der Synchronzahl verschieden ist
 - Drehzahl ist lastabhängig

Asynchronmaschine



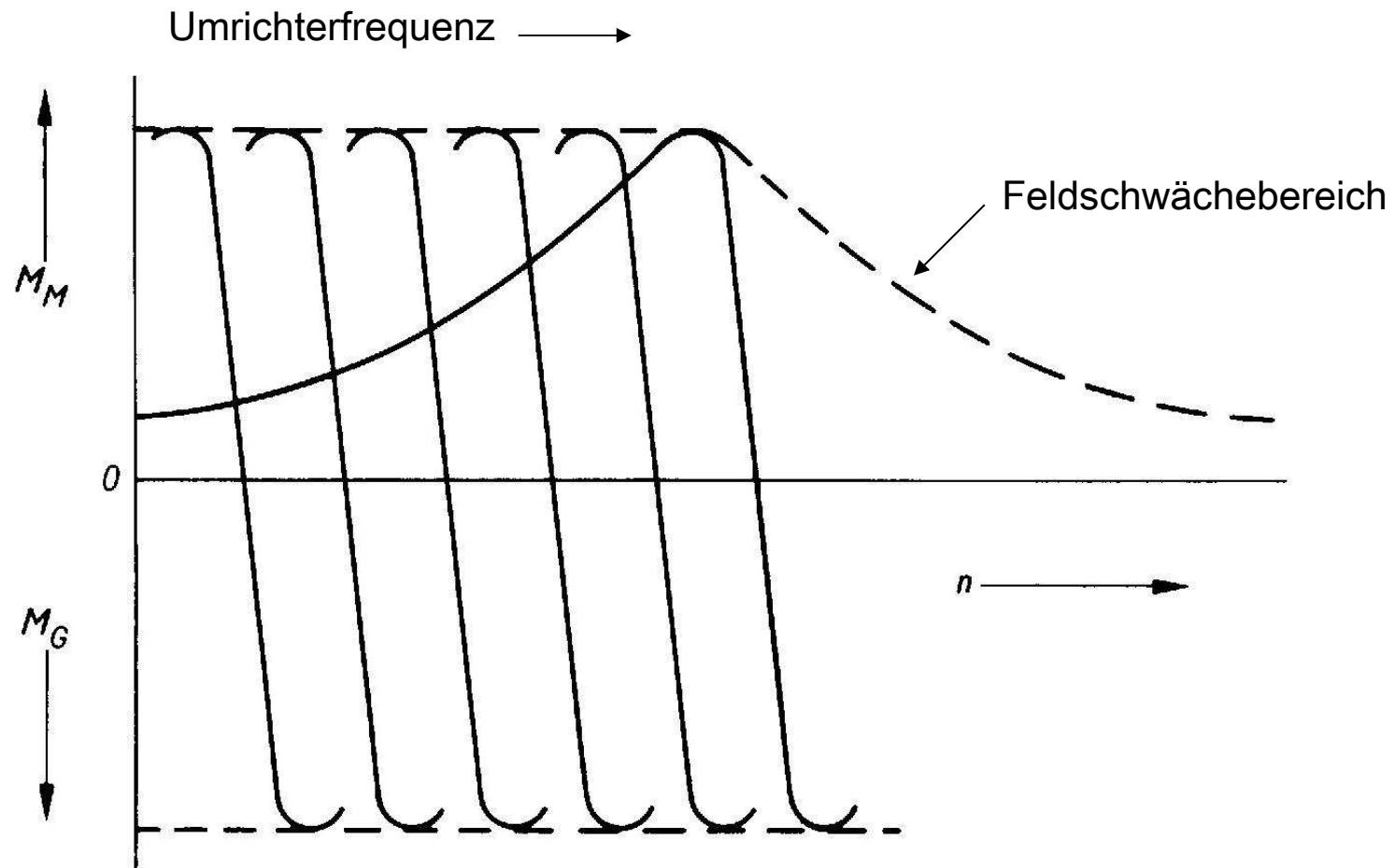
Kennlinie einer Asynchronmaschine



s = Schlupf

R_a = Ankerwiderstand

Kennlinien der Asynchronmaschine bei Frequenzumrichterbetrieb

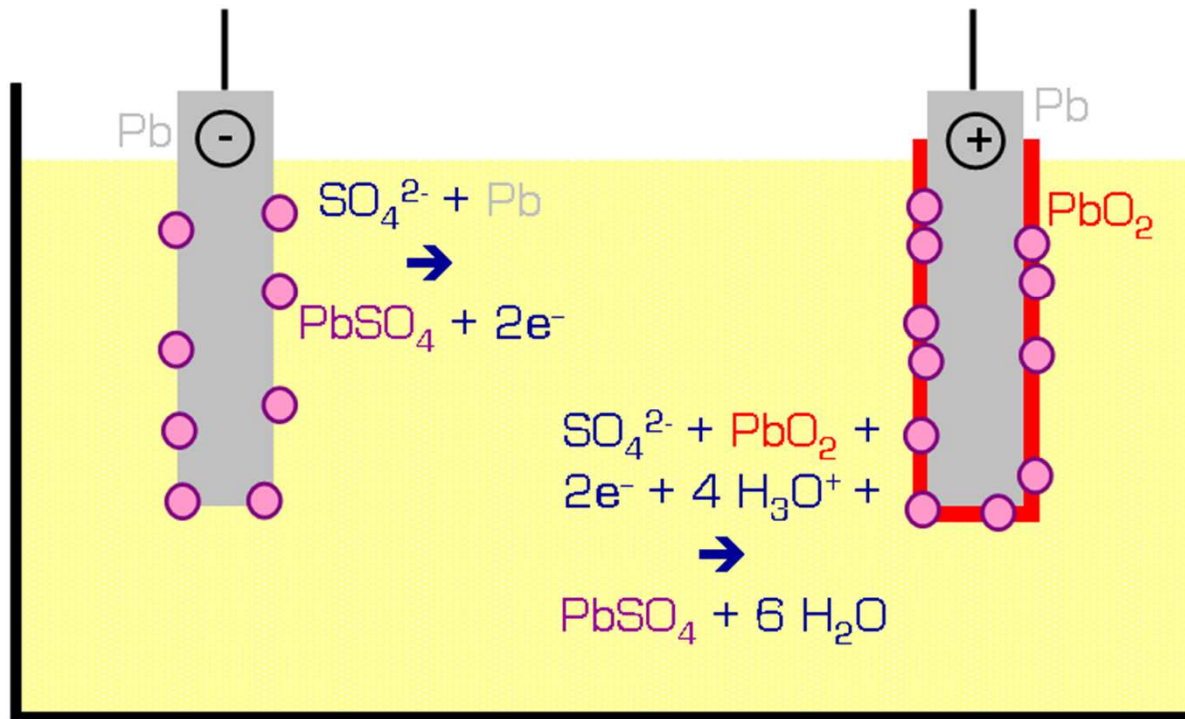


5.1.3 Energiespeicher und Wandler für Elektroantriebe

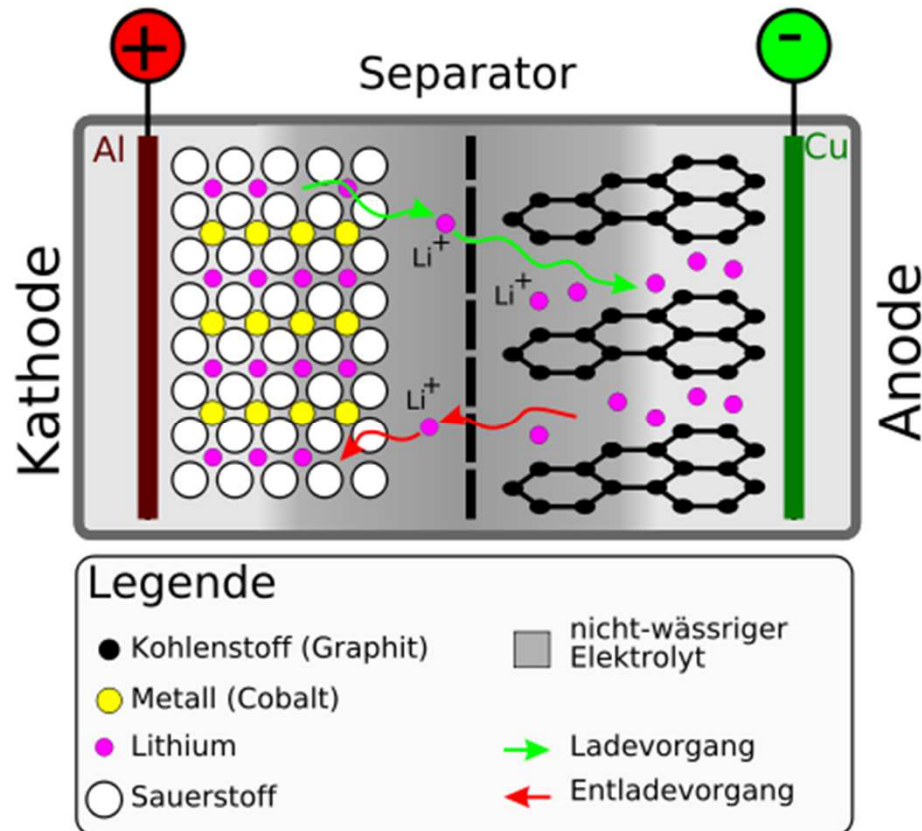
Energiespeicher bzw. Energiewandler	Energiedichte in Wh/kg	Leistungsdichte in W/kg
Bleibatterie	25-35	80-100
Nickel-Cadmium-Akku	40-55	bis 200
Natrium-Nickel-Chlorid-Akku	90	150
Li-Ion Akku	90-120	300-1500
Lithium Polymer Akku	150	300
Zink Luft Akku	100-220	
Superkondensator	1-7	>800
Brennstoffzelle	>1000	
zum Vergleich Benzin	11500	

Bleibatterie

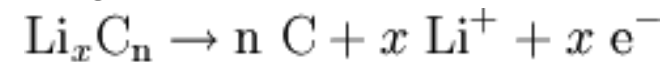
ENTLADUNGSVORGANG



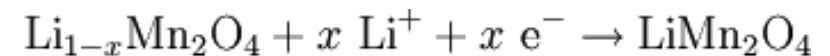
Lithium-Ionen Akku



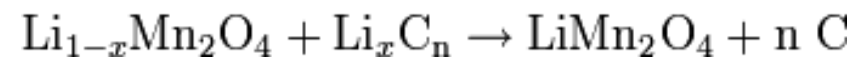
Negative Elektrode (Entladung):



Positive Elektrode (Entladung):



Redox-Gleichung:

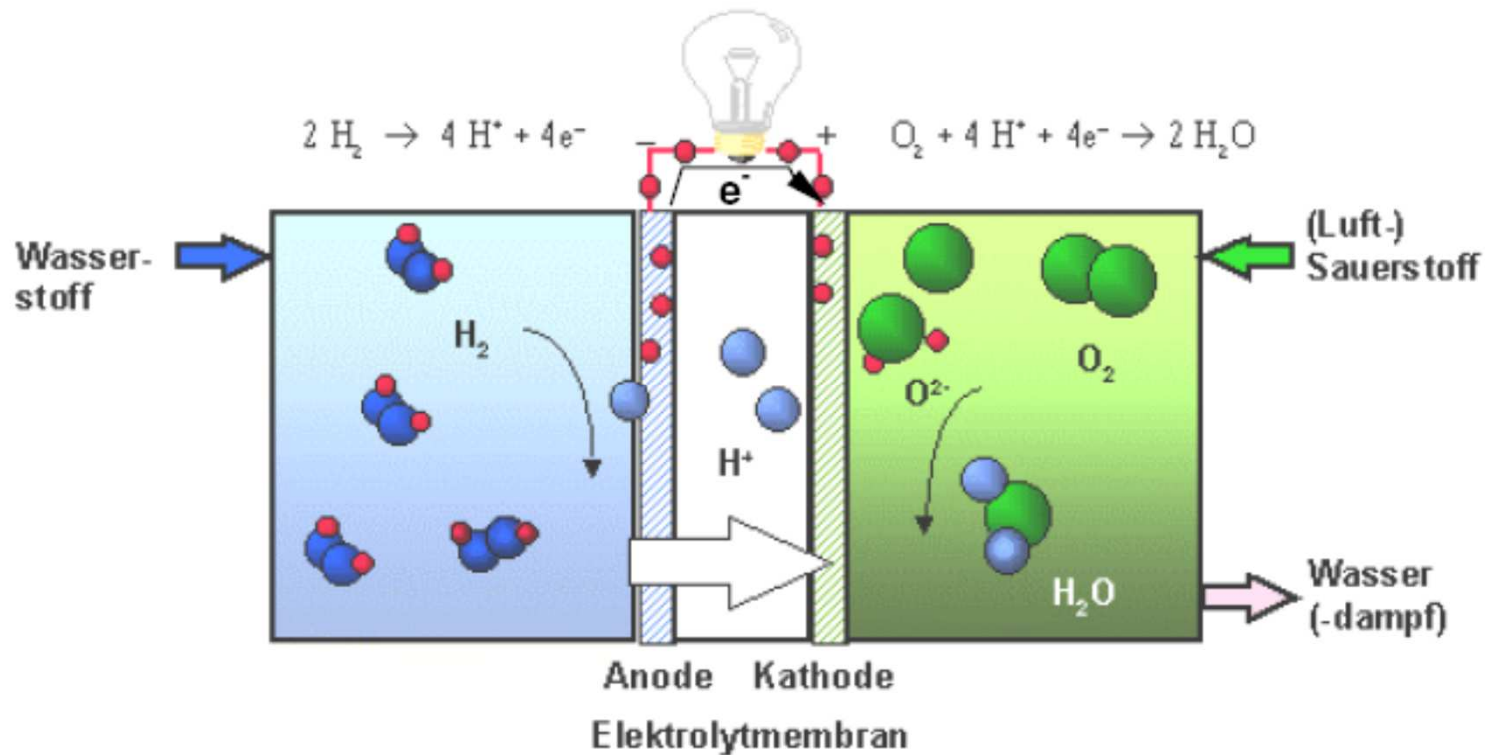


Quelle: Cepheiden

Brennstoffzelle

- Eine Brennstoffzelle ist ein Energiewandler, der chemische Energie in elektrische Energie umwandelt.
- Die elektrische Energie wird in einer galvanischen Zelle durch kontinuierliche Zuführung eines Brennstoffes und eines Oxidationsmittels erzeugt.
- Bei der Reaktion in der Brennstoffzelle handelt es sich nicht um einen thermischen Prozess, so dass der Wirkungsgrad nicht durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt ist.

Funktionsweise einer Brennstoffzelle

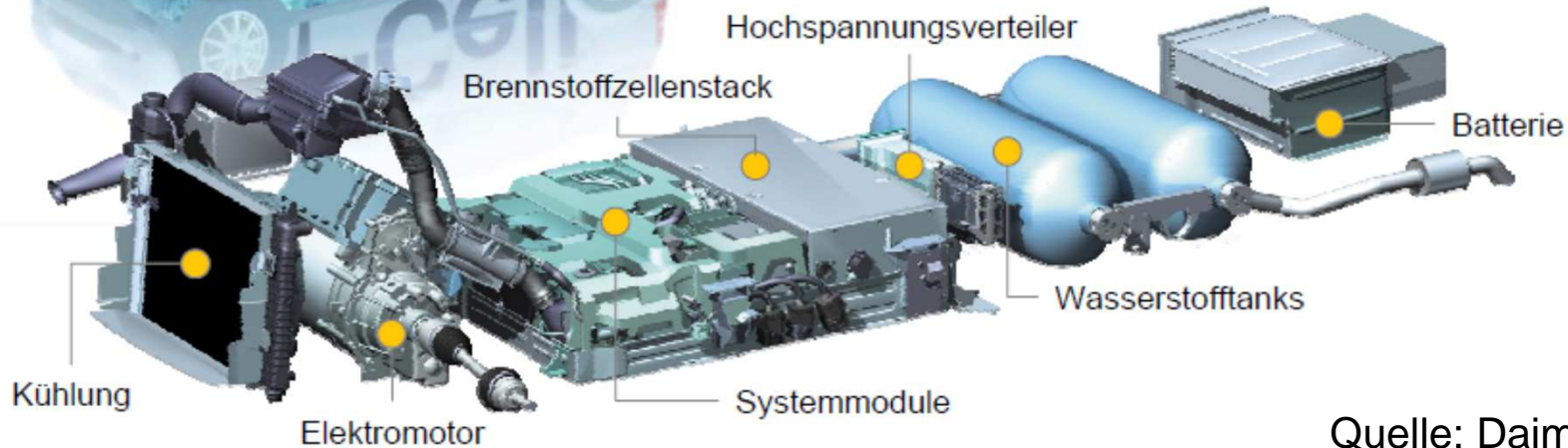


Quelle: ika

Beispiel eines Brennstoffzellenantriebes



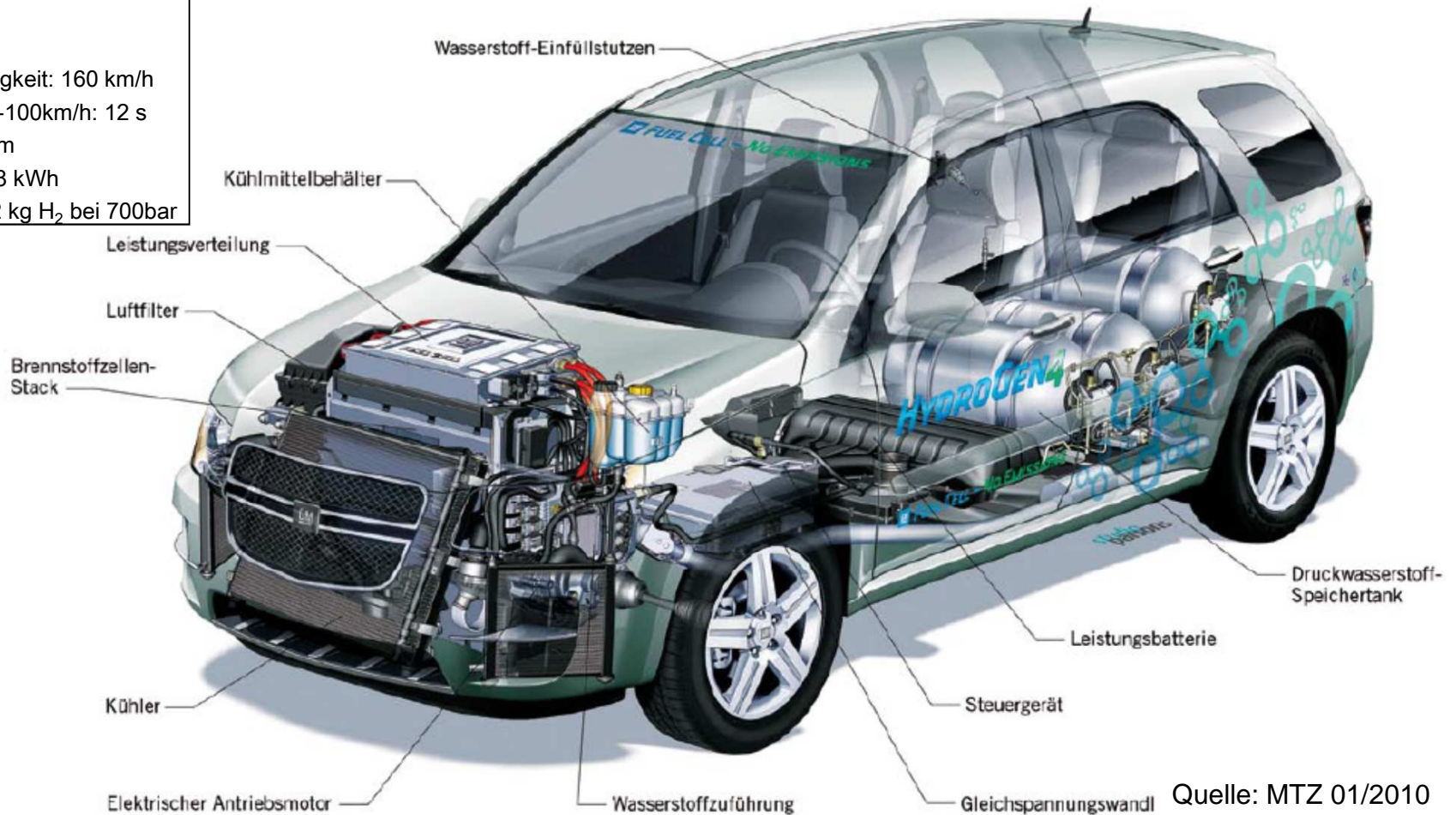
Technische Daten:	
Fahrzeugtyp	Mercedes-Benz A-Klasse (Lang-Version)
Brennstoffzellensystem	PEM - 72 kW (97 PS)
Antrieb	Elektro-Asynchron Motor Leistung (Continuous / Peak): 45 kW / 65 kW (87hp) Max. Drehmoment: 210 Nm (156 ft.-lb.)
Kraftstoff	Wasserstoff (350 bar / 5,000 psi)
Reichweite	170 km (105 miles / NEDC)
Höchstgeschwindigkeit	140 km/h (elektronisch begrenzt)
Batterie	NiMh, luftgekühlt, Leistung (Continuous / Peak): 15 kW / 20 kW (27hp); Kapazität: 6 Ah, 1.2 kWh



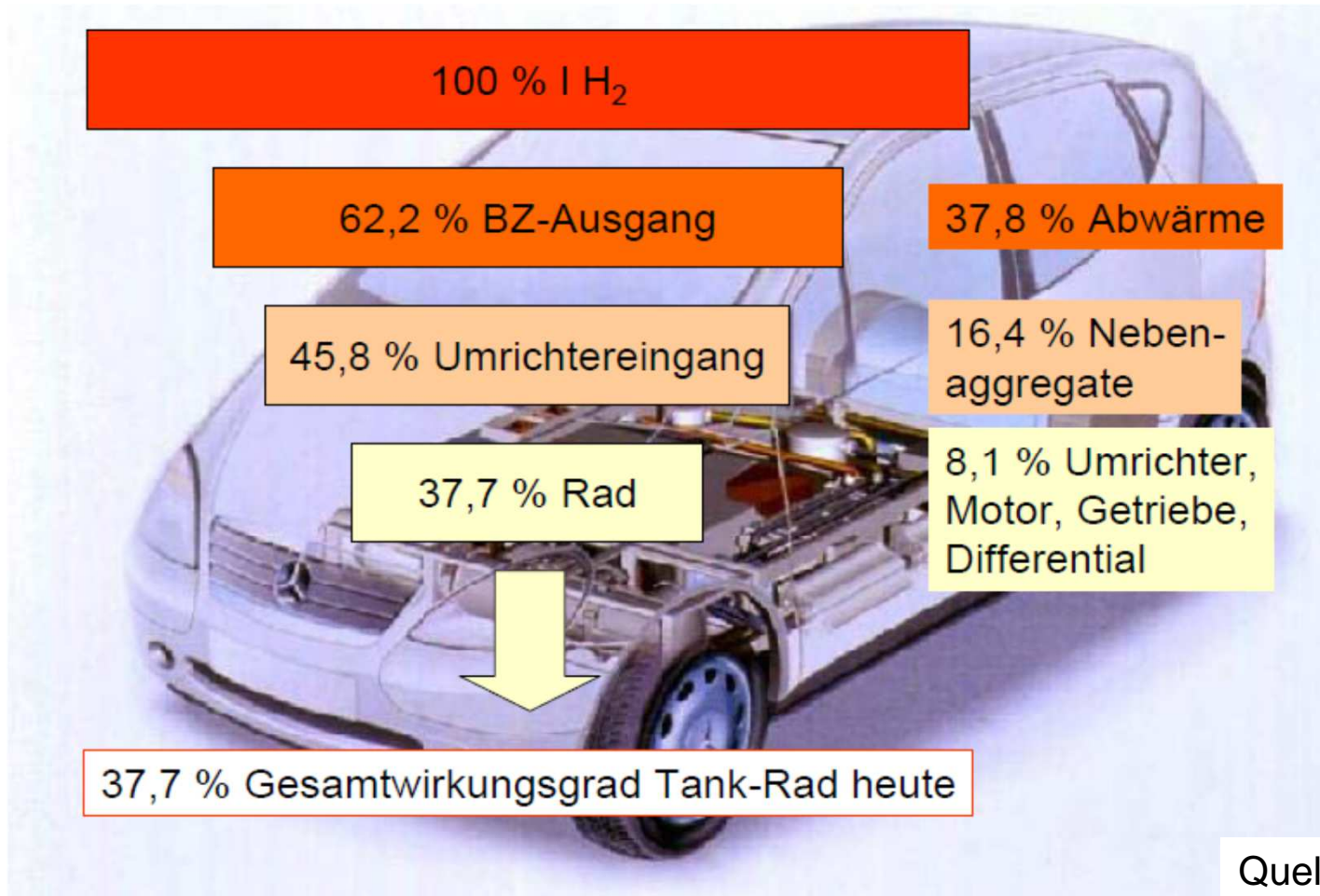
Quelle: Daimler

Opel Brennstoffzellen-Versuchsträger im Feldversuch von zehn Geschäftswagen

Technische Daten
Leistung: 73 kW
Höchstgeschwindigkeit: 160 km/h
Beschleunigung 0-100km/h: 12 s
Reichweite: 320 km
Puffer-Batterie: 1,8 kWh
Tankkapazität: 4,2 kg H₂ bei 700bar



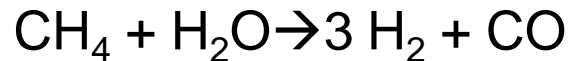
Wirkungsgrad eines Brennstoffzellenantriebes



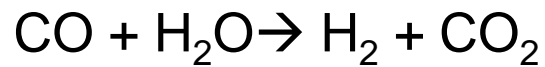
Quelle: Daimler

Wasserstoffherstellung aus Erdgas

Reformierung von Erdgas:

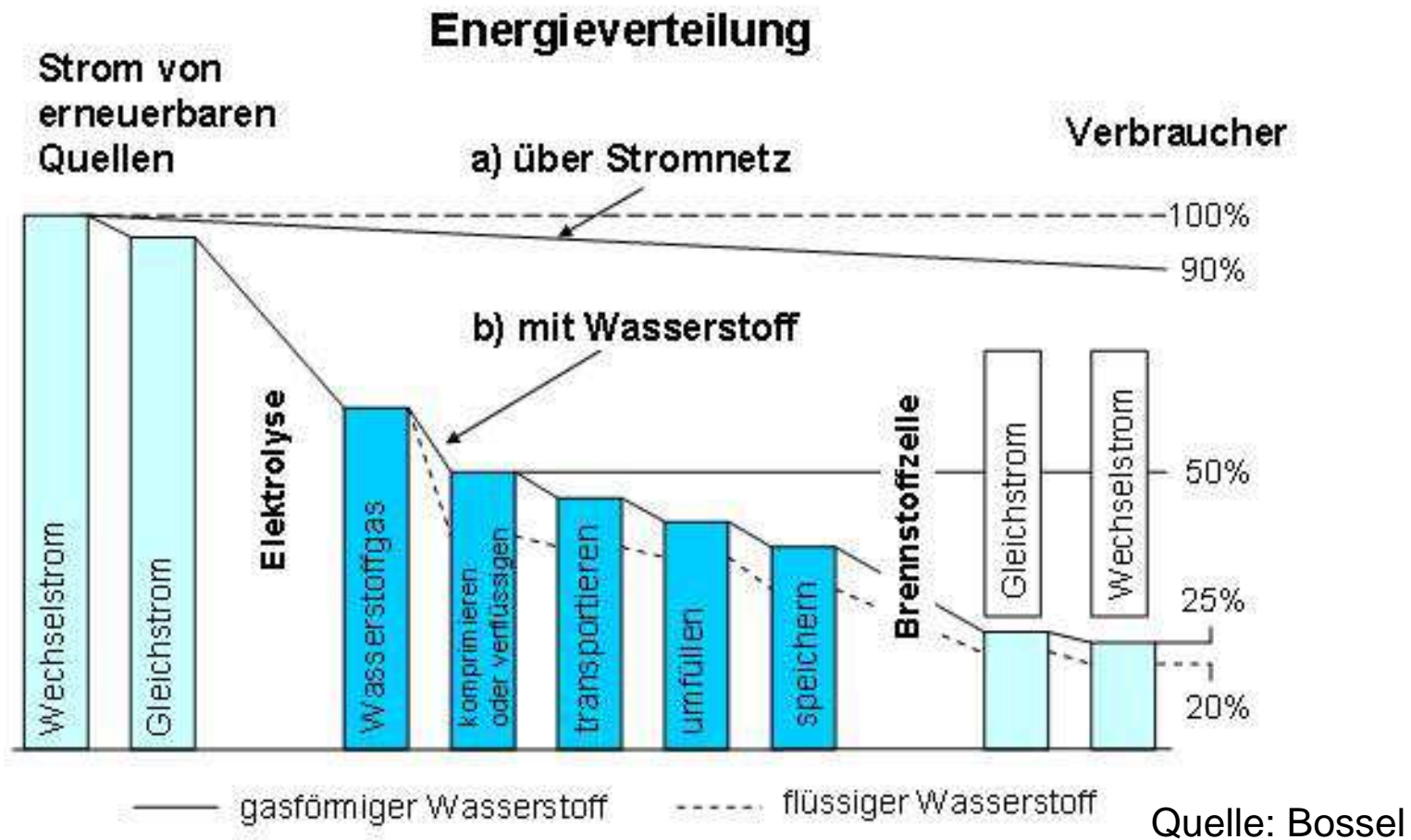


Anschließende Shift-Reaktion:



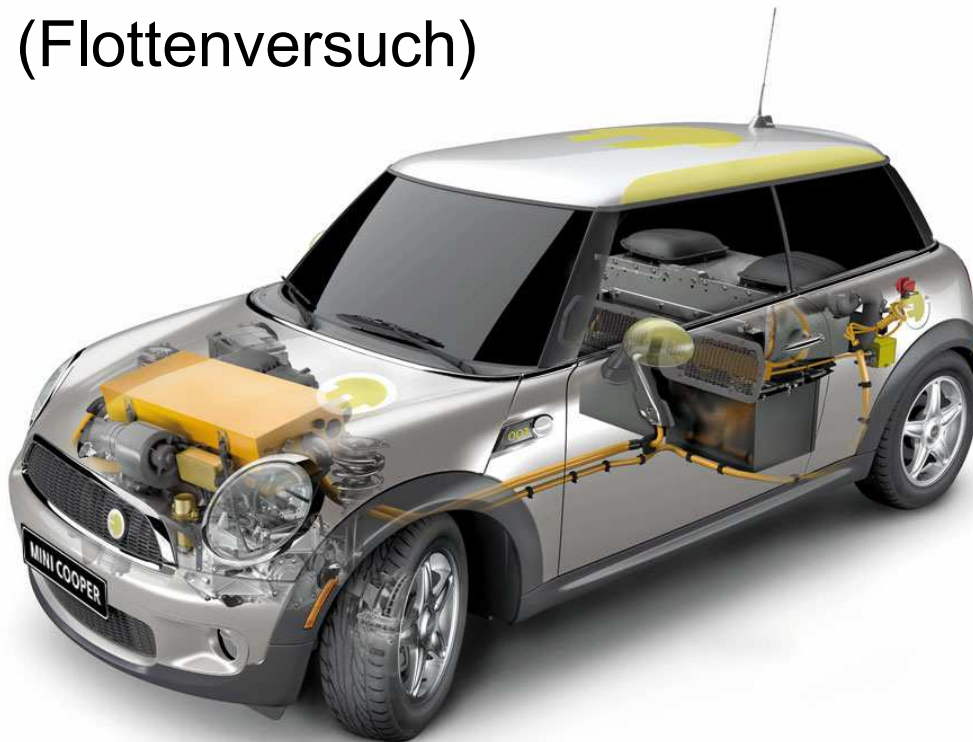
- Der Wirkungsgrad für die Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas liegt bei etwa 78%
- 90% der heutigen Wasserstoffproduktion stammt aus fossilen Rohstoffen

Wasserstoffherstellung aus Strom



5.1.4 Elektrofahrzeuge

Mini E Pilotprojekt (Flottenversuch)



Technische Daten

Leistung: 150 kW

Gewicht: 1465 kg

Höchstgeschwindigkeit: 152 km/h

Beschleunigung 0-100km/h: 8,5 s

Reichweite: 168 km

Akku: 35 kWh Lithium Ionen Akku

Ladezeit: 3 h bei 240V / 40 A

Quelle: Mini

Elektrofahrzeug BMW ActiveE

Technische Daten

Leistung: 125 kW

Gewicht: ca. 1835 kg

Höchstgeschwindigkeit: 145 km/h

Beschleunigung 0-100km/h: 9,0 s

Reichweite: 205 km (NEFZ)

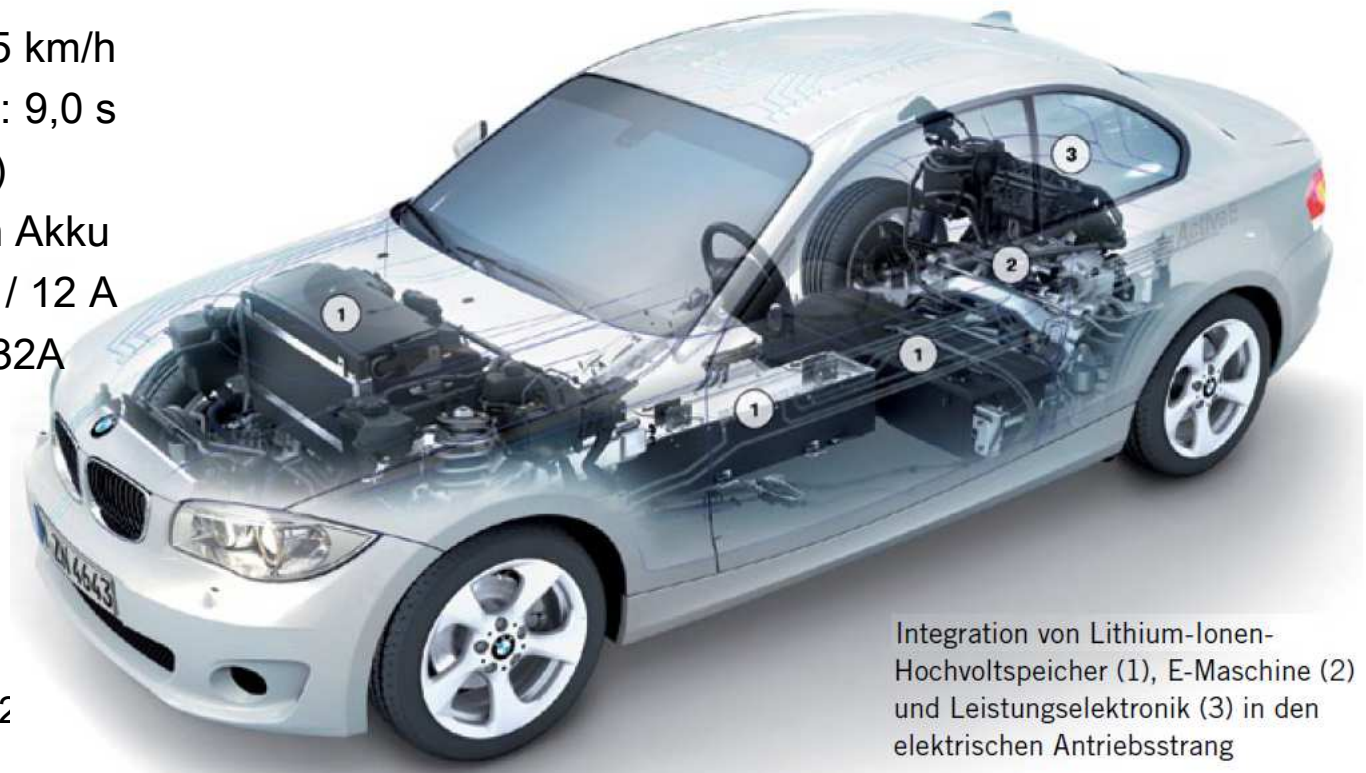
Akku: 32 kWh Lithium Ionen Akku

Ladezeit: 10-12 h bei 230V / 12 A

4-5 h bei 230 V / 32A

Quelle: ATZ 10/2012

„Conversion-Design“-Fahrzeug
(Feldversuch mit über 1000 Fahrzeugen)



Integration von Lithium-Ionen-Hochvolt-speicher (1), E-Maschine (2) und Leistungselektronik (3) in den elektrischen Antriebsstrang

Elektrofahrzeug BMW i3

BIMMERTODAY



„Purpose-Design“-Fahrzeug
(Serienfahrzeug)

Technische Daten

Leistung: 125 kW

Gewicht: 1195 kg

Höchstgeschwindigkeit: 150 km/h

Beschleunigung 0-100km/h: 7,2 s

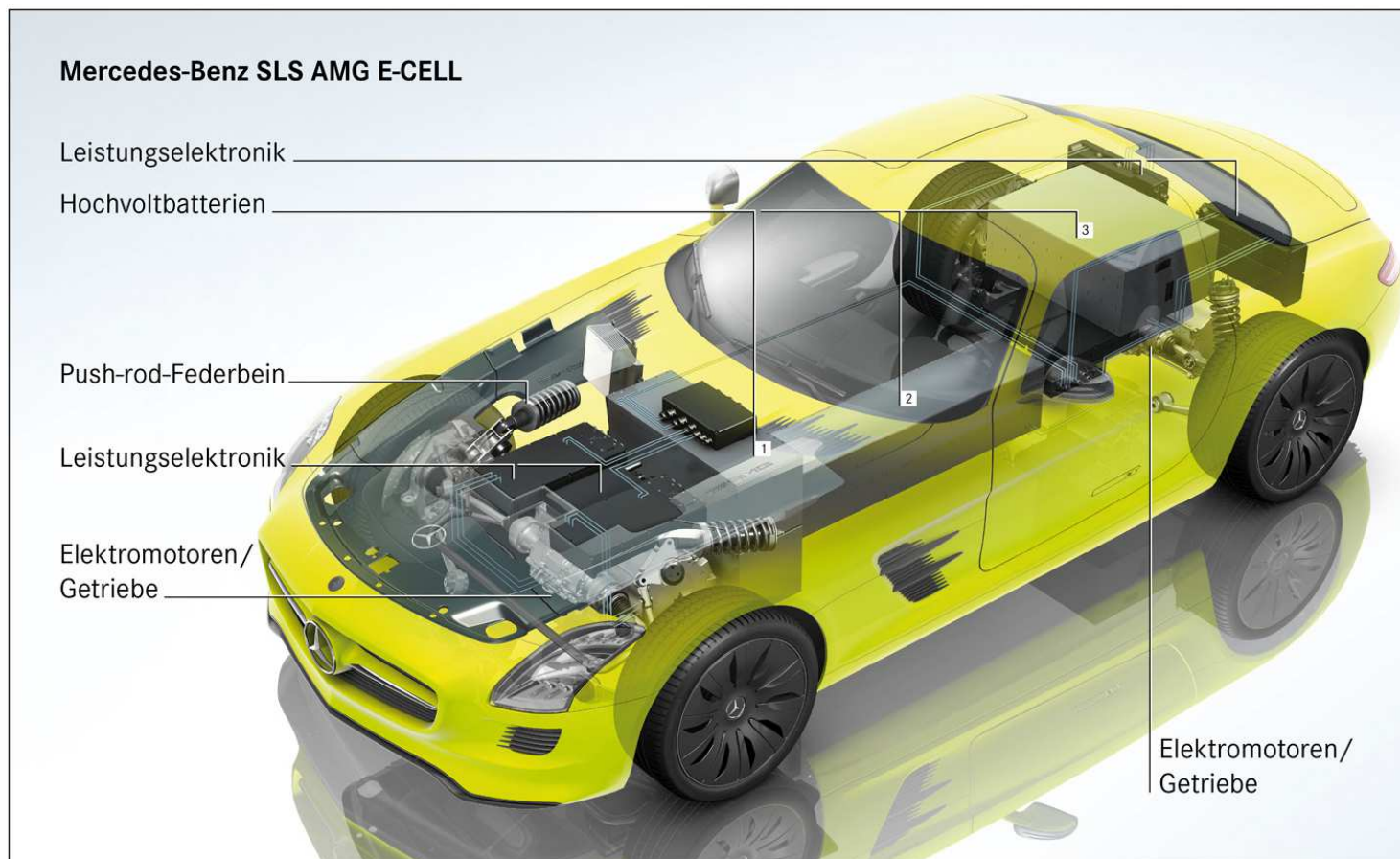
Reichweite: 130-160 km

Akku: 22 kWh Lithium Ionen Akku

Ladezeit: 5 h bei 240V / 20 A

Quelle: Bimmertoday

Elektro-Sportfahrzeug AMG SLS E-Cell

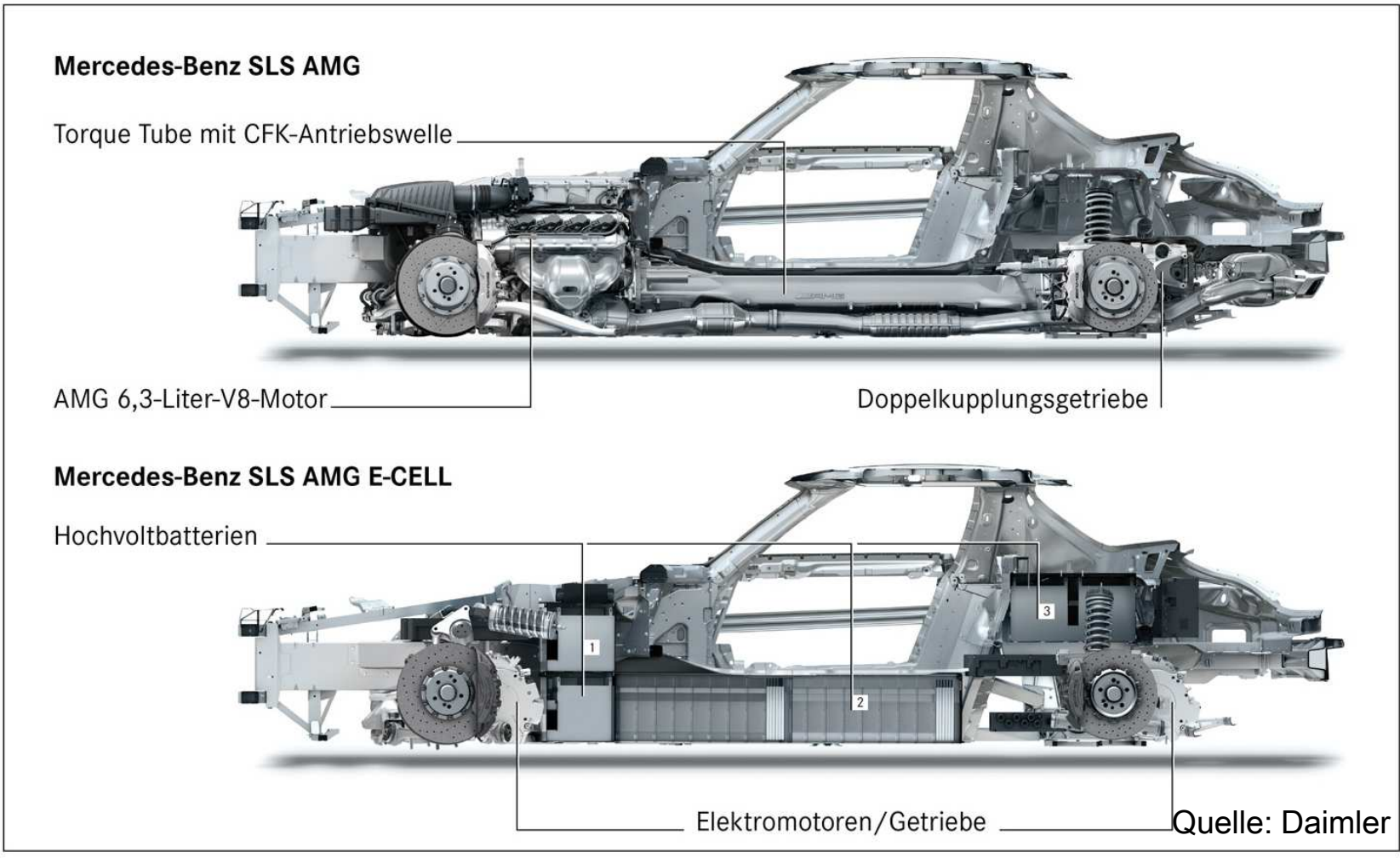


Leistung: 392 kW verteilt auf vier Synchronmotoren, Beschleunigung 0-100km/h: 4,0 s

Akku: 35 kWh Lithium Ionen Polymerzellen

Quelle: Daimler

Vergleich von Elektro- und Verbrennungsmotorenvariante eines Sportfahrzeugs



Kraftfahrzeugantriebe

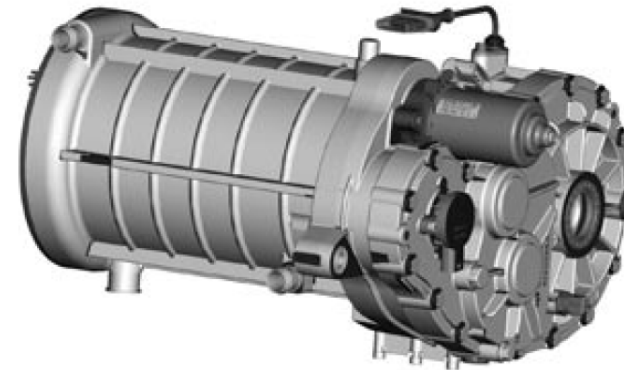
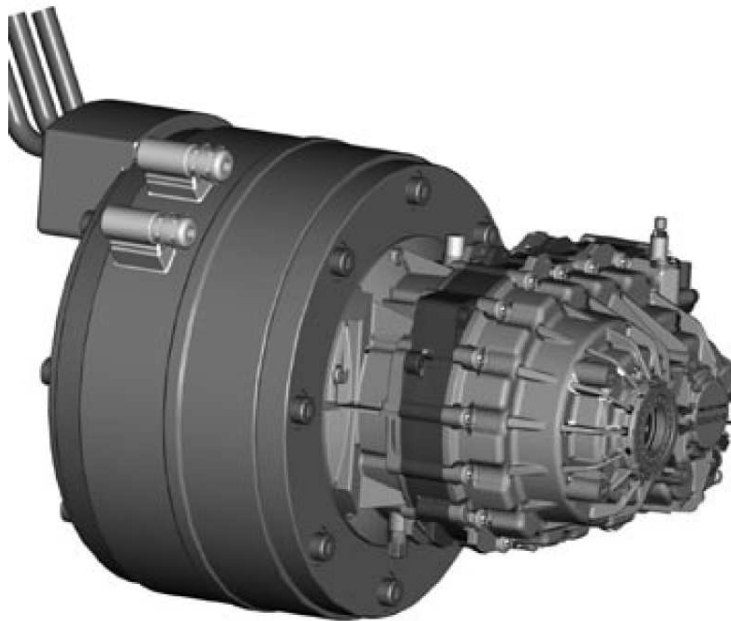
5 Elektromotoren und Hybridantriebe

Herzog

Größenvergleich von High-Torque und High-Speed-Elektroantrieb

Eingang-High-Torque-Antrieb

Volumen: 41 l
Gewicht (ohne PWR): 133 kg



Zweigang-High-Speed-Antrieb

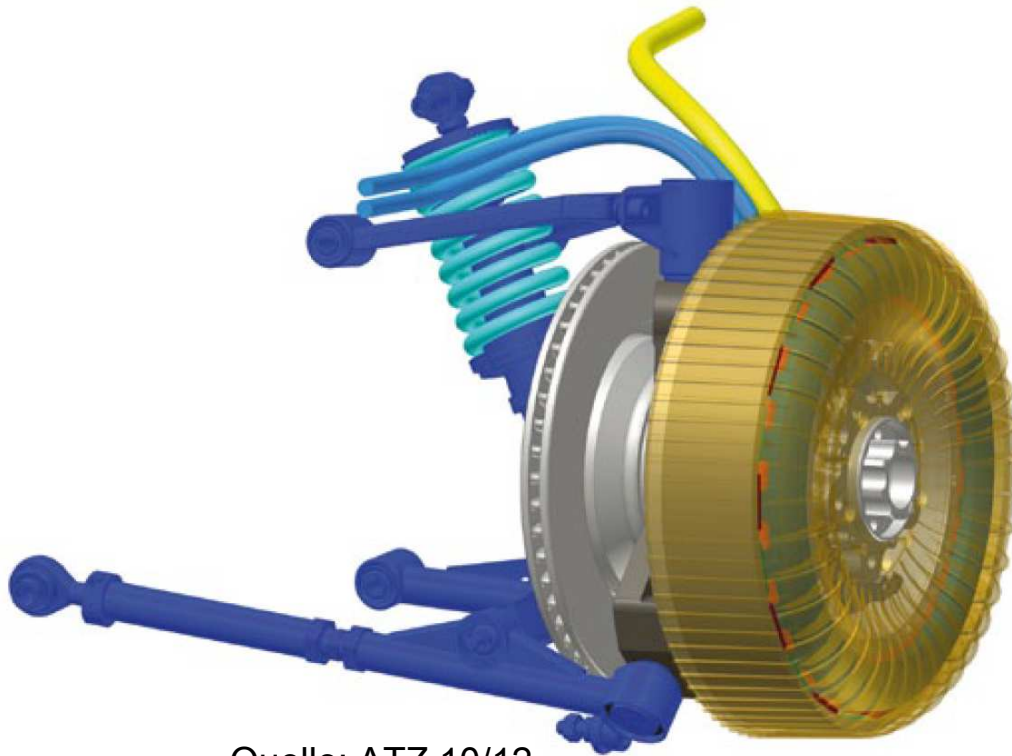
Volumen: 26 l
Gewicht (ohne PWR): 82 kg

Das Drehmoment einer E-Maschine ist proportional zur Wirkfläche des Spaltes zwischen Rotor und Stator und hängt somit quadratisch vom Durchmesser und linear von der Baulänge ab.

Quelle: ATZ 06/10

Radnabenmotoren

Package studie eines Radnaben-
Antriebs an der Hinterachse



Quelle: ATZ 10/12

Vorteile

- niedriger Schwerpunkt
- geringer Bauraumbedarf

Nachteile

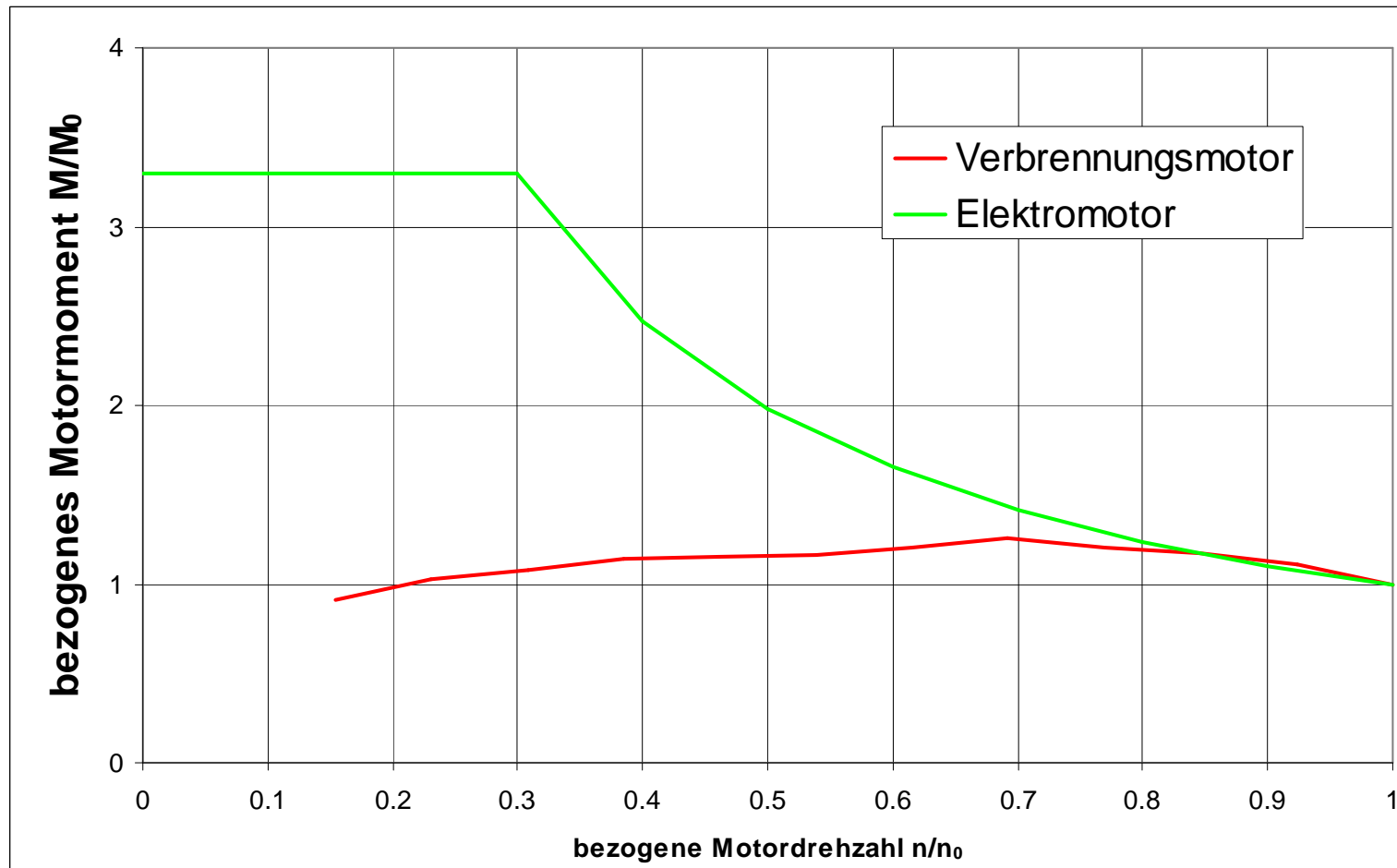
- hohe ungefederte Massen
- schwierige Abdichtung der Trennfuge des Rotors

5.1.5 Vergleich von Verbrennungs- und Elektromotor

- 5.1.5.1 Vergleich der Lieferkennlinien von Verbrennungs- und Elektromotor

- 5.1.5.2 Wirkungsgradvergleich von Verbrennungs- und Elektromotor

Vergleich der Lieferkennlinien von Verbrennungsmotor und Elektromotor

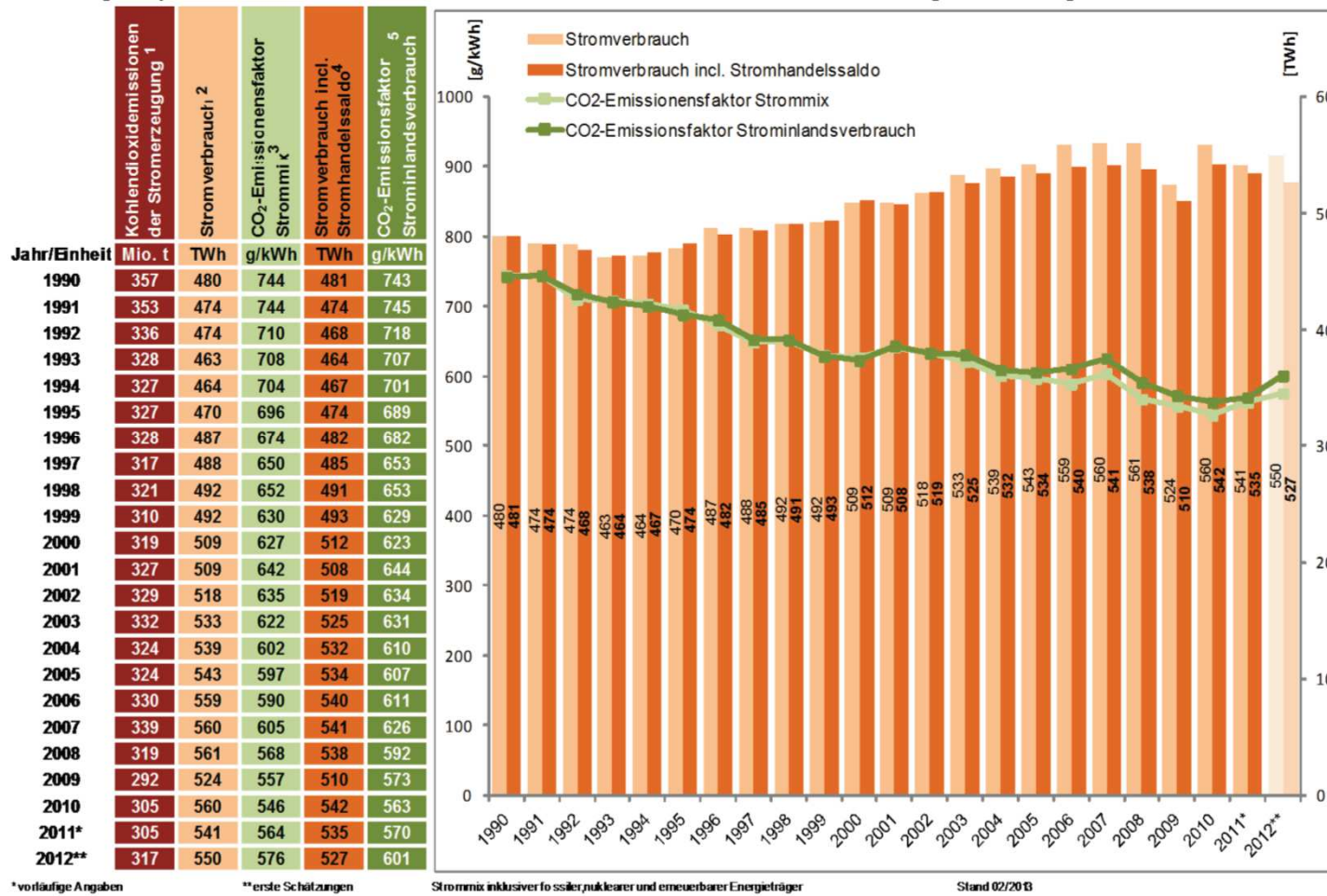


Wirkungsgradvergleich von Verbrennungs- und Elektromotor

	Verbrennungs- motor	E-Motor mit Akkumulatoren	E-Motor mit Brennstoffzelle
η_{Motor}	0,10 – 0,42	0,75 - 0,99	0,75 - 0,99
η_{Getriebe}	0,80 – 0,96	0,88 – 0,98	0,88 – 0,98
$\eta_{\text{Energiespeicher}}$	1	0,60 -0,92	0,60 – 0,70
$\eta_{\text{primär}}$	0,86 – 0,88	0,30 - 0,34	0,34 – 0,78
η_{gesamt}	0,07 – 0,35	0,12 - 0,30	0,13 – 0,53

Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung

Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2011 und erste Schätzungen 2012 im Vergleich zum Stromverbrauch



Quelle:
Umweltbundesamt

Kraftfahrzeugantriebe

5 Elektromotoren und Hybridantriebe

Herzog

5.2 Hybridantriebe

Ein Hybridantrieb besteht aus einer Kombination von zwei unterschiedlichen Antrieben. Die Antriebe werden von zwei unterschiedlichen Energiespeichern gespeist.

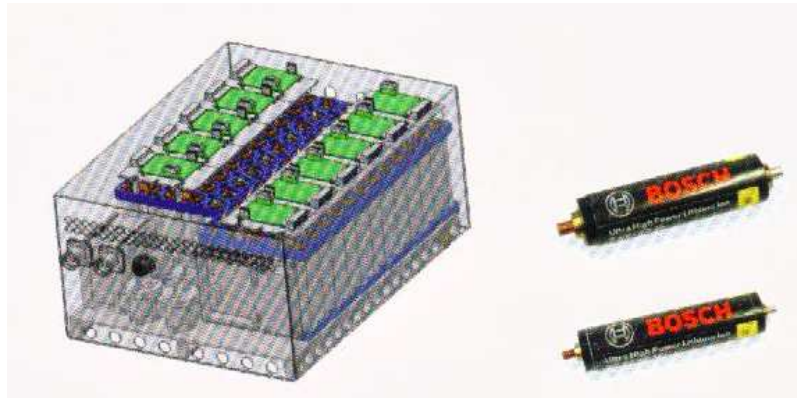
In der Fahrzeugtechnik wird meistens die Kombination von Elektro- und Verbrennungsmotor verwendet. Bei den Energiespeichern handelt es sich dann um den Kraftstofftank und die Batterie.

5.2.1 Energiespeicher

Energiespeicher	Energiedichte in Wh/kg	Leistungsdichte in W/kg
Benzin	11500	
Bleibatterie	25-35	80-100
Li-Ion Akku	90-120	300-1500
Schwungmasse	5-11	360-4500
Hydraulischer Speicher	<0,7	300
Salz- Kristallisationsspeicher	>30	>3000

Energiespeicher

Lithium-Ionen Akkumulator



Schwungrad eines
mechanischen Hybrid-
Antriebes
max. Drehzahl: 64500 U/min
Gewicht: 25 kg
Kapazität: 400 kJ



Quelle: Flybrid

Elektrisch angetriebener
Schwungmassenspeicher
mit integrierter
Leistungselektronik
Gewicht: 32 kg
Leistung: 144 kW
Kapazität 750 kJ



Quelle: Bosch

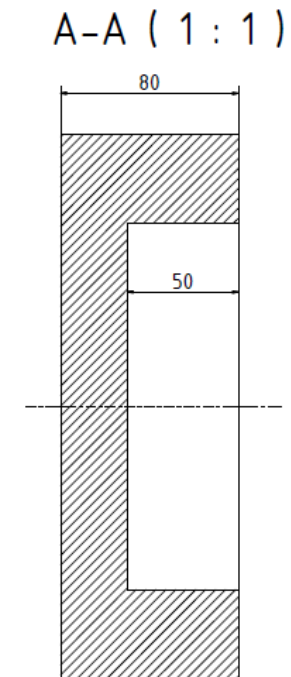
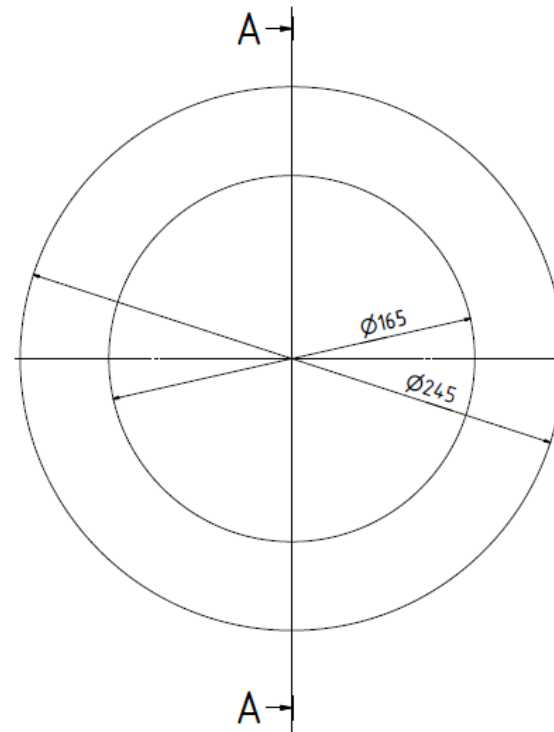
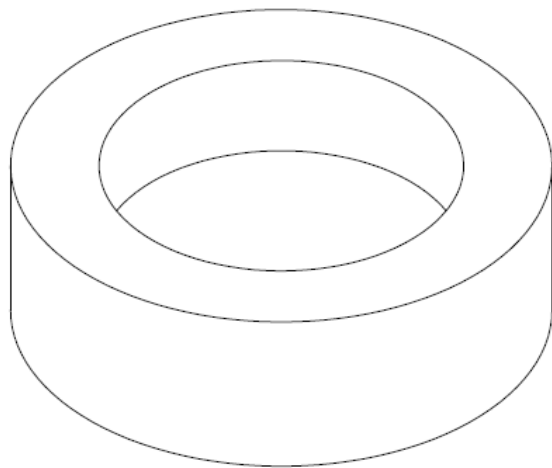
Übungsaufgabe

Berechnen Sie Gewicht und Massenträgheitsmoment der abgebildeten Schwungmasse. Die Schwungmasse ist aus Stahl gefertigt.

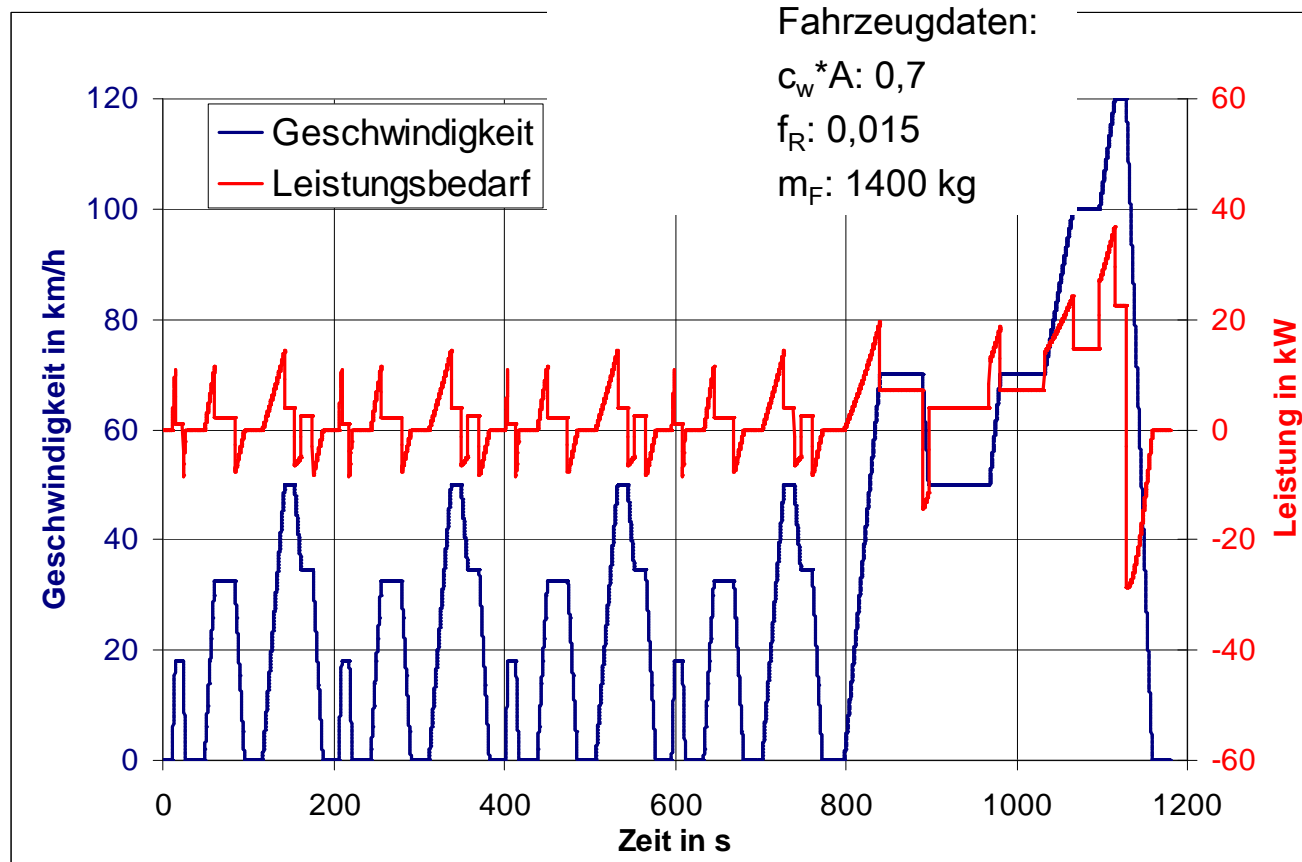
Dichte Stahl

$$\rho_{\text{Stahl}} = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Abmessungen der Schwungmasse



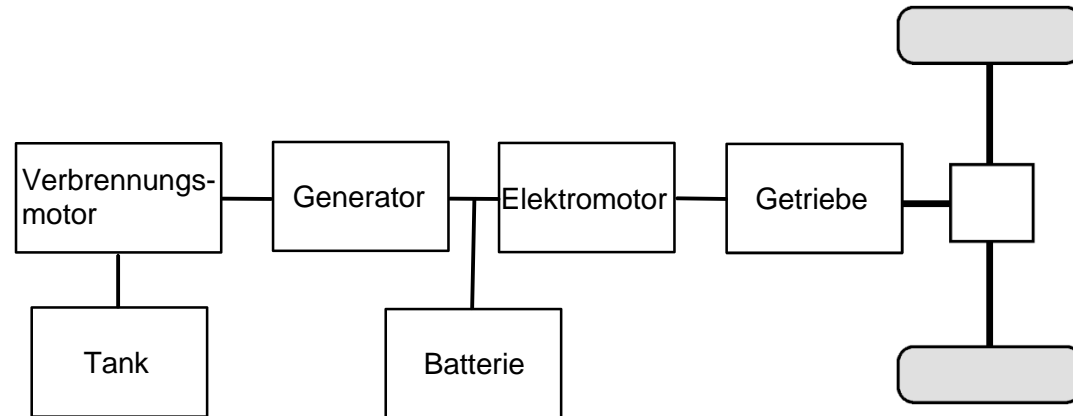
Leistungs- und Energiebedarf im neuen europäischen Fahrzyklus (NEDC)



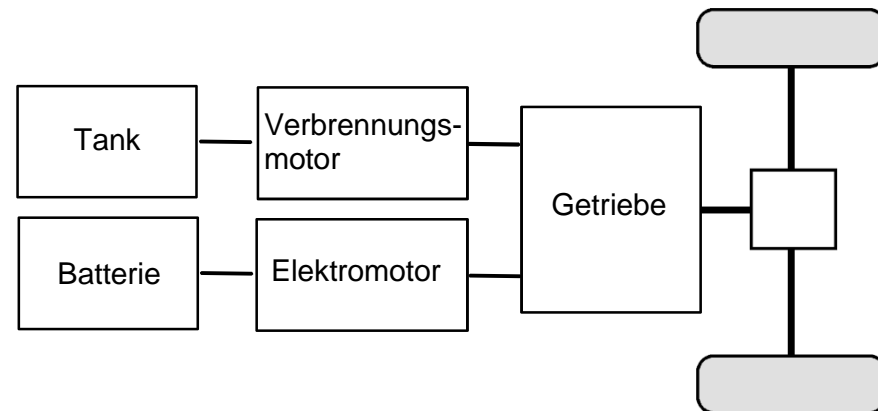
- Energiebedarf bei regenerativer Verzögerung: 3889 kJ
- Energiebedarf bei herkömmlicher Verzögerung: 5164 kJ

5.2.2 Elektrische Hybridantriebe

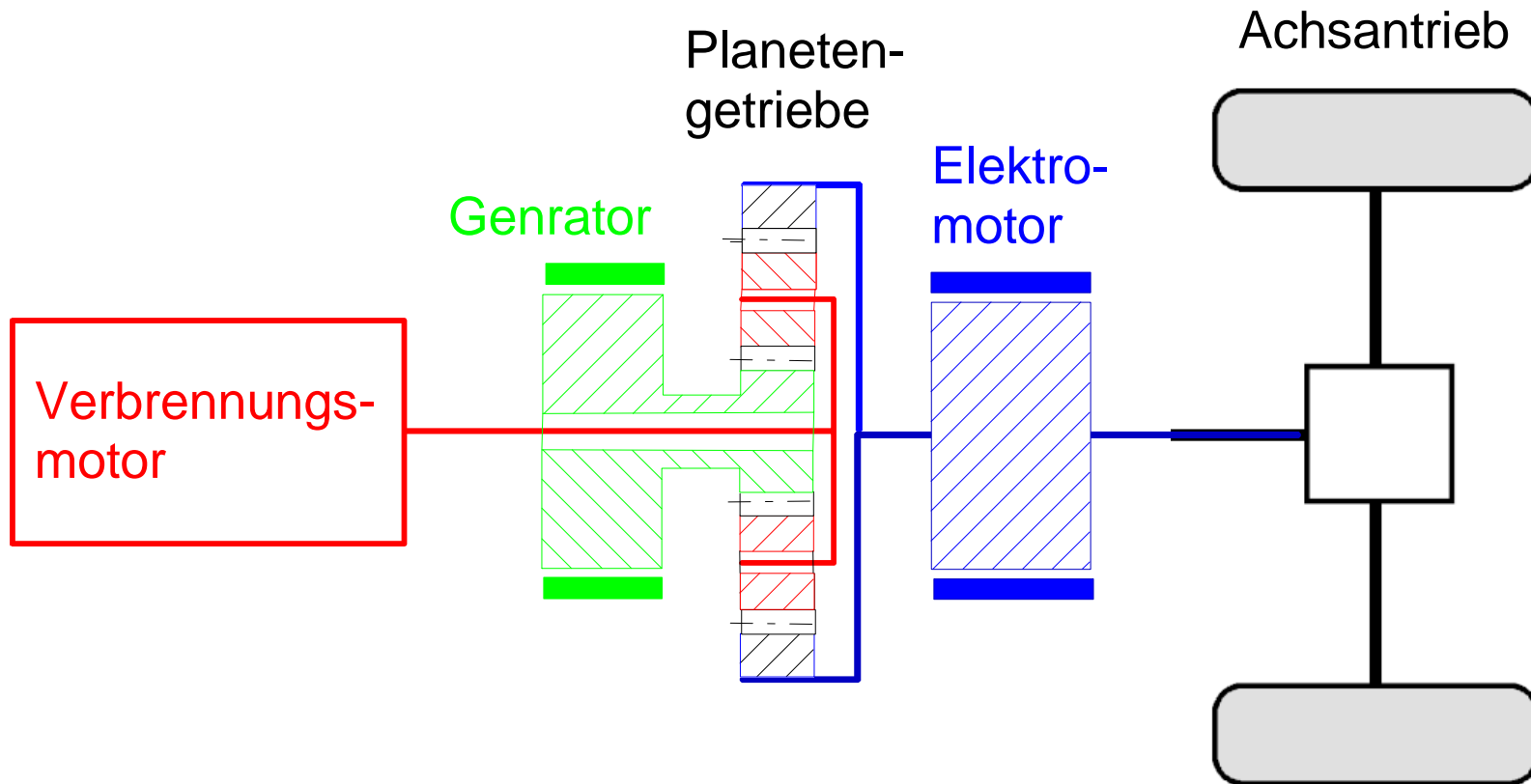
Serieller Hybridantrieb



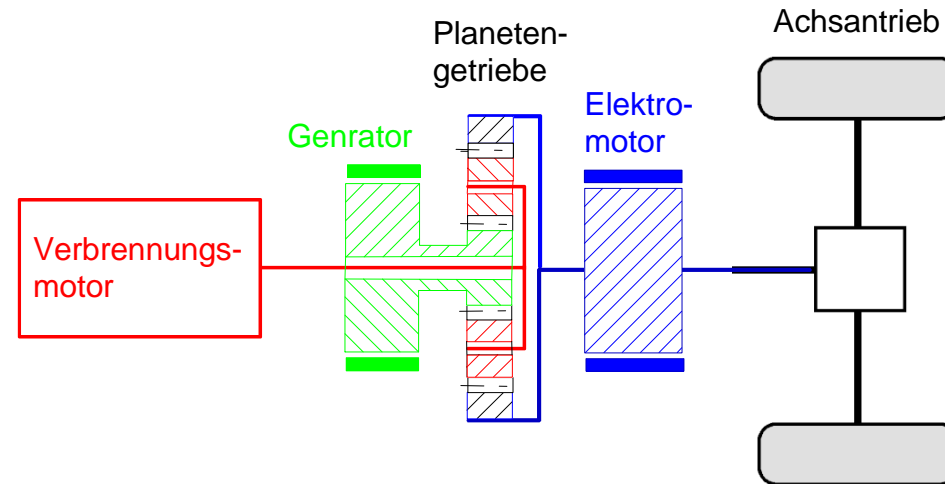
Paralleler Hybridantrieb



Mischhybridantrieb (Beispielschema)

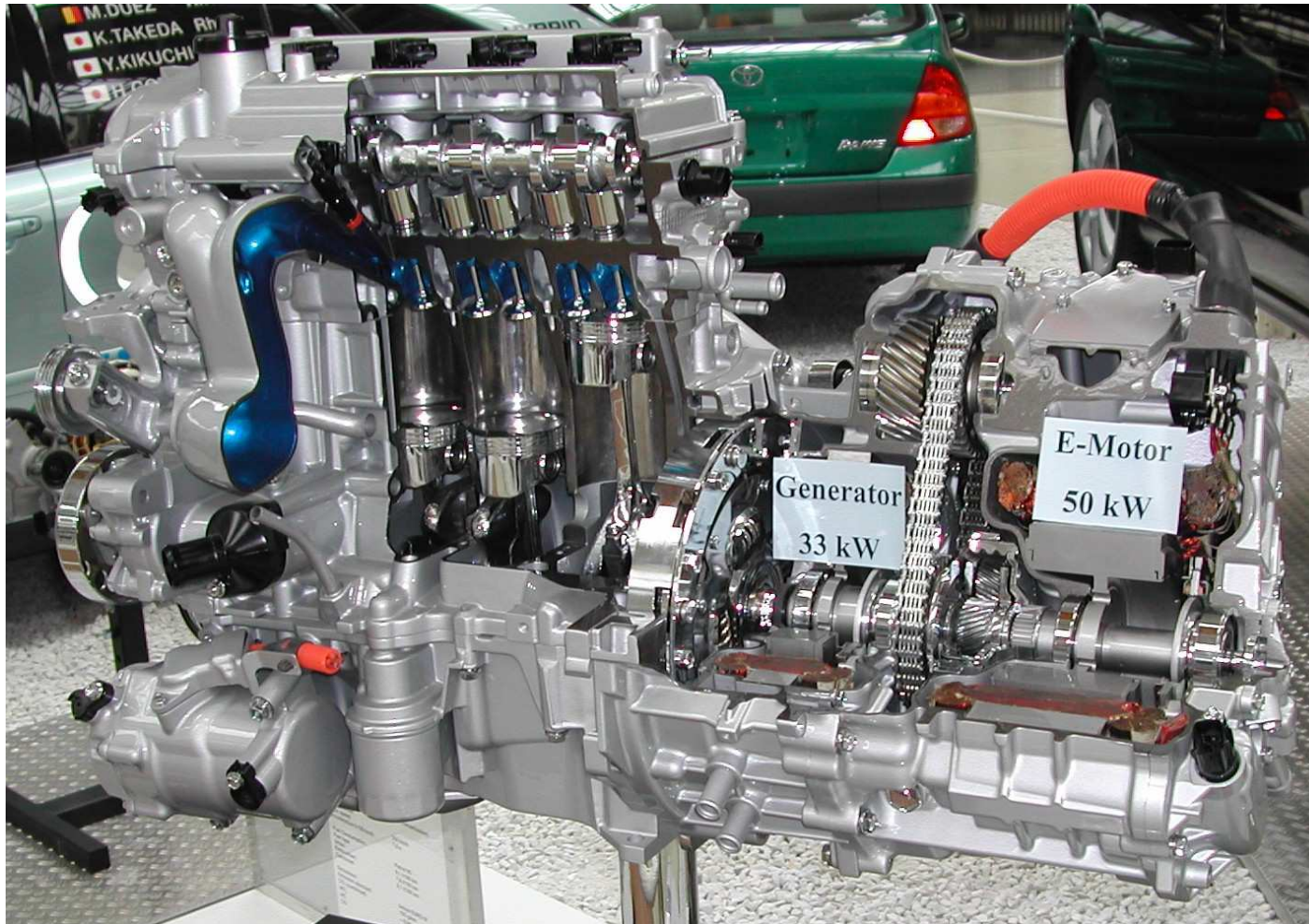


Fahrzustände eines Mischhybridfahrzeugs



- Anfahren: Verbrennungsmotor steht, Elektromotor treibt die Achse an.
- Normalbetrieb: Die Antriebsleistung des Verbrennungsmotor wird auf den Achsantrieb und den Generator verteilt.
- Vollastbeschleunigung: Elektromotor und Verbrennungsmotor treiben zusammen das Fahrzeug an.
- Verzögerung: Der Elektromotor arbeitet in diesem Fall als Generator.

Hybridantriebsstrang (Toyota Prius II)



Hybridantriebsstrang (Toyota Prius III)

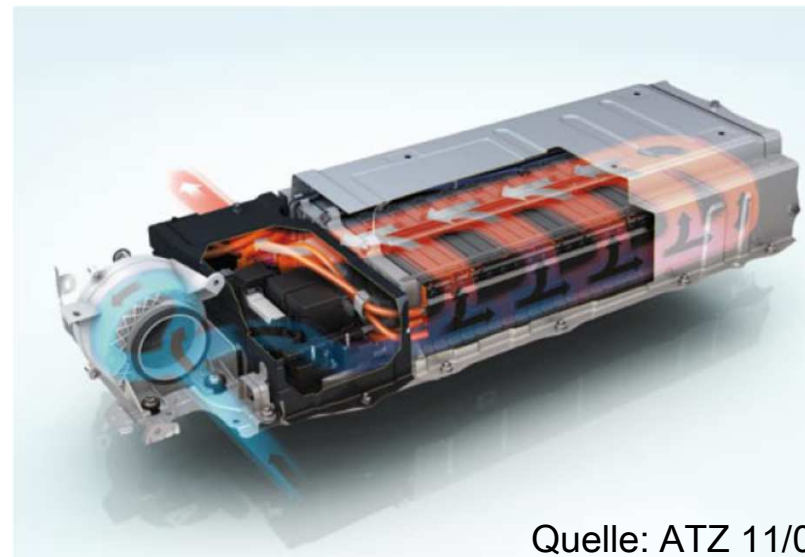
Antriebsstrang

Verbrennungsmotor: 1,8 l 4-Zyl. Otto 73 kW
Elektromotor/Generator: 60 kW-Synchronläufer
Getriebe: stufenlos, elektrisch gesteuert
Systemleistung: 100 kW
Verbrauch: 3,9 l/100km (NEDC)
CO₂-Emissionen: 89 g/km (NEDC)



Hochvoltsystem

Batterietyp: Nickel-Metallhydrid
Batteriespannung: 201,6 V
Systemspannung: 650 V
(wassergekühlter Inverter)
max. Leistung: 27 kW
Kapazität: 6,5 Ah



Quelle: ATZ 11/09

Synchronmaschine für einen Parallel-Hybrid-Antrieb

Mildhybrid SG325 L 32

Technische Daten

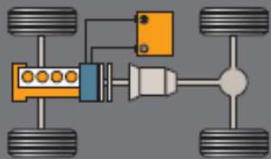
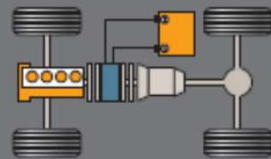
- Permanenterregte Synchronmaschine
- Außenläuferprinzip, luftgekühlt
- Kurbelwellenfeste Montage
- Außendurchmesser 325 mm
- Aktive Länge 32 mm
- Motorische Leistung 12 kW (bei 105 V und 6000 min⁻¹)
- Maximales Kaltstartdrehmoment 220 Nm (bei 325A)

Elektromotor Außenläufer



Quelle: ZF

Funktionen und Eckdaten von Parallel-Hybrid-Antrieben unterschiedlicher Leistungsklassen

	Microhybrid (Startergenerator DynaStart)	Mildhybrid	Fullhybrid
Leistung	2 ... 10 kW	4 ... 20 kW	> 20 kW
Drehmoment	12 ... 900 Nm	100 ... 500 Nm	100 ... 500 Nm
Spannung	14 V ... 250 V	42 V ... 450 V	100 V ... 620 V
Außendurchmesser	240 mm ... 480 mm	240 mm ... 480 mm	240 mm ... 480 mm
Aktive Länge	15 mm ... 70 mm	25 mm ... 55 mm	30 mm ... 80 mm
Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> • Generator • Start-Stopp • Kaltstart 	<ul style="list-style-type: none"> • Generator • Start-Stopp • Rekuperieren • Boosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Generator, Start-Stopp • Rekuperieren • Boosten • Elektrisches Fahren
Verbrauchseinsparung	ca. 8 %	ca. 20 %	bis 45 %
Anwendungsbeispiel	 <p>Kurbelwellenstartergenerator</p>		 <p>Parallel-Hybrid</p>
	<p>■ Generator/E-Motor ■ Batterie ■ Kupplung</p>		

Quelle: ZF

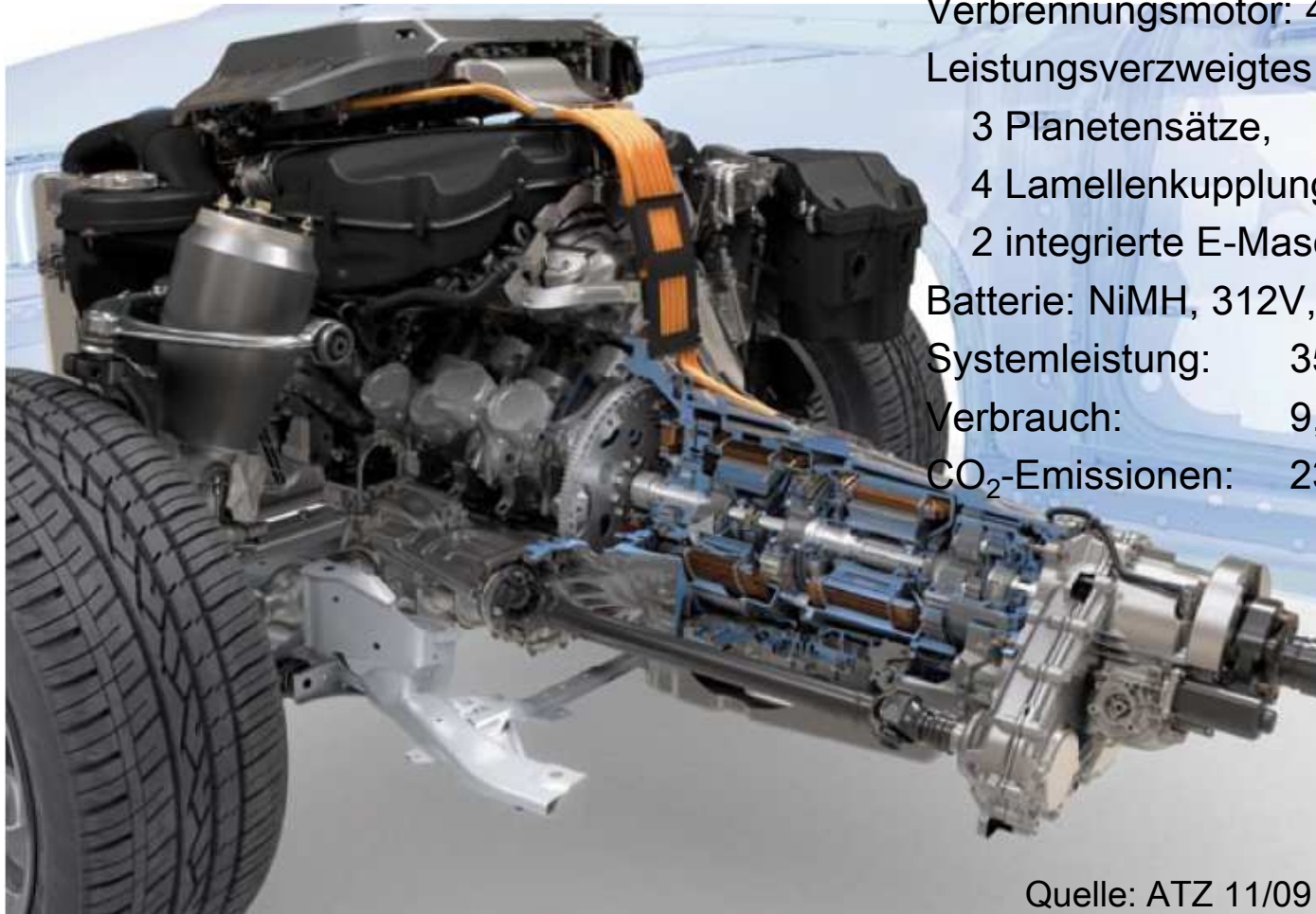
Übungsaufgabe

Der neue europäische Fahrzyklus hat eine Länge von 11,007 km und die Zyklusdauer beträgt 1220 s. Der Leerlaufanteil liegt bei ca. 30%. Um Kraftstoff zu sparen soll ein Fahrzeug mit einem Startergenerator ausgestattet werden. In den Leerlaufphasen schaltet der Motor automatisch ab. Wie groß ist die Kraftstoffersparnis auf 100 km, wenn der Leerlaufverbrauch 700 g/h beträgt?

Dichte Diesel

$$\rho_K = 830 \text{ kg/m}^3$$

Vollhybridantriebsstrang des BMW X6



Verbrennungsmotor: 4,4l V8 300kw

Leistungsverzweigtes Hybridgetriebe:

3 Planetensätze,

4 Lamellenkupplungen

2 integrierte E-Maschinen

Batterie: NiMH, 312V, 2,4 kWh

Systemleistung: 357 kW

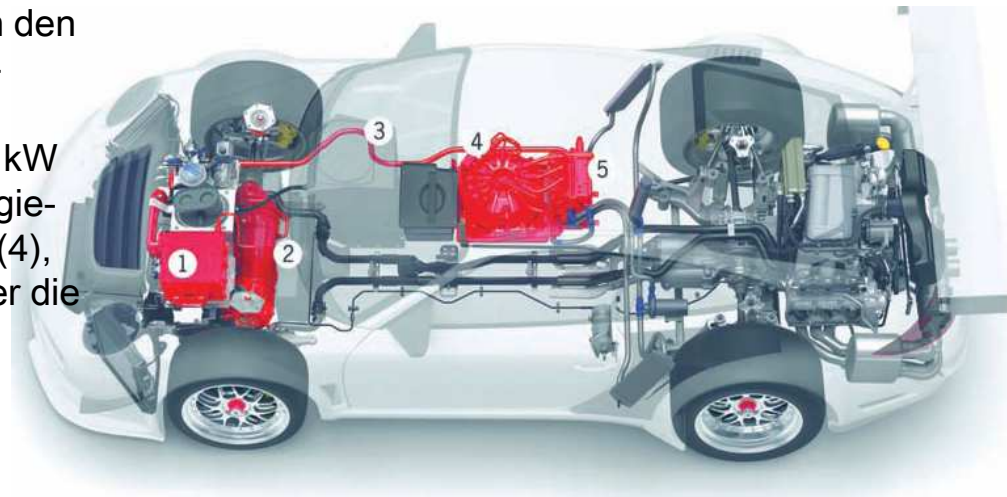
Verbrauch: 9,9 l/100km (NEDC)

CO₂-Emissionen: 231 g/km (NEDC)

Quelle: ATZ 11/09

Hybridantrieb des Porsche 911 GT3 R Hybrid

Die Hinterräder des Fahrzeugs werden durch den konventionellen 4l-6-Zylinder Boxermotor angetrieben. Die Vorderräder werden von zwei Elektromotoren (2) mit einer Leistung von 60 kW über Planetengetriebe angetrieben. Als Energiespeicher dient ein Schwungmassenspeicher (4), der mit Hilfe einer Leistungselektronik (5) über die Hochspannungsleitungen (3) die Leistungselektronik (1) der Elektromotoren versorgt.



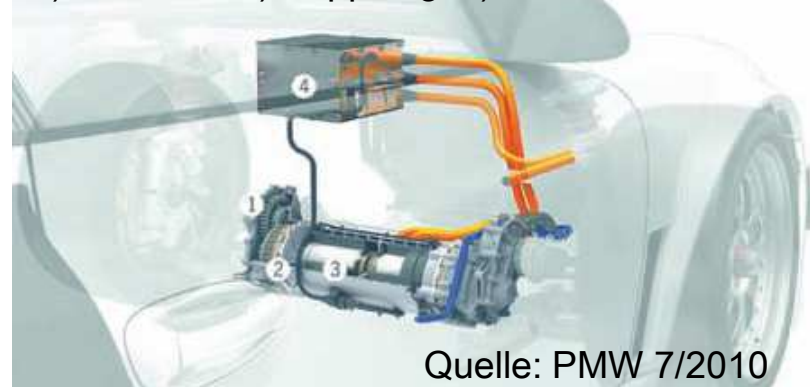
Schwungmassenenergiespeicher:

1) Rotor; 2) Stator; 3) Leistungselektronik



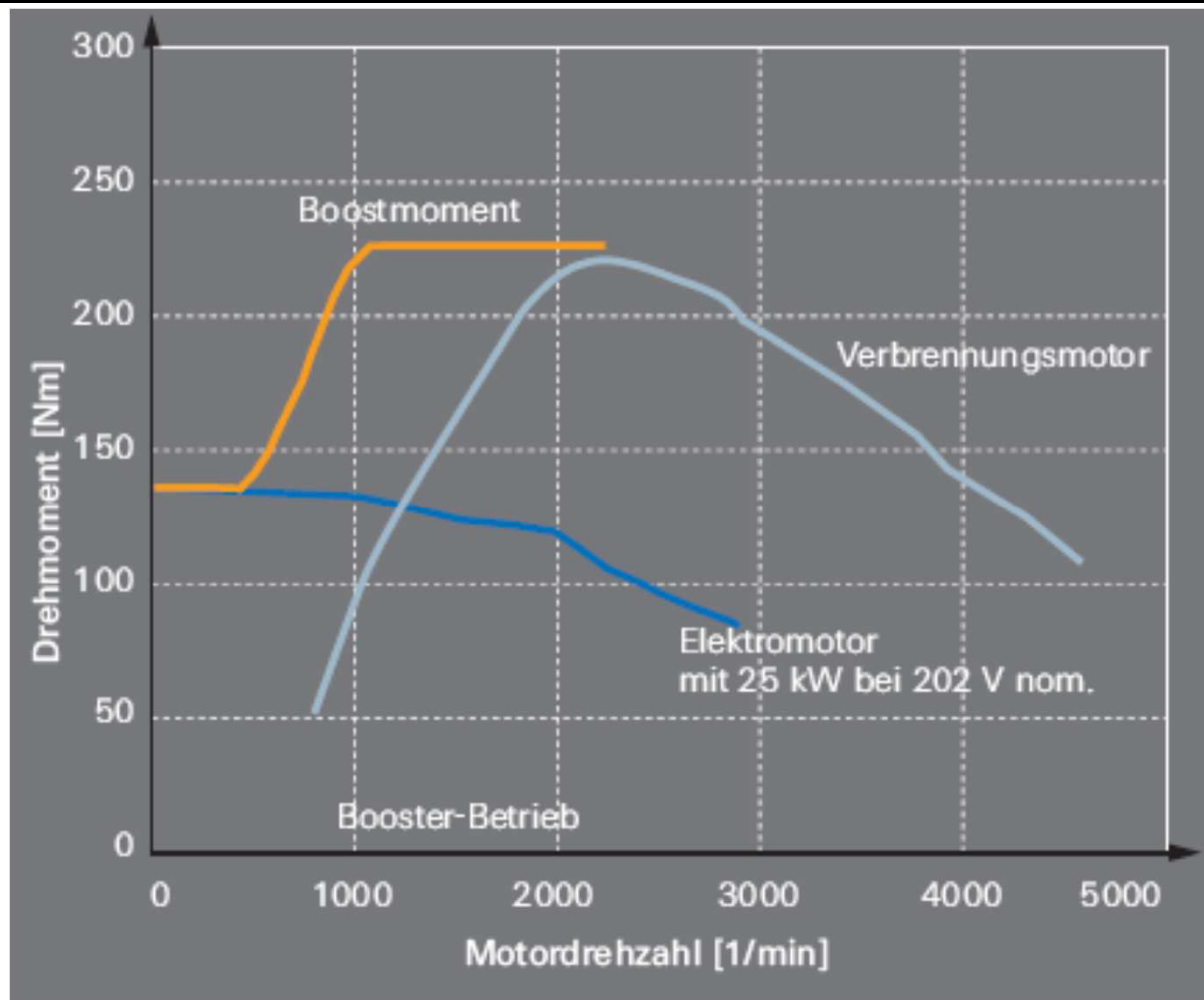
Elektrische Vorderachse:

1) Getriebe; 2) Kupplung; 3) Elektromotor



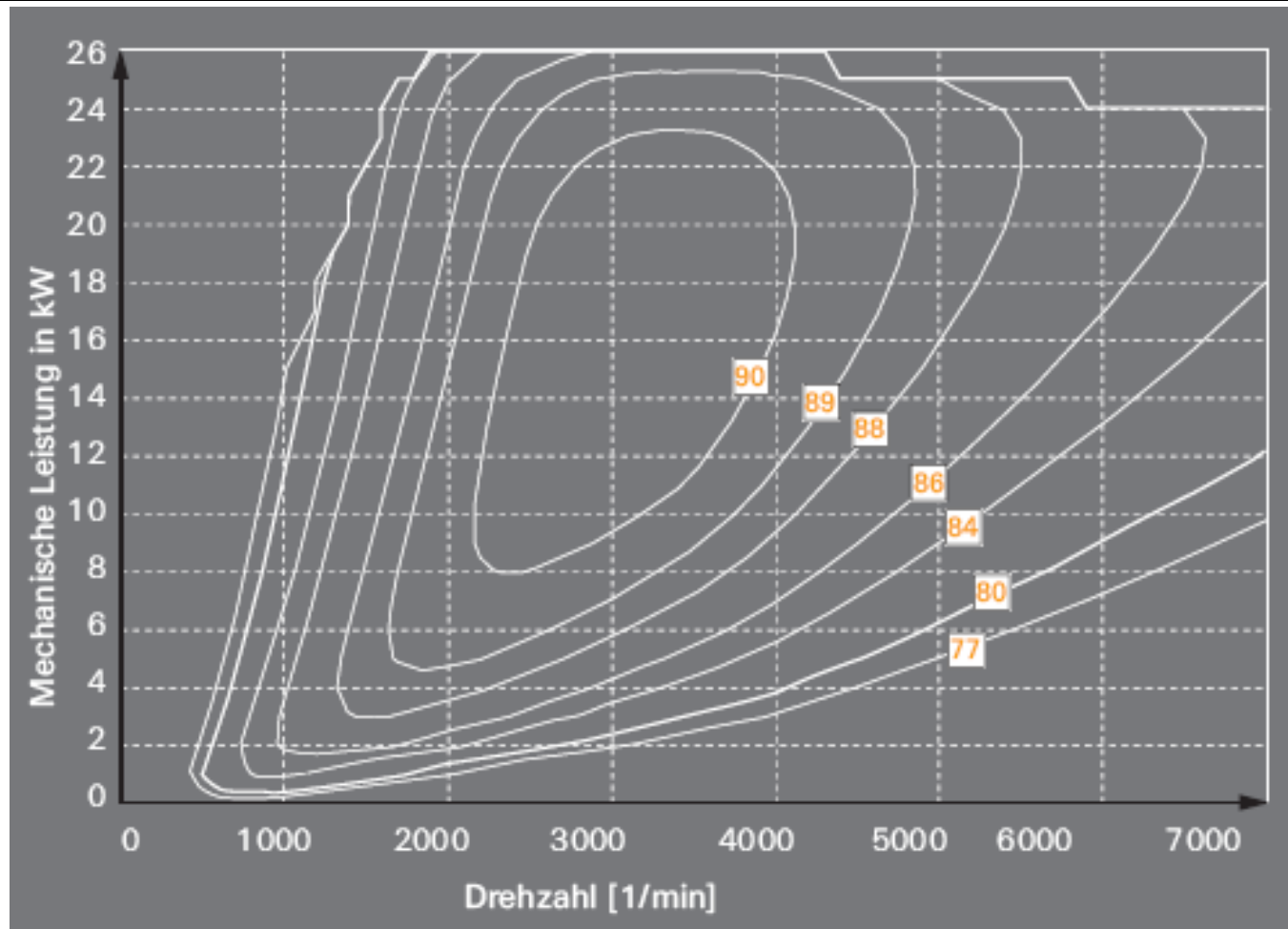
Quelle: PMW 7/2010

Drehmomentkennlinien der Antriebsmaschinen in einem Parallel-Hybrid-Antrieb



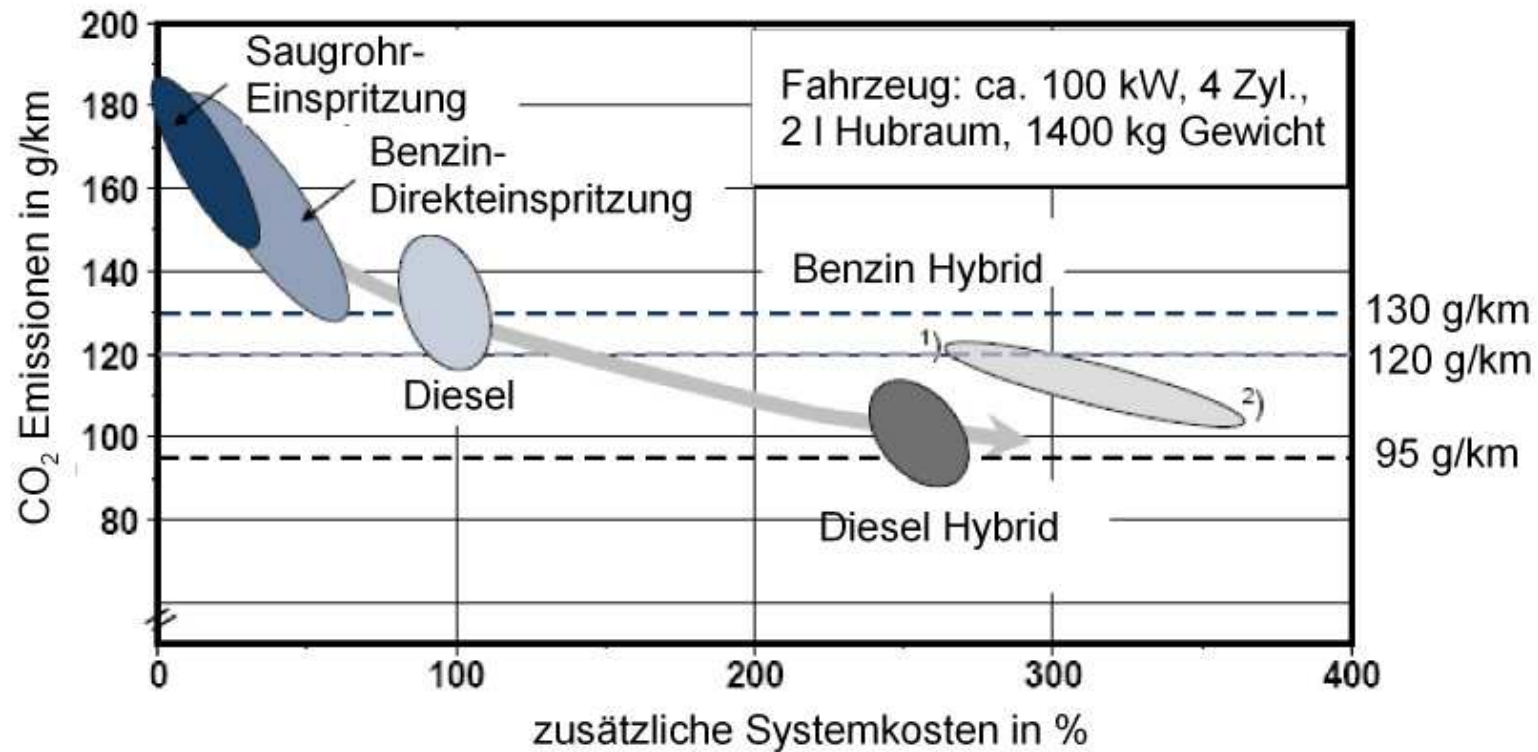
Quelle: ZF

Wirkungsgradkennfeld einer Synchronmaschine bei Motorbetrieb



Quelle: ZF

CO₂ Emissionen und Kostensituation verschiedener Kfz-Antriebe



Quelle: Bosch

Übungsaufgabe

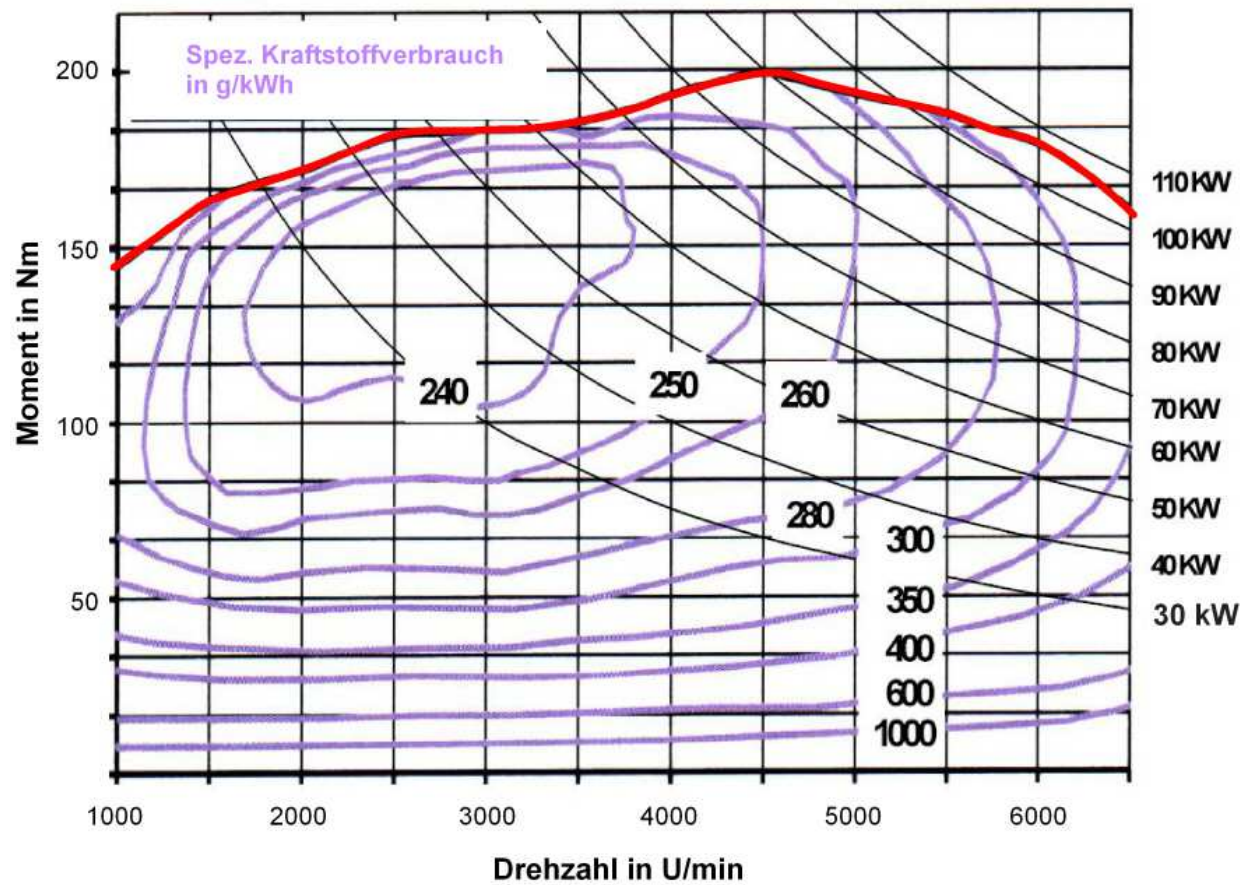
Ein Fahrzeug ist mit einem Parallel-Hybrid-Antrieb bestehend aus einem 2,0 l Ottomotor und einer Elektromaschine ausgerüstet. Das Verbrauchsverhalten im 5. Gang soll untersucht werden. Die Antriebsstrangverluste können vernachlässigt werden.

- Bestimmen Sie den Streckenverbrauch des Fahrzeugs im fünften Gang bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h ohne Verwendung der Elektromaschine.
- Das Fahrzeug soll eine halbe Stunde lang bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h bei Betrieb mit dem Ottomotor gleichzeitig den Akkumulator laden. Danach soll das Fahrzeug eine halbe Stunde lang bei gleicher Geschwindigkeit rein elektrisch betrieben werden. Welche Kapazität muss der Akkumulator mindestens haben? Welcher Streckenverbrauch ergibt sich über die komplette Fahrzeit?

Fahrzeugdaten:

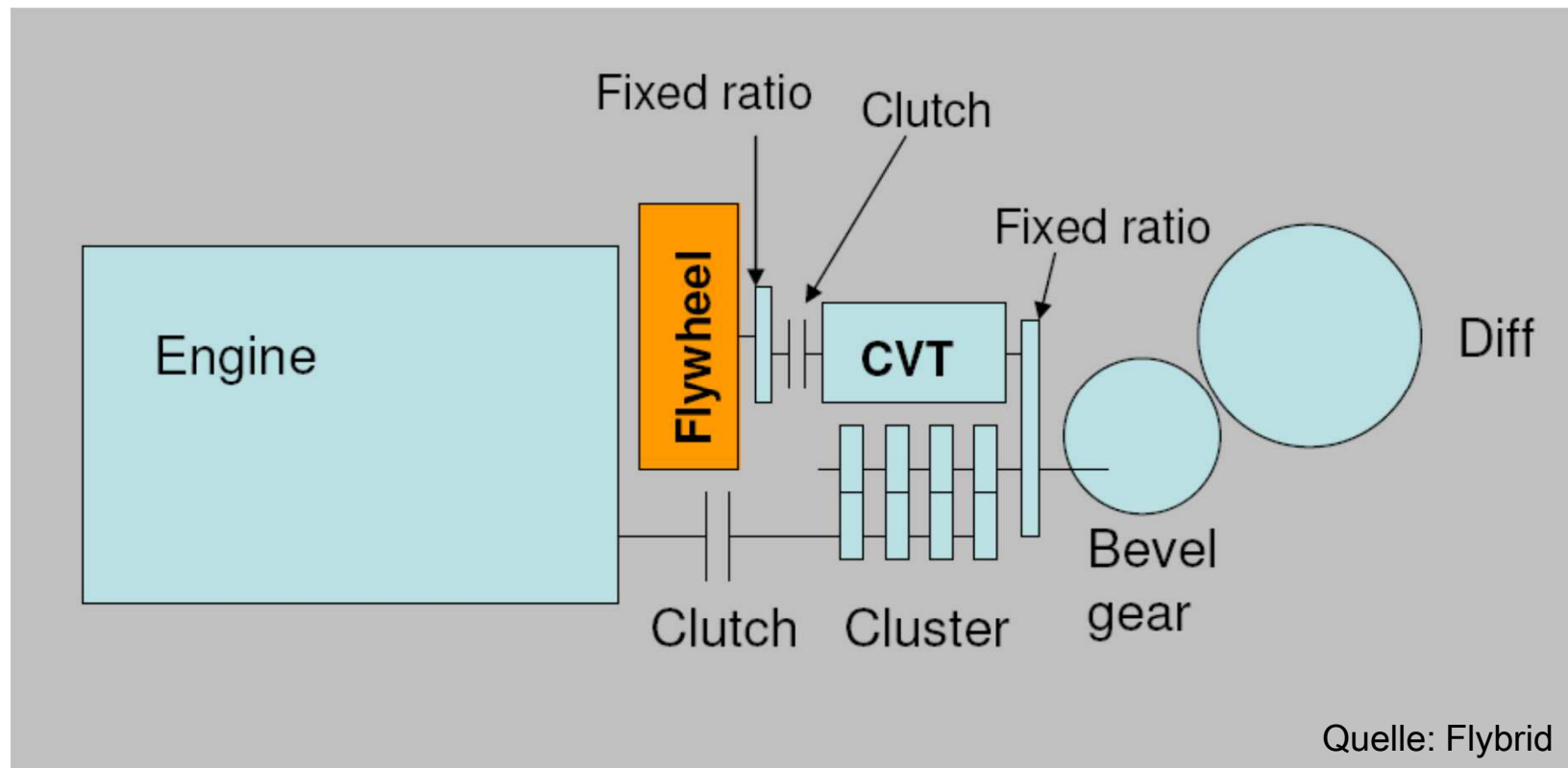
Gesamte Fahrzeugmasse einschließlich Zuladung	$m_F = 1150 \text{ kg}$
Rollwiderstandsbeiwert	$f_R = 0,014$
Luftwiderstandsbeiwert	$C_w = 0,29$
projizierte Fahrzeugfläche	$A = 1,80 \text{ m}^2$
Dichte der Luft	$\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$
dynamischer Rollradius	$r_{\text{dyn}} = 308 \text{ mm}$
Getriebeübersetzung im fünften Gang	$i_5 = 0,8$
Achsübersetzung	$i_{\text{sek}} = 3,4$
Wirkungsgrad der Elektromaschine im Motorbetrieb	$\eta_M = 0,92$
Wirkungsgrad der Elektromaschine im Generatorbetrieb	$\eta_G = 0,93$
Lade- und Entladewirkungsgrad der Batterie	$\eta_B = 0,91$
Dichte Benzin	$\rho_K = 730 \text{ kg/m}^3$

Motorkennfeld eines 2,0 l Ottomotors

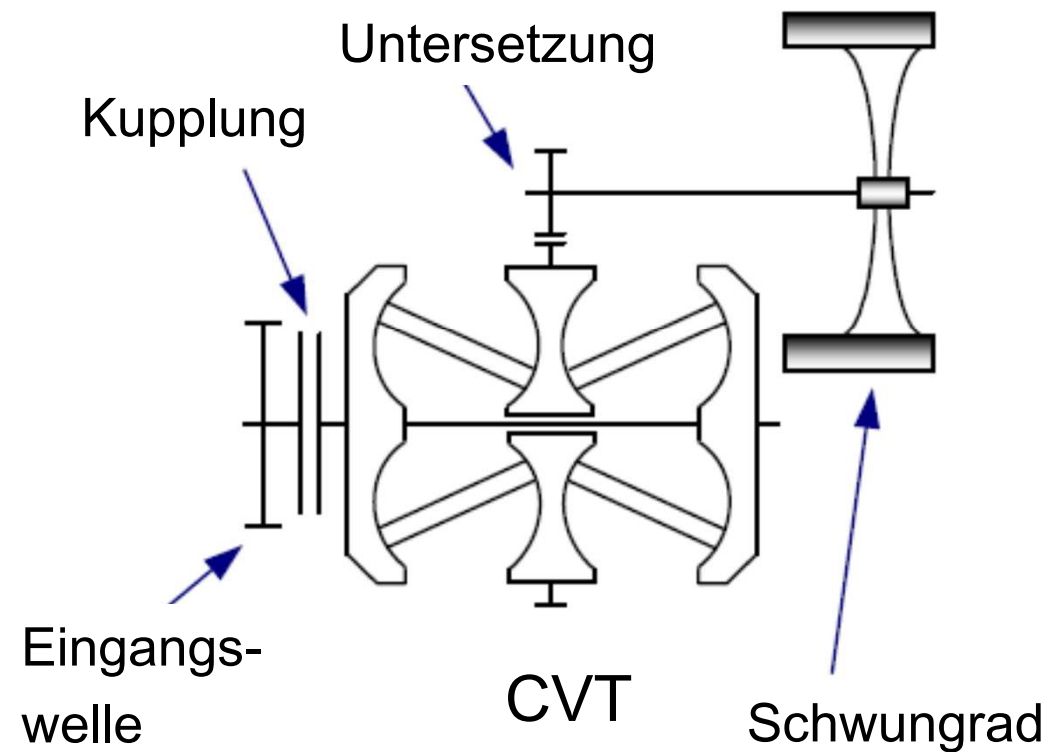


5.2.3 Mechanische Hybridantriebe

Funktionsschema eines Hybridantriebes mit Schwungmassenenergiespeicher



Anbindung eines Schwungrades an den Antriebsstrang durch ein stufenloses Getriebe



Quelle: Torortrak

Komponenten eines Schwungrad-Energiespeichers

- hoch drehendes Schwungrad aus Verbundwerkstoffen
- Sicherheits- und Vakuumgehäuse für das Schwungrad
- Stufenlose Getriebe zur Anbindung des Schwungrades an den Antriebsstrang und zur Regelung des Brems- bzw. Rückgewinnungsmomentes
- Kupplung zur Abkopplung der Schwungmasse und Reduzierung von Verlusten
- Steuergerät zur Ansteuerung des stufenlosen Getriebes

Energie und Moment einer Schwungmasse

Kinetische Energie $W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} J_S \cdot \omega_S^2$

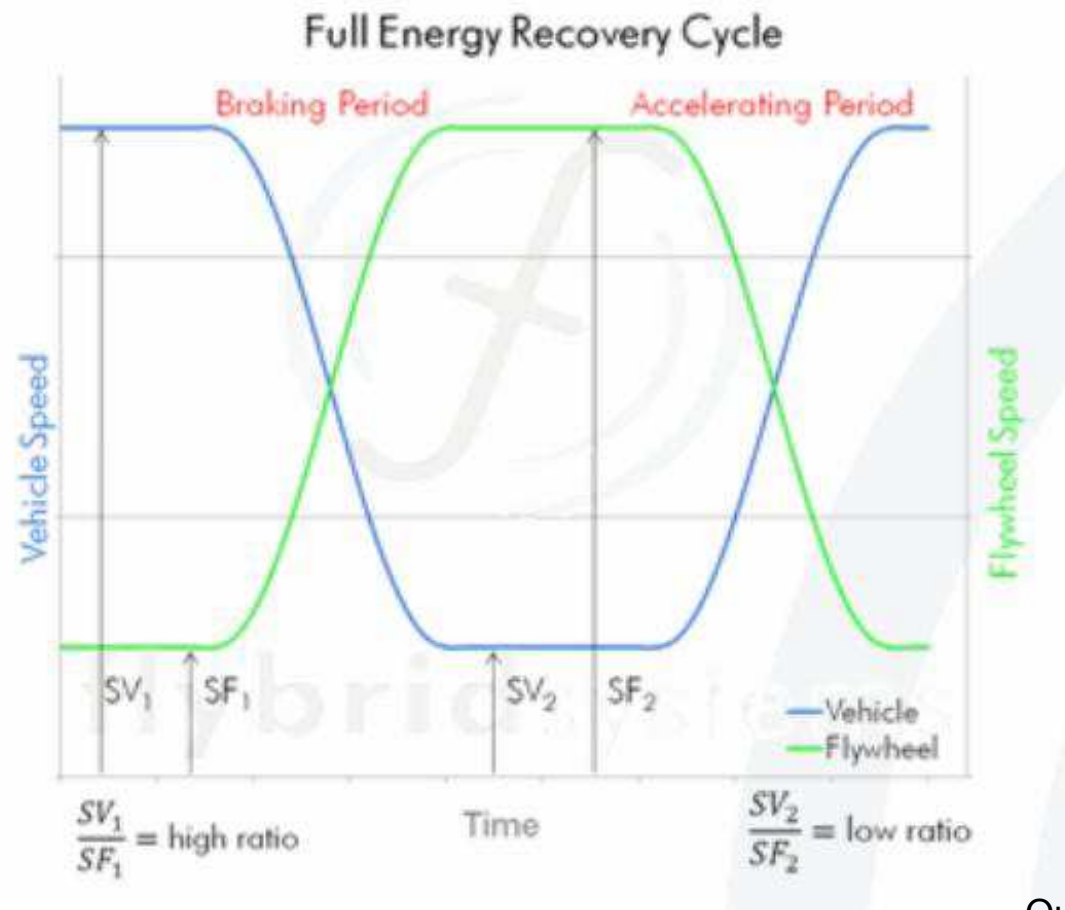
J_S = Massenträgheitsmoment der Schwungmasse

ω_S = Winkelgeschwindigkeit der Schwungmasse

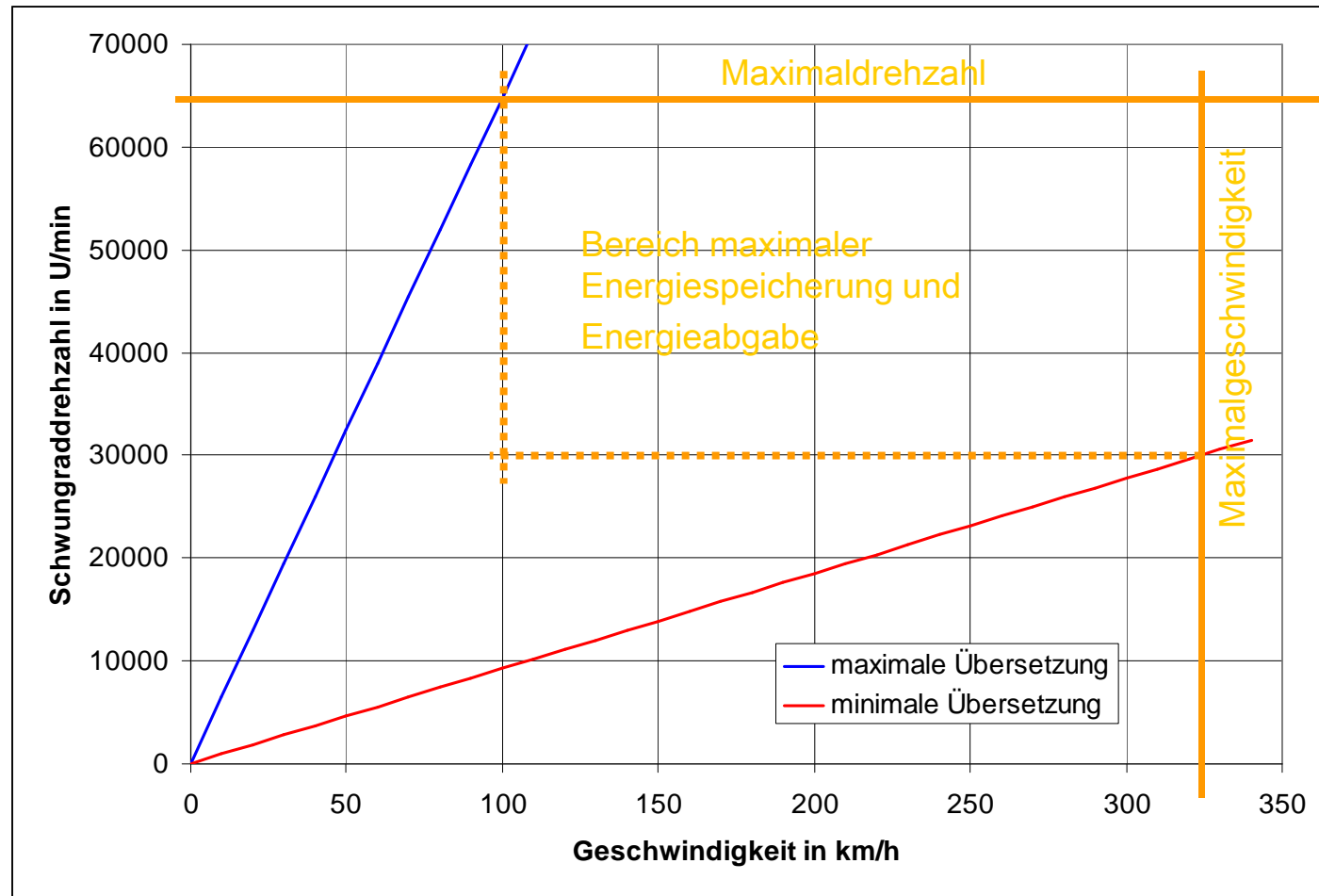
Schwungmassenmoment $M_S = J_S \cdot \dot{\omega}_S$

$\dot{\omega}_S$ = Winkelbeschleunigung der Schwungmasse

Energierückgewinnungszyklus eines Hybridfahrzeugs mit Schwungradspeicher



Drehzahlen des Schwungmassenspeichers eines Formel 1 Fahrzeugs



Hauptkomponenten eines Schwungmassenspeichers



CVT variator



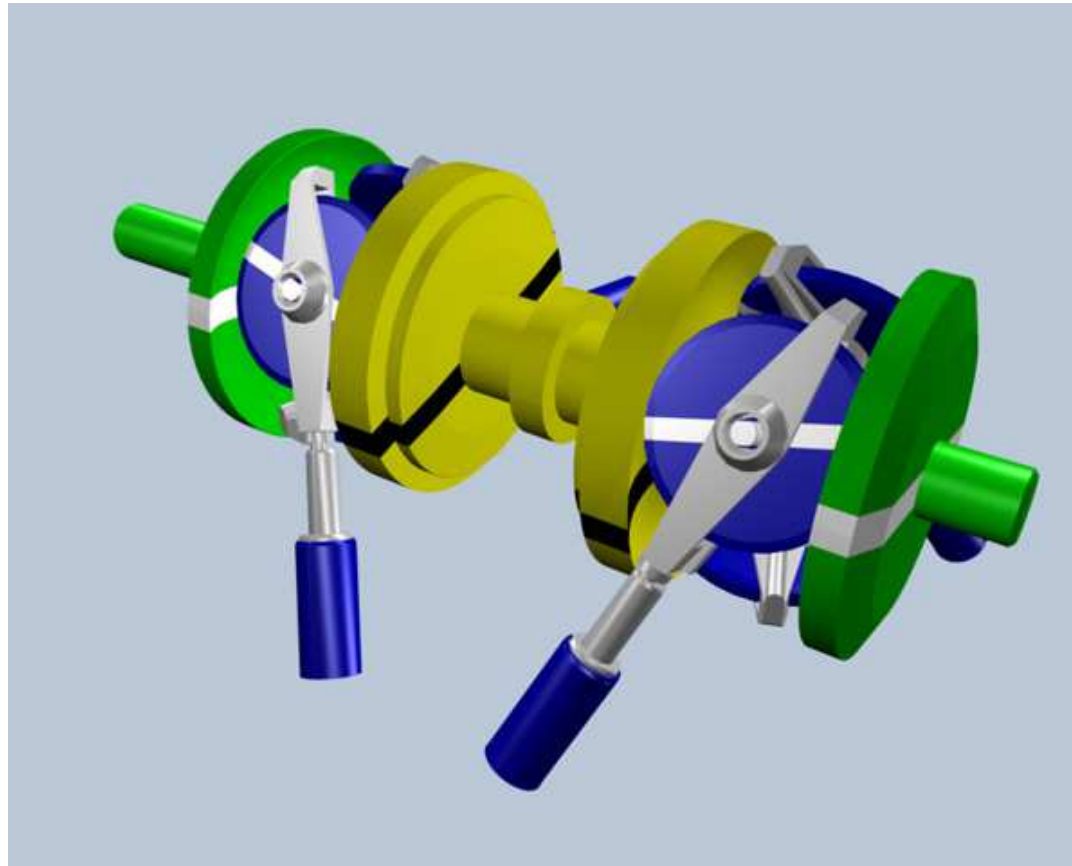
Control system



Flywheel

Quelle: Flybrid

Variator



Quelle: Torotrak

Schwungmassen-Energiespeicher



Technische Daten:

max. Drehzahl: 64500 min⁻¹

Energiekapazität: 400 kJ

Leistung: 60 kW

Gewicht: 25 kg

Effizienz: >70 %

Quelle: Flybrid

Dimensionen eines Schwungmassen-Energiespeichers



Quelle: Torotrak

Übungsaufgabe

Die kinetische Energie eines Fahrzeugs soll so weit möglich beim Bremsen zurückgewonnen werden. Das Fahrzeug verzögert von 100 km/h auf 0 km/h in 15 s mit einer konstanten Verzögerung.

- Welche Kapazität muss ein Energiespeicher für diesen Verzögerungsvorgang mindestens aufweisen?
- Welche Drehzahl würde sich für einen Schwungmassenenergiespeicher nach Abschluss der Verzögerung ergeben, wenn zu Beginn schon eine Drehzahl von 1000 U/min vorliegt?

Fahrzeugdaten:

Gesamte Fahrzeugmasse einschließlich Zuladung	$m_F = 1300 \text{ kg}$
reduzierte Fahrzeugmasse	$m_{F,red} = 1350 \text{ kg}$
Rollwiderstandsbeiwert	$f_R = 0,016$
Luftwiderstandsbeiwert	$c_w = 0,34$
projizierte Fahrzeugfläche	$A = 2,01 \text{ m}^2$
Dichte der Luft	$\rho_L = 1,2 \text{ kg/m}^3$

Daten für elektrische Energiespeicherung:

Wirkungsgrad der Elektromaschine im Generatorbetrieb	$\eta_G = 0,88$
Lade- und Entladewirkungsgrad der Batterie	$\eta_B = 0,89$

Daten für mechanische Energiespeicherung:

Wirkungsgrad des Schwungmassenantriebes	$\eta_S = 0,95$
Massenträgheitsmoment der Schwungmasse	$J_S = 2,0 \text{ kgm}^2$