

Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 6: Elektrofahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier

Aktuelles Kapitel

Kapitel 1: Einführung – Beispiele, Anwendungsgebiete

Kapitel 2: Grundlagen Magnetischer Kreis

3: Aufbau und Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

4: Gesteuerter Betrieb der Gleichstrommaschine

4a: Leistungselektronik für Gleichstrommaschinen

5: Drehzahl geregelter Gleichstromantrieb: Systemanalyse

6: Elektrofahrzeuge



Kapitel 7: Grundlagen Drehfeldmaschinen

8: Aufbau und Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

9: Gesteuerter Betrieb der Asynchronmaschine

10: Betriebsarten und drehzahlvariabler Betrieb der ASM

10a: Leistungselektronik für Drehfeldmaschinen

Kapitel 11: Aufbau und Betriebsverhalten Synchronmaschine

12: Aktuelle Entwicklung: neue Maschinenvarianten

13: Ansteuerung und Systemverhalten BLDC-Motor

Grundverständnis
elektrischer Antrieb

- Gleichstrommaschine
- Steuerung & Regelung
- Gleichrichter, DC-Steller

Drehfeldmaschinen:

- Drehfeldwicklung
- Asynchronmaschine
- Wechselrichtertechnik

Synchronmaschine:

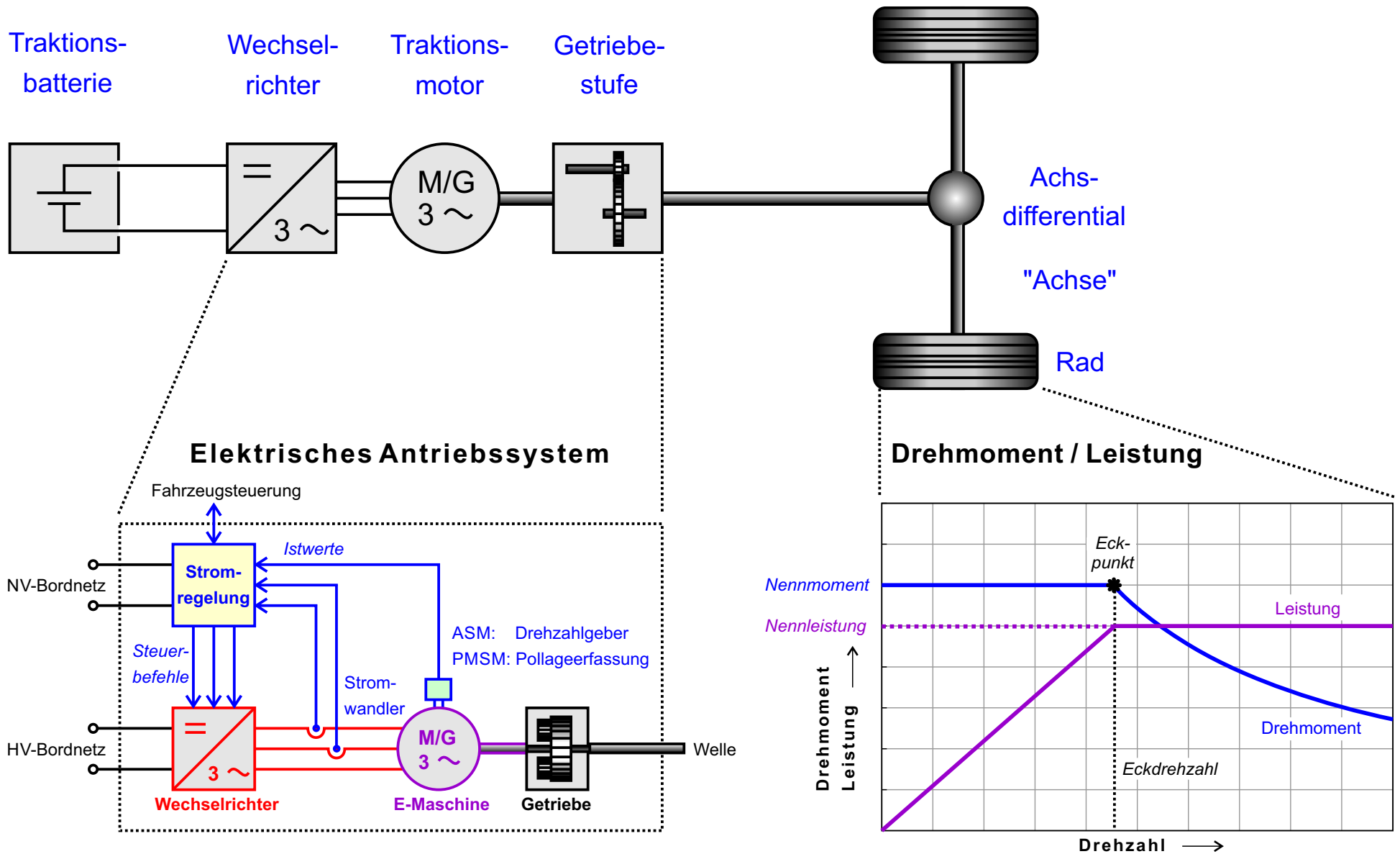
- fremderregte SM
- PMSM, MDM, BLDC-Motor

Inhalt

Kapitel 6: Elektrofahrzeuge

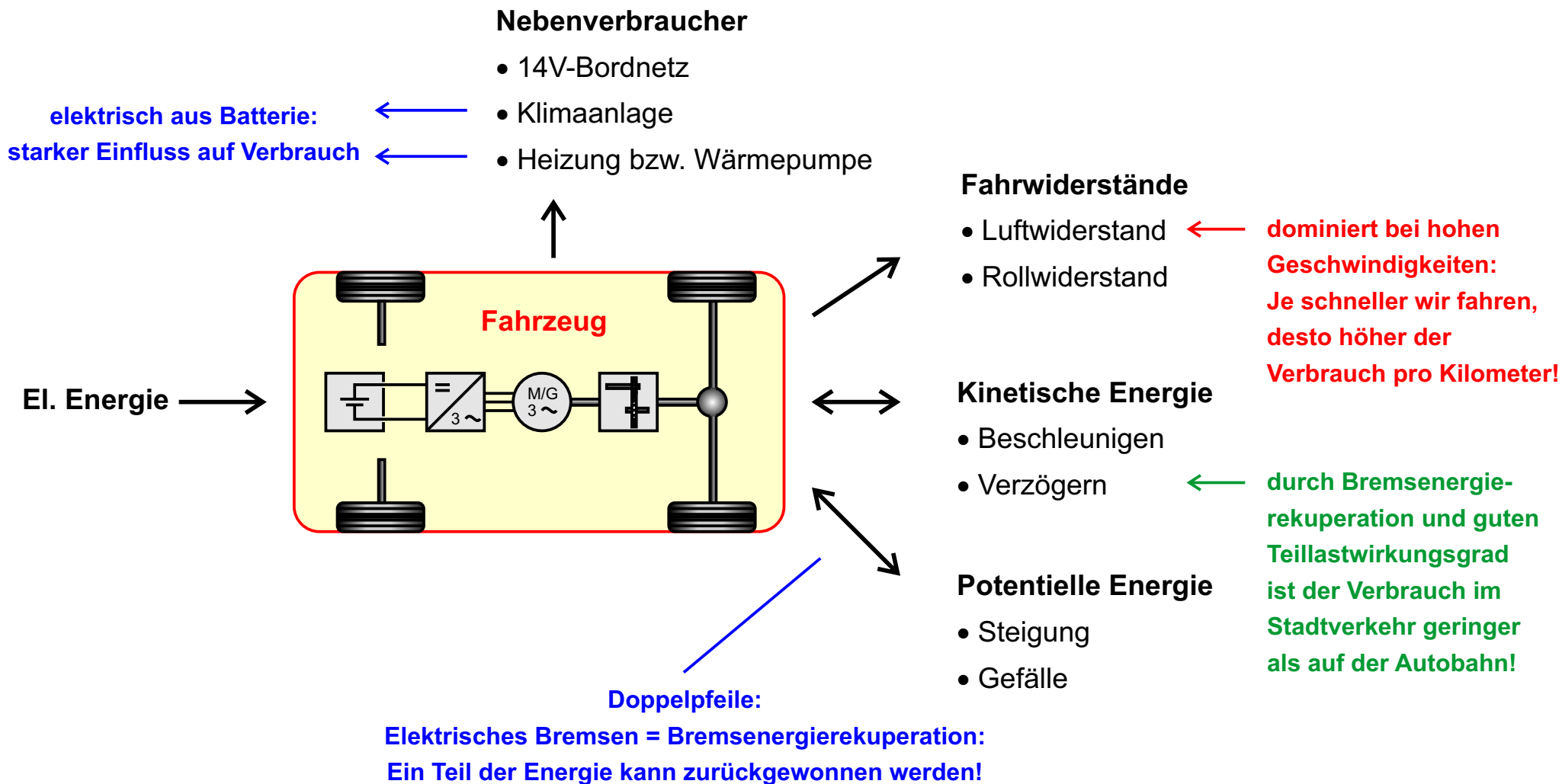
- 6.1 Systemebene
- 6.2 CO₂-Bilanz
- 6.3 Traktionsmotoren
- 6.4 Hybridfahrzeuge
- 6.5 Brennstoffzellenfahrzeuge
- 6.6 Human Powered Vehicles
- 6.7 Fachvokabular

6.1 Systemebene



6.1 Systemebene

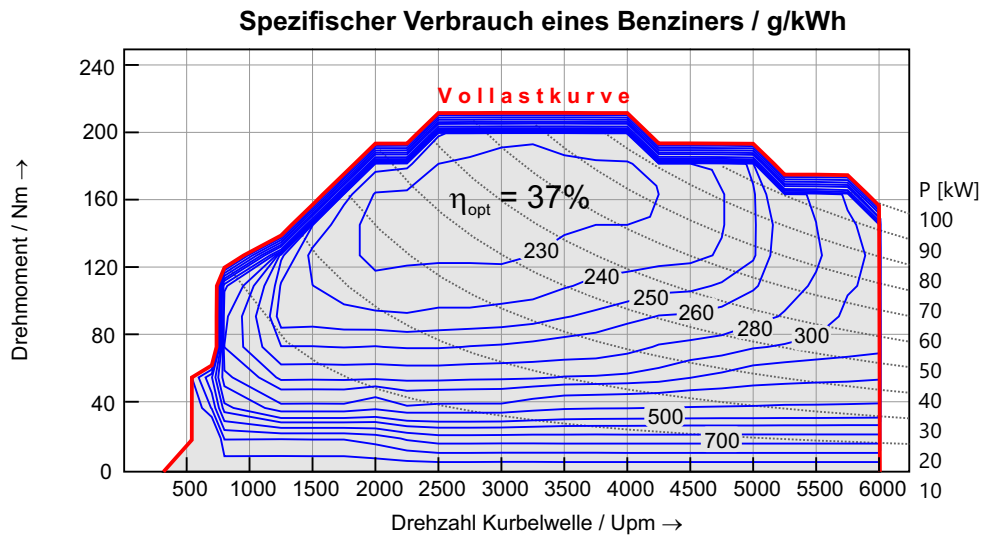
Energiefluss im Elektrofahrzeug



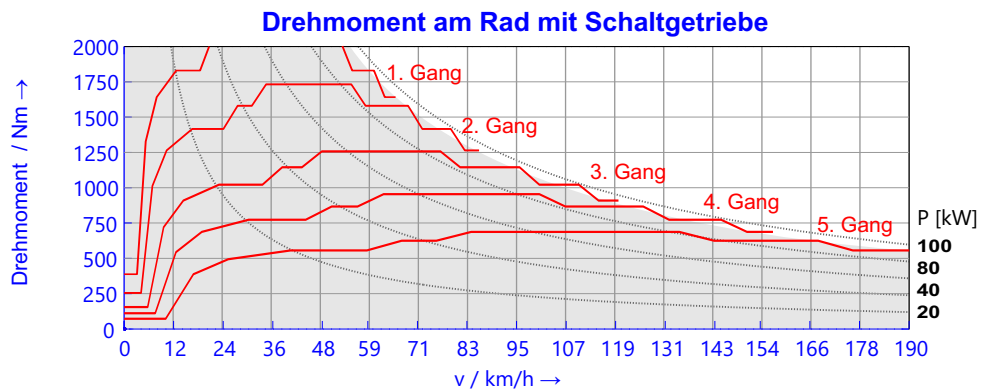
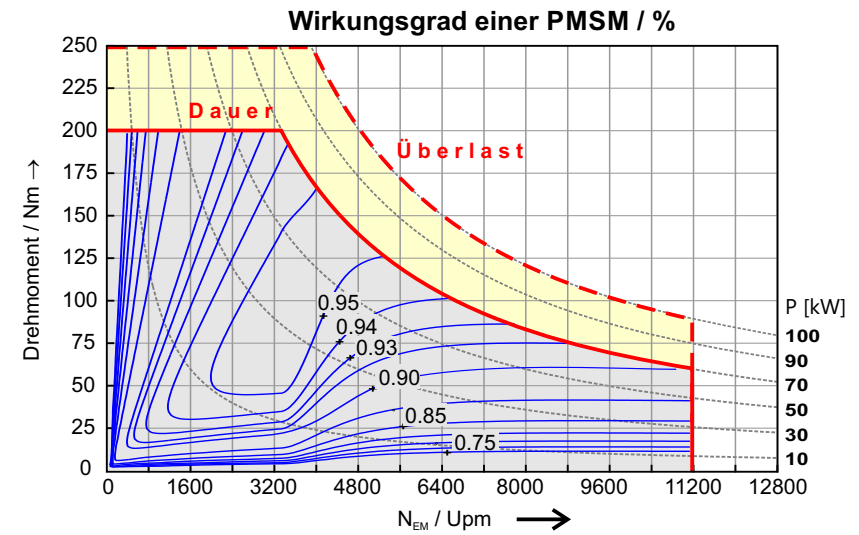
6.1 Systemebene

Gegenüberstellung Verbrennungsmotor — Elektroantrieb

Verbrennungsmotor: Wärmekraftmaschine

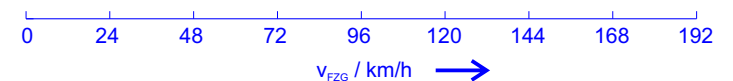


Elektromaschine: Energiewandler



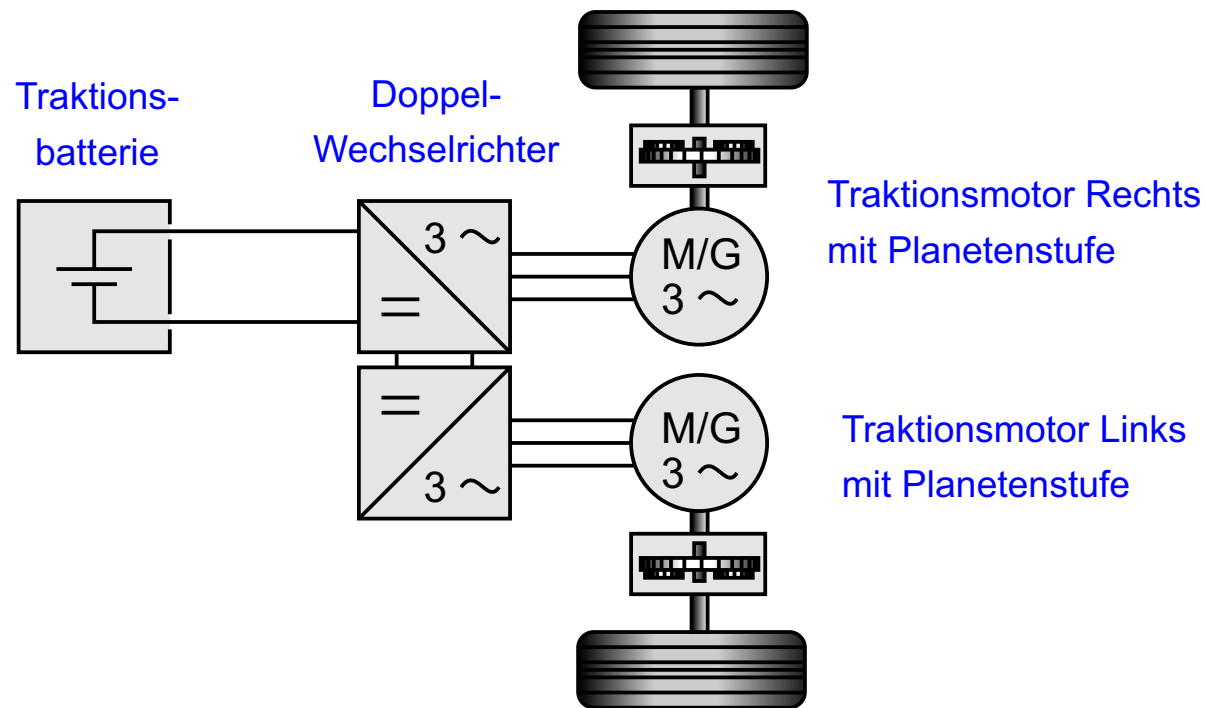
Drehmoment am Rad mit fester Getriebestufe

$$i = 8: M_{EM} = 250Nm \Rightarrow 2000Nm \text{ am Rad}$$



6.1 Systemebene

Weitere Antriebsstrangtopologien: Doppelmotor

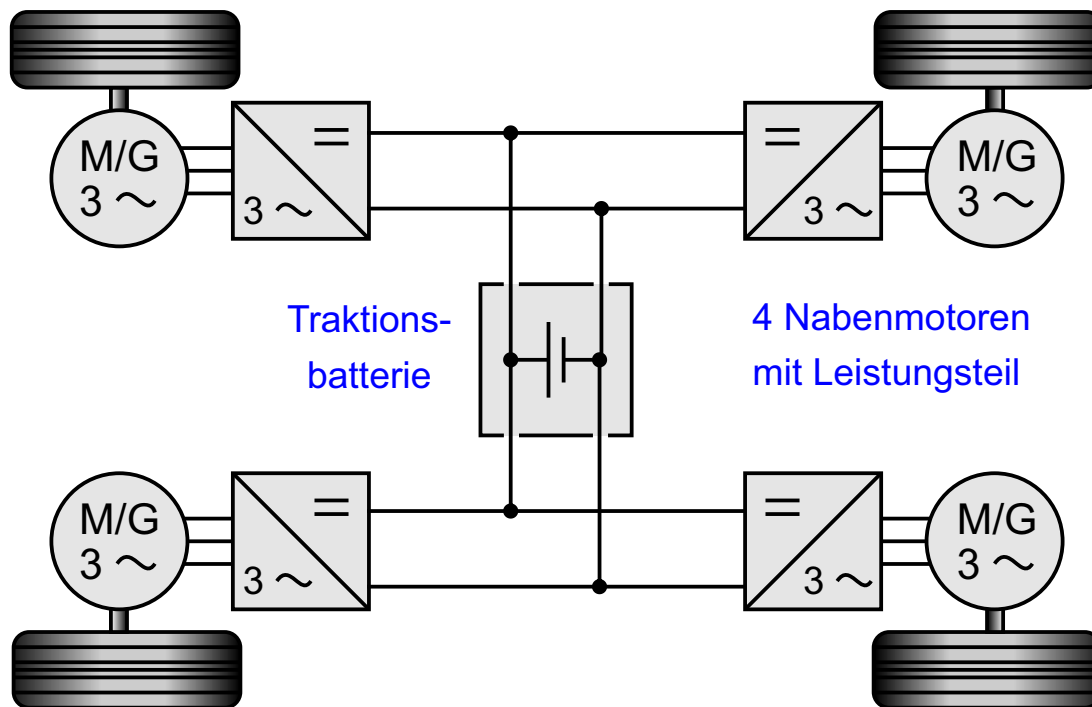


Besonderheiten:

- Differential entfällt
- Torque-Vectoring auf Antriebsachse
- Ggf. integriertes System Motor mit Leistungselektronik

6.1 Systemebene

Weitere Antriebsstrangtopologien: Direktantrieb mit Nabenmotoren



Besonderheiten:

- Motor in das Rad integriert
⇒ unabgedert, Bauraumkonkurrenz mit Bremse
- häufig: Direktantrieb ohne Getriebe
⇒ Motoren mit sehr hoher Momentendichte erforderlich
- Torque-Vectoring auf beiden Achsen möglich

6.2 CO₂-Bilanz

Gegenüberstellung Verbrennungsmotor — Elektroantrieb

Kfz mit Verbrennungsmotor (Beispiel, konservativ gerechnet)

Spritverbrauch Benziner: 6,5 l/100km
 CO₂-Em. ab Zapfsäule: 150 g / km
 CO₂-Em. Well to Wheel: **180 g / km**

↑
 inkl. Förderung und Raffinerie

Elektroauto – "BEV" = Battery Electric Vehicle (Beispiel, konservativ gerechnet)

Energieverbrauch: 20 kWh / 100 km = 0,2 kWh / km
 CO₂ aus Strommix: 500 g CO₂ / kWh
 CO₂-Emissionen: **100 g / km**

**aber: die Herstellung
 einer 50 kWh - Batterie
 emittiert 5..10 t CO₂**

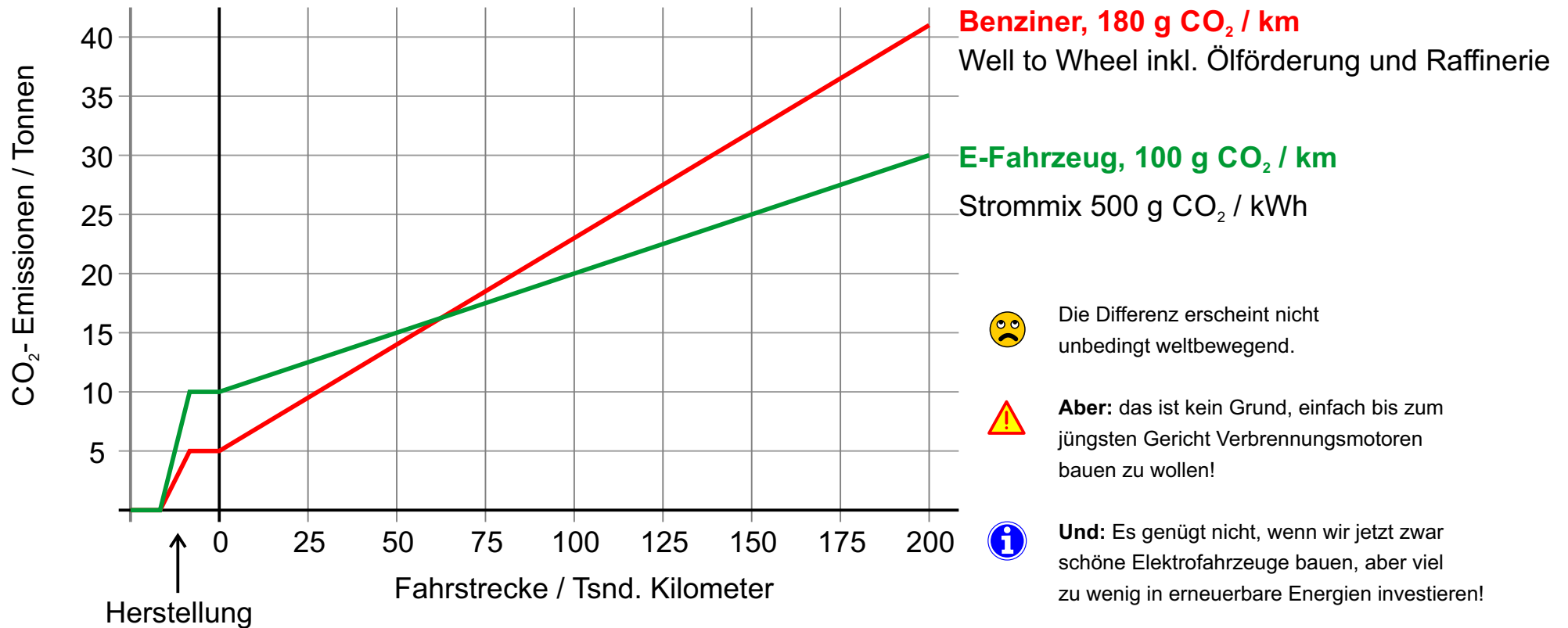
**E-Auto: die CO₂-Bilanz hängt von
 Fahrzeuggröße und Strommix ab:**

BMW i3:	13 kWh / 100 km	m _{FZG} = 1350 kg	} Herstellerangaben
Tesla Model S:	22 kWh / 100 km	m _{FZG} = 2290 kg	
Braunkohle:	1000 g CO ₂ / kWh	Wirkungsgrad um 35 %	
Strommix:	572 g CO₂ / kWh	Deutschland, 2013	
	474 g CO₂ / kWh	Deutschland, 2018	
Gaskraftwerk:	400 g CO ₂ / kWh	GuD, Wirkungsgrad bis 60 %	
Solaranlage:	50 g CO ₂ / kWh	Energieaufwand für Herstellung!	

6.2 CO₂-Bilanz

Gegenüberstellung Verbrennungsmotor — Elektroantrieb

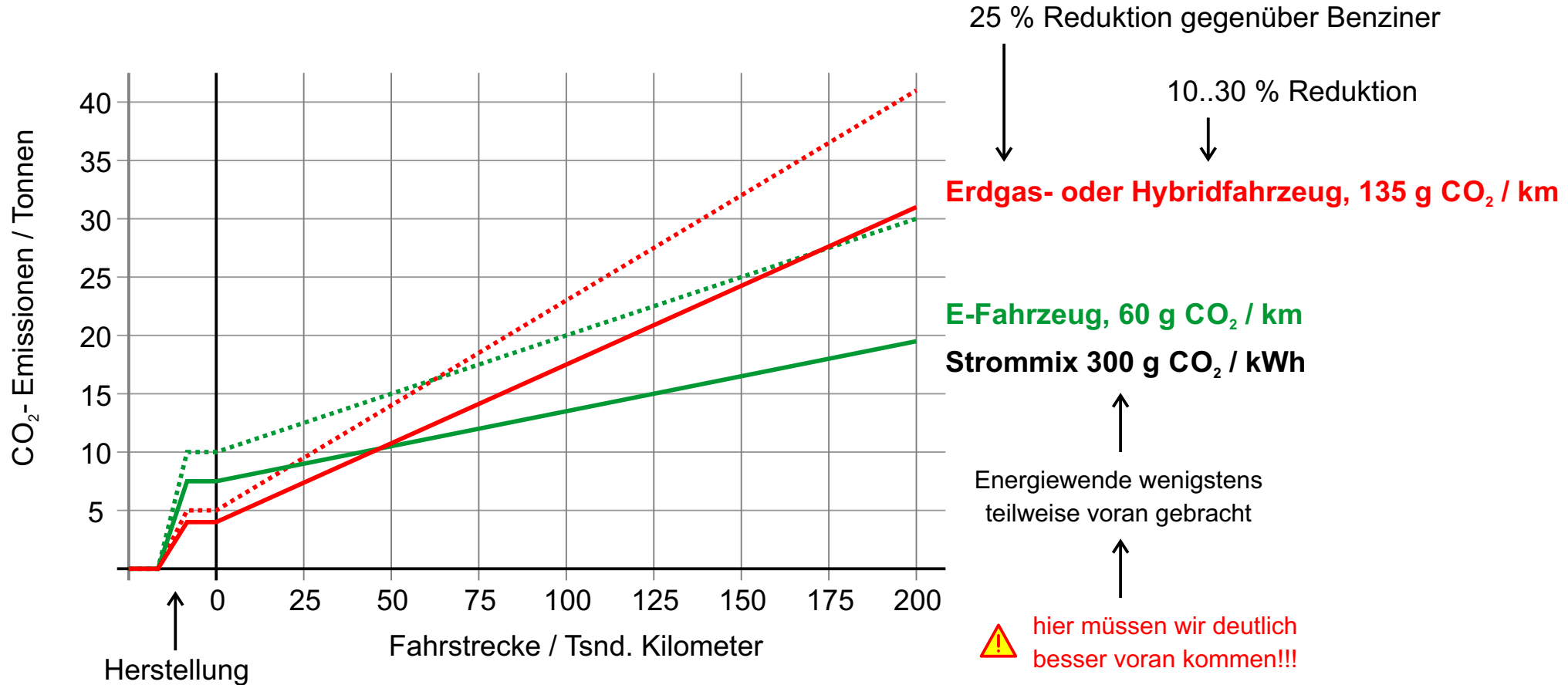
Iststand



6.2 CO₂-Bilanz

Gegenüberstellung Verbrennungsmotor — Elektroantrieb

mittelfristiges Potential



6.2 CO₂-Bilanz


Fazit

CO₂ - Bilanz anhand unserer Beispielrechnung

mit aktuellem Strommix gilt:

- Elektrofahrzeug: Energiebedarf und damit CO₂-Ausstoß sind bei der Herstellung hoch
- trotzdem: Elektrofahrzeug ist ab ca. 60 Tkm im Vorteil
- ein Elektrofahrzeug emittiert nach 200 Tkm Fahrstrecke um ca. 1/4 weniger CO₂
- aber: Erdgasbetrieb oder Hybridisierung könnten ebenso bis zu 1/4 an CO₂ einsparen

⇒ Die CO₂-Bilanz im Strommix muss für die Elektromobilität besser werden
⇒ mehr Erneuerbare Energien + Strategie für die Speicherung el. Energie
⇒ Alternativen können ebenso einen wichtigen Beitrag leisten

 keine Lösung: "wir fahren mit reinem Ökostrom"

⇒ das verschlechtert die Strommixbilanz aller anderen Verbraucher

6.2 CO₂-Bilanz

E-Fahrzeuge: Schnell Fahren benötigt nach wie vor (zu) viel Energie!

Rechenbeispiel für eine Strecke von 80 km Autobahn

endlose Baustelle, 80 km/h

Fahrzeit: 1 Stunde

Antriebsleistung: 10 kW

Energiebedarf: $10 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 10 \text{ kWh}$

Energieverbrauch: 12,5 kWh / 100km

Antriebswirkungsgrad 86 %

aus der Batterie:

$12,5 \text{ kWh} / 0,86 = 14,5 \text{ kWh} / 100\text{km}$

freie Fahrt, 160 km/h

Fahrzeit: ½ Stunde

Antriebsleistung: 50 kW (Luftwiderstand dominiert!)

Energiebedarf: $50 \text{ kW} \cdot \frac{1}{2} \text{ h} = 25 \text{ kWh}$

Energieverbrauch: 31,3 kWh / 100km

Antriebswirkungsgrad 92 %

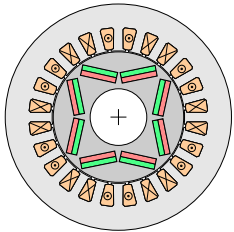
aus der Batterie:

$31,3 \text{ kWh} / 0,92 = 34,0 \text{ kWh} / 100\text{km}$

6.3 Traktionsmotoren

Maschinenvarianten

Stator:
verteilte Wicklung, klassische Drehfeldmaschinen

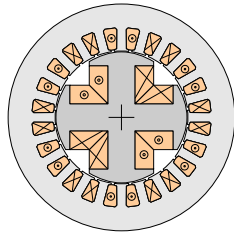


Rotor:
vergrabene
Magnete

IPMSM

- 👉 Drehmoment
- 👉 Wirkungsgrad
- 👎 NdFeB-Magnete

Einsatz:
aktuell Standard-
traktionsmotor
für E-Fahrzeuge

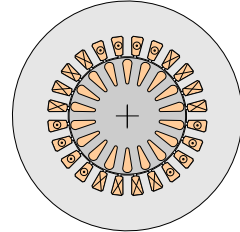


Rotor:
Schenkelpole,
elektr. Erregung

fremderregte SM

- 👎 etwas schlechter: Gewicht, Wirkungsgrad
- 👉 keine NdFeB-Magnete

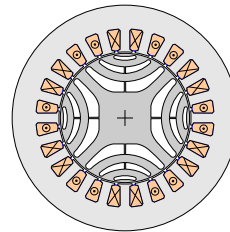
Einsatz:
Renault ZOE
BMX iX3



Rotor:
Käfigläufer
(kurzgeschlossen)

ASM

Einsatz:
Tesla Model S
u. A.

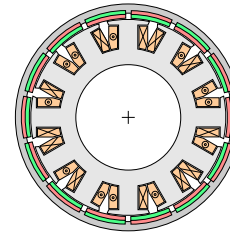


Rotor:
Flussbarrieren
(ohne Magnete)

synchrone RM

Einsatz:
Forschung

Stator:
konzentrierte Wicklung

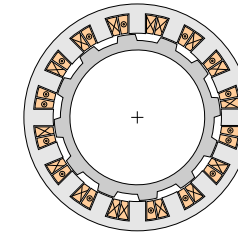


Rotor:
Permanentmagnete
hier: Außenläufer

**PMSM mit Einzel-
zahnwicklung**

- 👉 hohes spezifisches
Drehmoment
- 👎 Geräusch, Verluste,
max. Drehzahl

Einsatz:
als Starter-
Generator



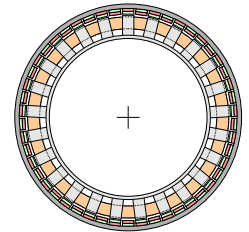
Rotor:
Zähne
hier: Innenläufer

**SRM
(geschaltete RM)**

- 👉 einfach, robust
- 👎 Geräusch,
Umrichtertopologie

Einsatz:
Forschung

Stator:
Ringwicklung



Rotor:
Permanentmagnete
hier: Außenläufer

**TFM (Transversal-
flussmaschine)**

- 👉 sehr hohes spez.
Drehmoment
- 👎 hohe Blindleistung,
max. Drehzahl

Einsatz:
Forschung

6.3 Traktionsmotoren

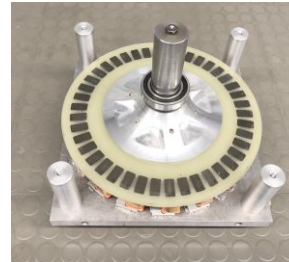
Forschung an der HS Landshut: Axialflussmaschine "AxMDM"



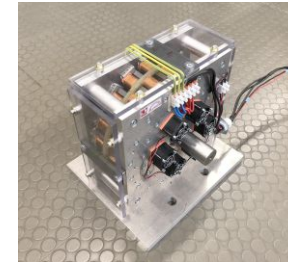
Steckspule
und U-Joch



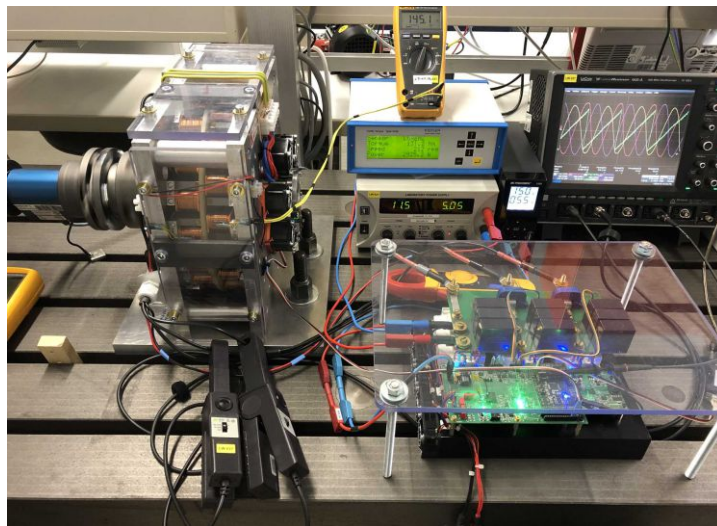
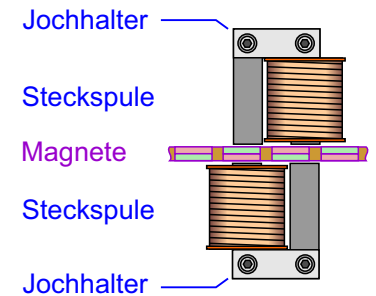
Statorgrundplatte
300 x 300mm



GFK-Rotorscheibe
mit Magneten



komplettierte
Maschine



Prototyp P2.0 auf dem Prüfstand mit Wechselrichter

- Messung: Dauerdrehmoment 130 Nm
Maximaldrehmoment 230 Nm
- Vorteil: einfache Fertigbarkeit, wenig NdFeB-Material
- Nachteil: hohe Polpaarzahl, erhöhter Scheinleistungsbedarf
- Weiterentwicklung:

Messung Prototyp P2.1, Herbst 2019: Dauer 180 Nm / max. 320 Nm
Sommer 2021: Aufbau P2.2 mit weiteren Verbesserungen

6.3 Traktionsmotoren

Fazit

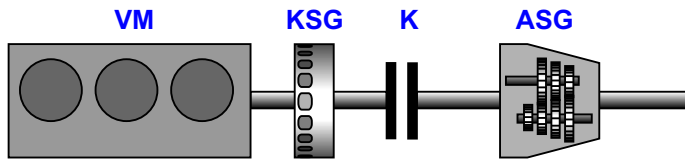
wir müssen erstmal verstehen, wie eine Drehfeldmaschine funktioniert, was es mit den unterschiedlichen Motorvarianten auf sich hat und wozu man einen Wechselrichter braucht ⇒ **Kapitel 7 bis 12.**

Wer sich intensiver mit dem Thema beschäftigen will:

- Masterverlesung Elektrische Antriebe Kapitel 10 und Vorlesung neue Antriebe (Master AuN)
- Forschungsbericht der Hochschule Landshut zur AxMDM, Feb. 2019
URL: <https://opus4.kobv.de/opus4-haw-landshut/frontdoor/index/index/docId/56>
- U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy,
Annual Progress Reports: Benchmarking Projects, Teardown Assesments (2016: BMW i3)
- Fraunhofer ISI: Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland
- Gerfried Jungmeier et.al.: Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch
in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen, Bericht Johanneum Research, Sept. 2019

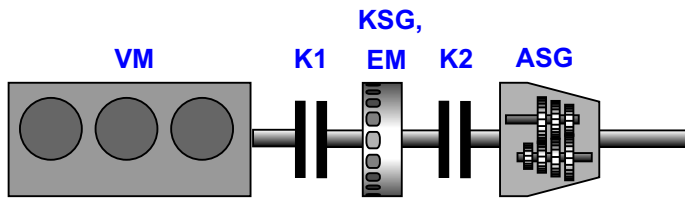
6.4 Hybridfahrzeuge

Antriebsstrangtopologien

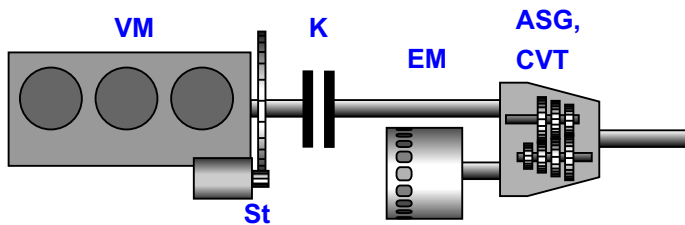


Fahrzeug mit Starter-Generator

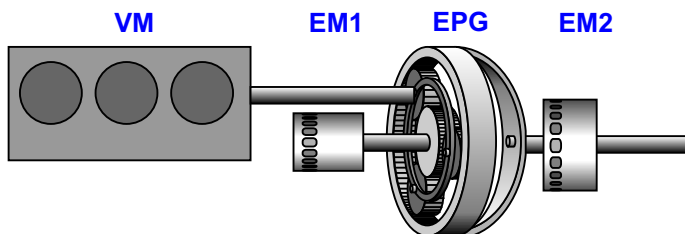
Bremsenergierekuperation und elektrisches Fahren eingeschränkt bzw. nicht möglich



Parallelhybrid



Parallelhybrid



leistungsverzweigter Hybrid (Toyota Prius)

Legende

VM: Verbrennungsmotor

K: Kupplung

St: Starter

KSG: Kurbelwellenstartergenerator, 3..20kW

EM: E-Maschine, typ. 20..70kW

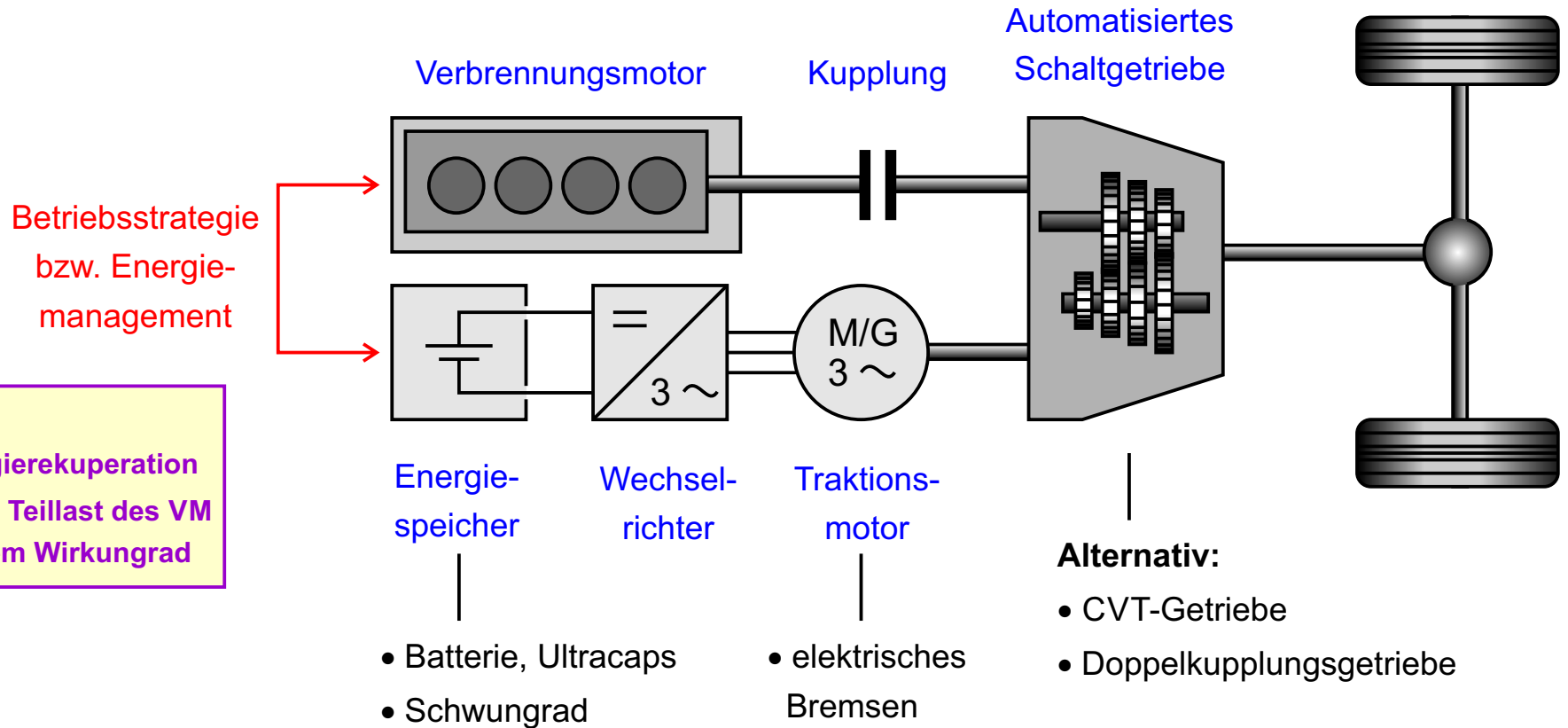
ASG: Automatisiertes Schaltgetriebe

CVT: Continuously Variable Transmission

EPG: Elektrisch gesteuertes Planetengetriebe (Power Split Drive)

6.4 Hybridfahrzeuge

Parallelhybrid



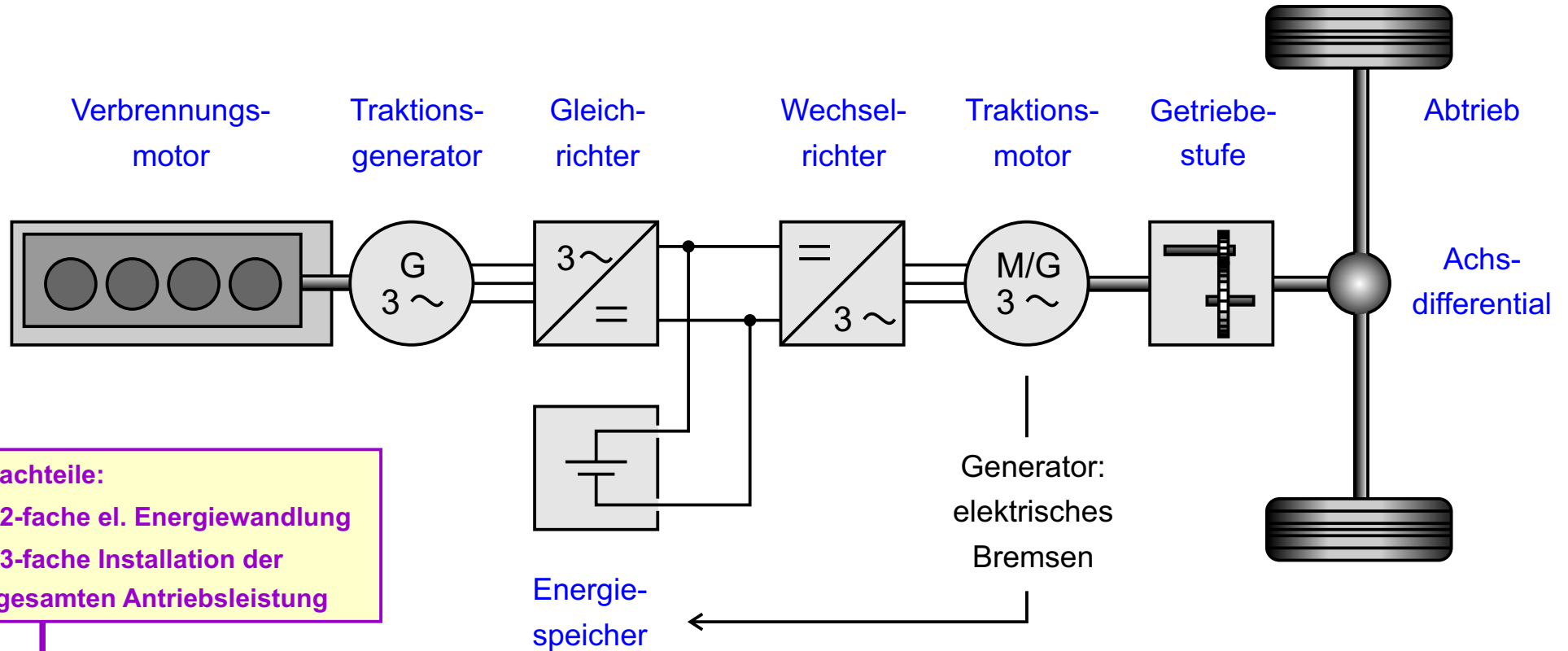
Eine Verbrauchsreduktion ergibt sich aus rekuperativem Bremsen und der Vermeidung des extremen Teillastbereiches des VM. Bei vorausschauender (!) Fahrweise kann ein Hybridantrieb den Kraftstoffverbrauch um 10..30% reduzieren, vor allem im Stadtverkehr.



Allerdings: Eine Überdimensionierung des E-Motors, zu schwere Fahrzeuge und eine "sportliche" Fahrweise verringern das Einsparpotential! Auch führt es zu einer schlechten CO₂-Bilanz, wenn man die Batterie eines Pluginhybrids nicht über die Steckdose, sondern nur über den VM auflädt. Das alles sind keine neuen Erkenntnisse, dass weiß man schon seit den 1990er-Jahren. Prominentes Beispiel: Audi Duo

6.4 Hybridfahrzeuge

Serienhybrid



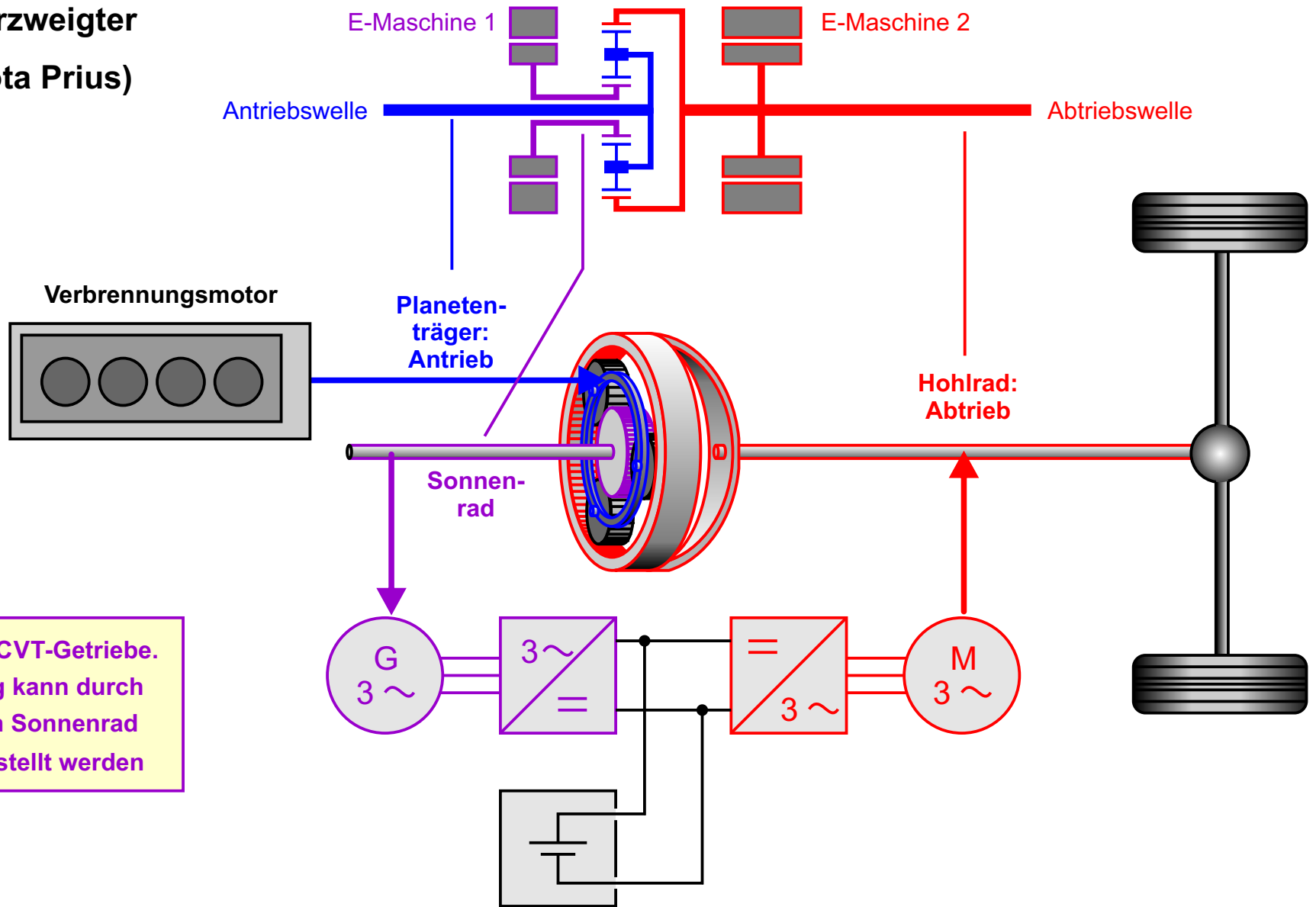
Nachteile:

- 2-fache el. Energiewandlung
- 3-fache Installation der gesamten Antriebsleistung

aber: bei größeren Antriebsleistungen, die technisch aufwändiger "ans Rad zu bringen sind" relativiert sich das, z.B. bei Dieselelektrischen Lokomotiven / Triebzügen oder sehr großen Baumaschinen / im Bergbau

6.4 Hybridfahrzeuge

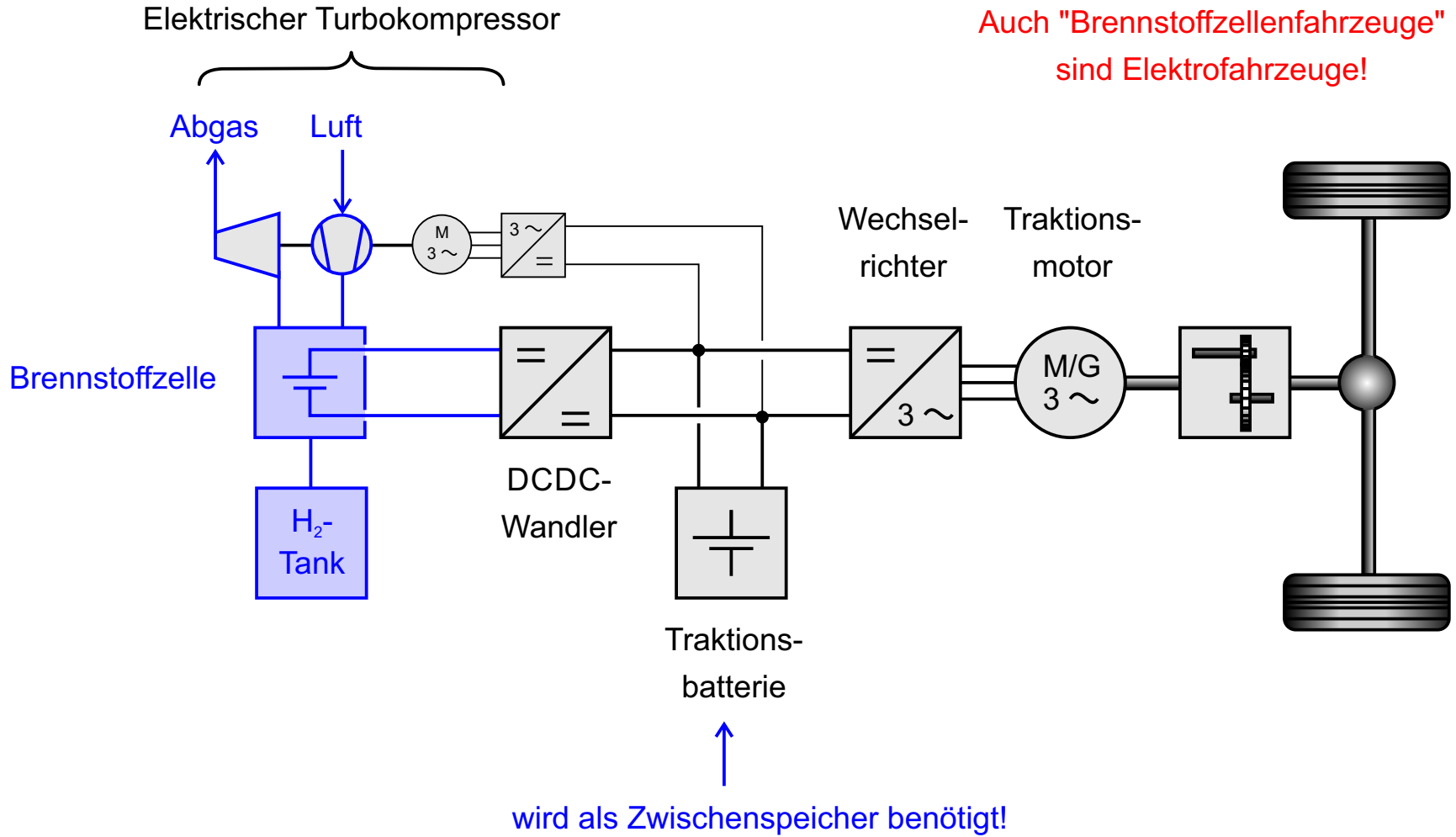
Leistungsverzweigter Hybrid (Toyota Prius)



Grundidee: CVT-Getriebe.
 Übersetzung kann durch
 Bremsen am Sonnenrad
 bis $i = \infty$ verstellt werden

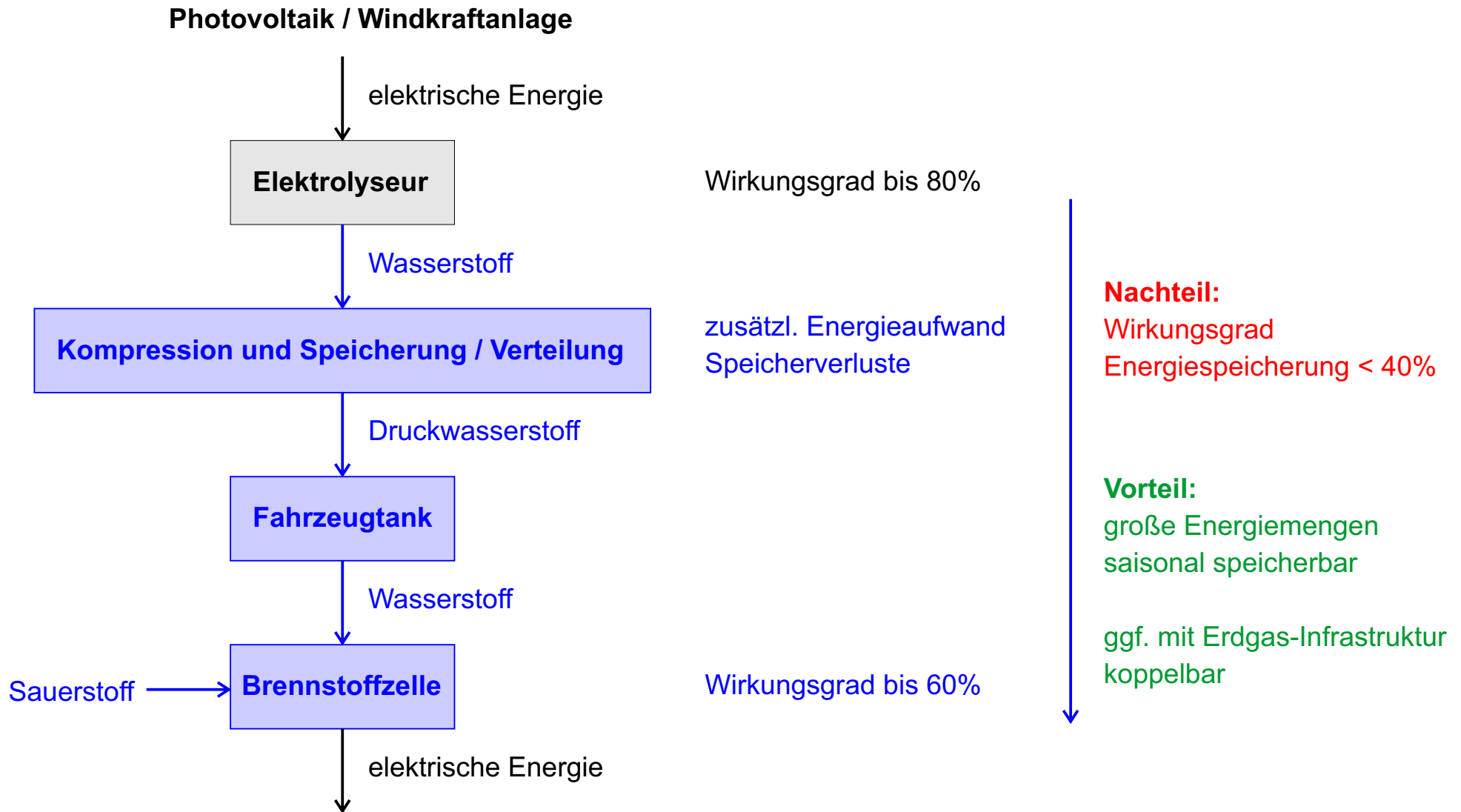
6.5 Brennstoffzellenfahrzeuge

Antriebsstrangtopologie



6.5 Brennstoffzellenfahrzeuge

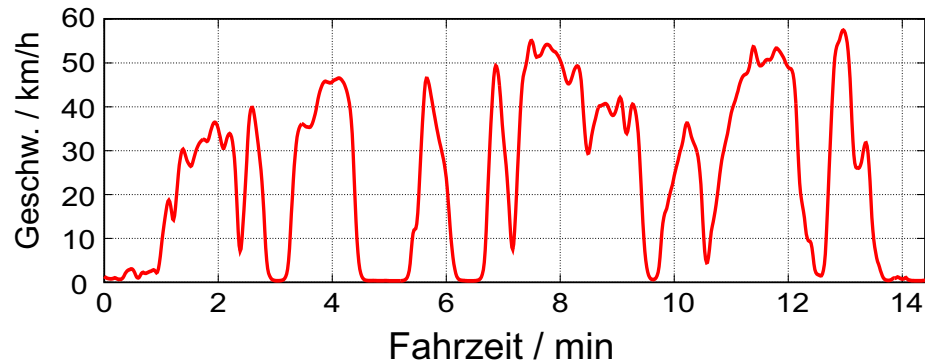
Problematik: Energieumwandlungskette



6.6 Human Powered Vehicles

Stadtverkehr mit identischem Ziel

Auto



Gewicht Fahrzeug + Fahrer: 1285 kg

Strecke: 6,0 km (B299 / Niedermayerstr.)

Dauer: 14,4 min

Geschw.: 33 km/h Durchschnitt

Leistung: 20 kW Peak (beim Beschleunigen)

Energie: 0,49 kWh am Rad

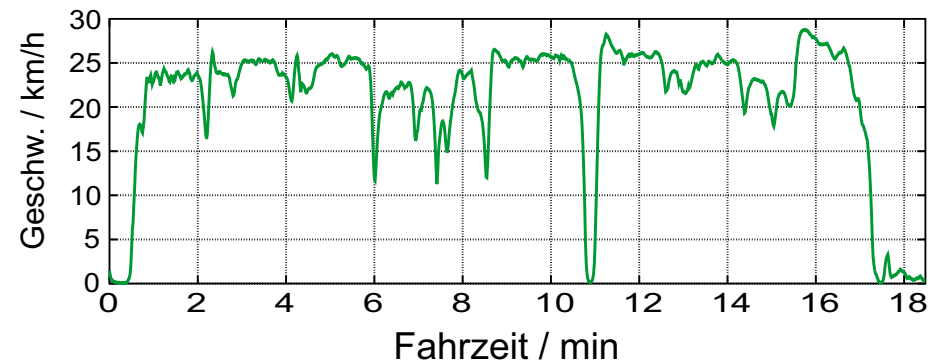
Verbrauch: ca. 0,5 l Sprit

x 12,9

x 1,3

x 16,3

Fahrrad



Gewicht Fahrzeug + Fahrer: 100 kg

Strecke: 6,5 km (Flutmulde / Radweg zur FH)

Dauer: 18,5 min

Geschw.: 23 km/h Durchschnitt

Leistung: 500 W Peak (beim Beschleunigen)

Energie: 0,03 kWh am Rad

Verbrauch: 20 g Fett

☹️ 50 Fahrten mit leerem Magen ≈ 1kg Bauchspeck

6.7 Fachvokabular

Ankerwicklung	armature winding	Asynchronmaschine	induction motor
Drehstrom	three phase current	Erregung	excitation
Feldschwächbereich	field weakening range	Gleichstrom	direct current
Gleichstrommasch.	DC motor	Gleichrichter	rectifier
Grunddrehzahlber.	basic speed range	Nenndrehmoment	nominal torque
Nenndrehzahl	nominal speed	Nennleistung	rated output (power)
Regelung	feedback control	Reihenschlussmotor	series wound motor
Reduziergetriebe	reduction gear, reducer	Schenkelpol	salient pole
Spannungsgleichung	voltage balance equation	Synchronmaschine	synchronous motor
(Vor-) Steuerung	feedforward control	Wechselrichter	inverter
BEV	Battery Electric Vehicle	PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
BLDC	Brushless DC	PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
EC	Electronically Commutated	IPMSM	Interior Permanent Magnet SM
FEM	Finite Element Method	SRM	Switched Reluctance Motor
FOC	Field Oriented Control	SCR	Silicon Controlled Rectifier
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor		Selective Catalytic Reduction (von NO _x)
Mosfet	Metal oxide semiconductor field effect transistor	PLL	Phase Locked Loop
		VFD	Variable Frequency Drive
		TFM	Transverse Flux Motor