

Grundlagen elektrische Antriebe

Bachelor EIT 6. Semester

Kapitel 6: Elektrofahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier

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:

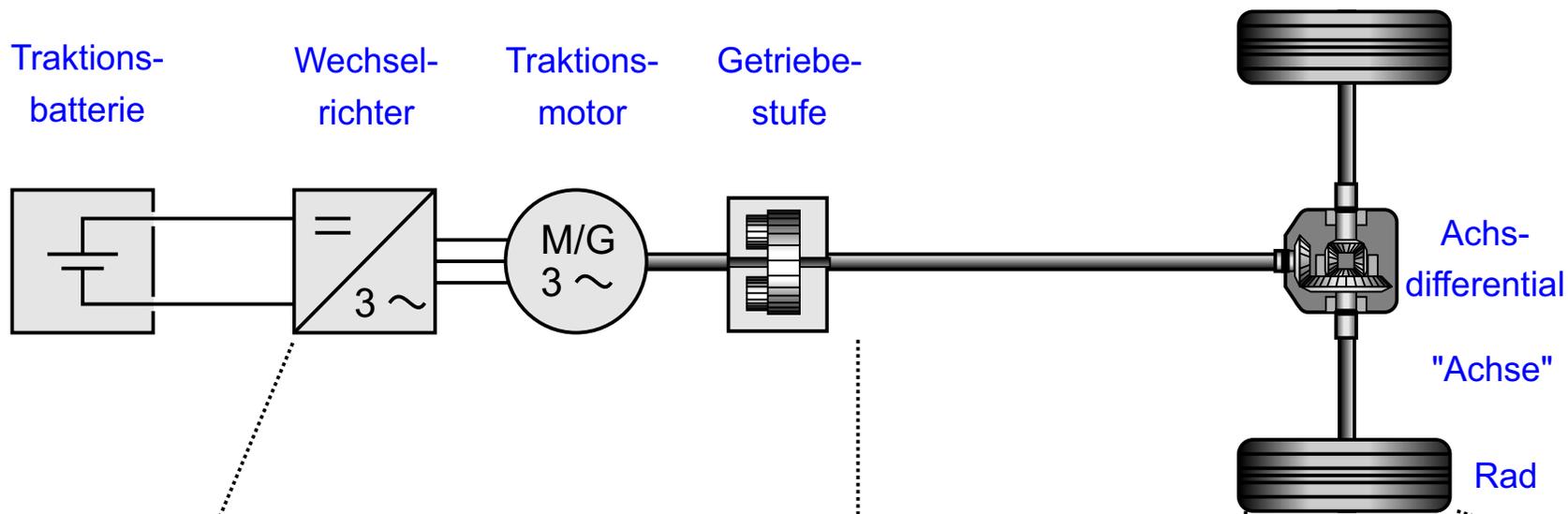
- fremderregte SM
- PMSM, MDM, BLDC-Motor

Inhalt

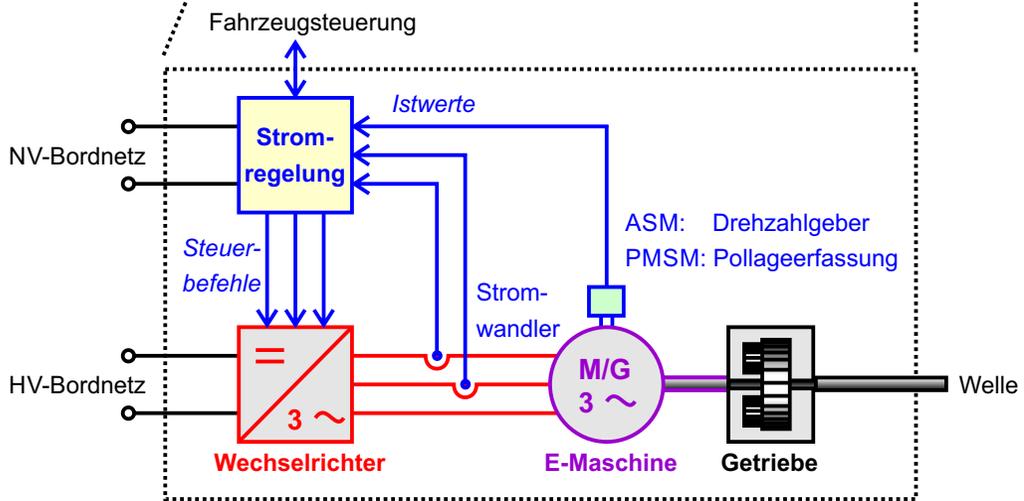
Kapitel 6: Elektrofahrzeuge

- 6.1 Systemebene
- 6.2 CO₂-Bilanzen
- 6.3 Energieerzeugung
- 6.4 Traktionsmotoren
- 6.5 Hybridfahrzeuge
- 6.6 Brennstoffzellenfahrzeuge
- 6.7 Human Powered Vehicles
- 6.8 Diverses

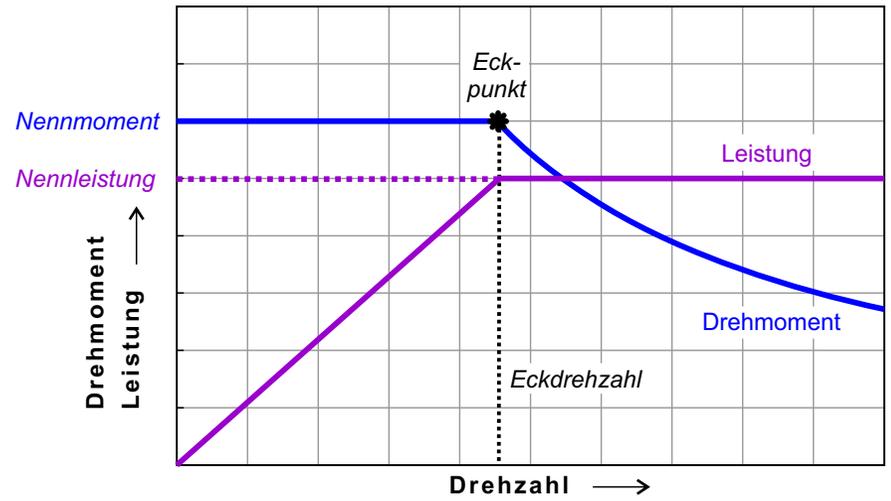
6.1 Systemebene



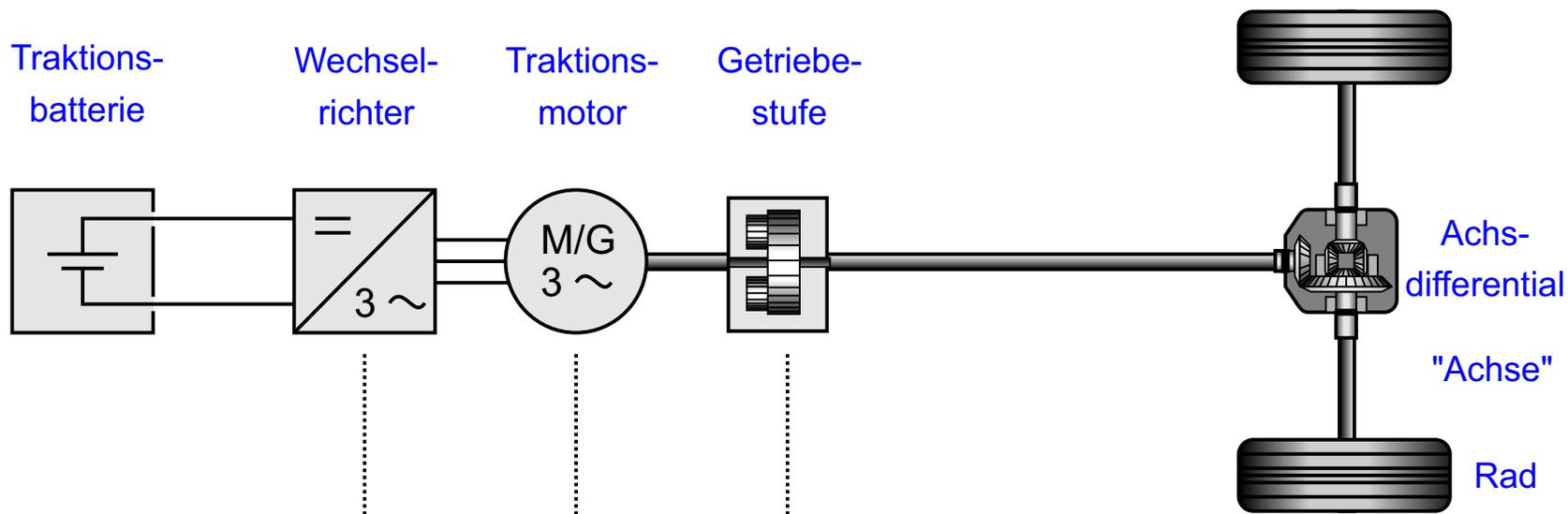
Elektrisches Antriebssystem



Drehmoment / Leistung



6.1 Systemebene



Zyklusverluste:	8 %	12 %	6 %	} Fahrzeugantriebstrang gesamt: 74 % Wirkungsgrad im Fahrbetrieb
Gewicht:	10 kg	32 kg	18,6 kg	

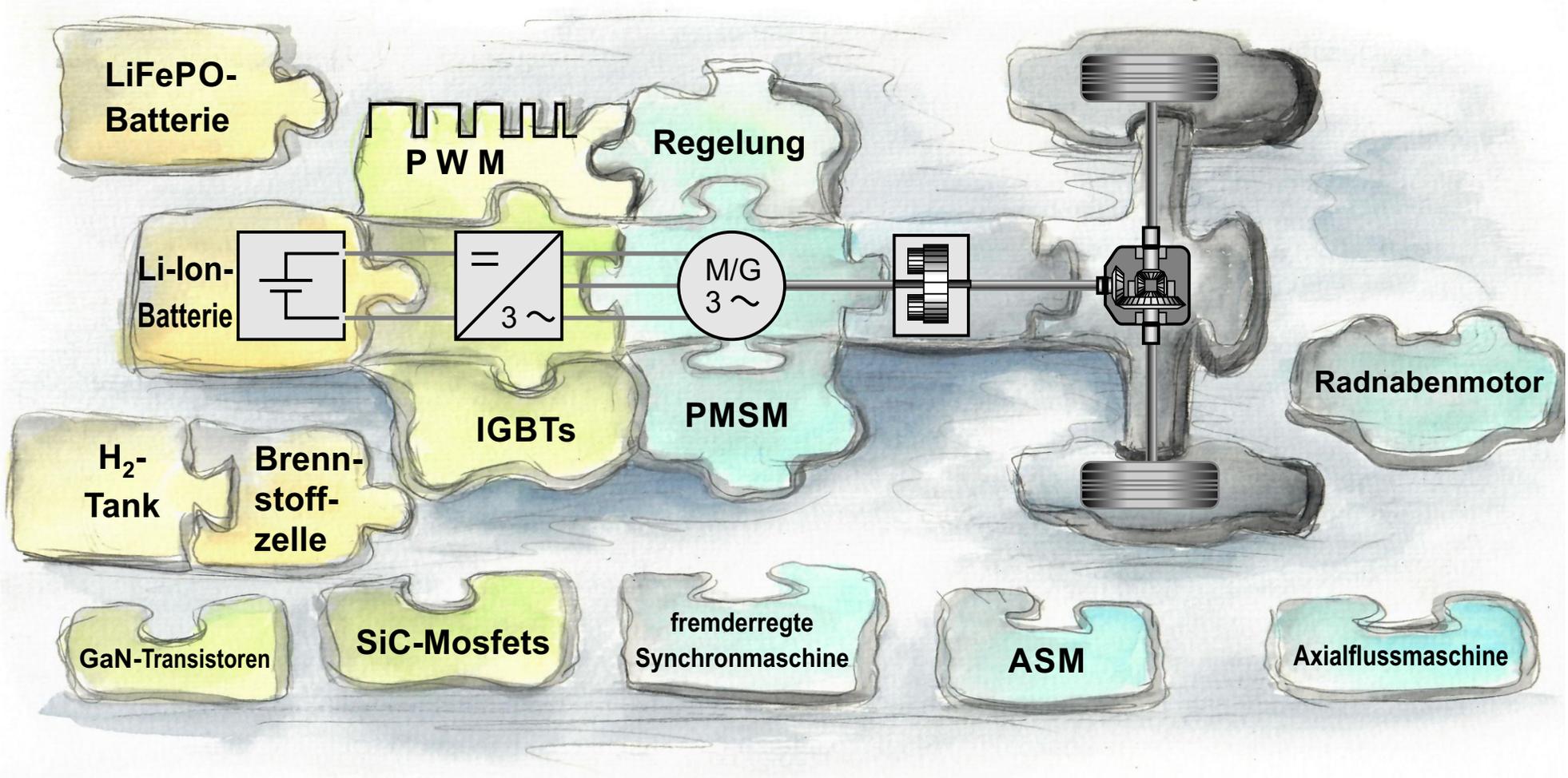
Wirkungsgrade und Komponentengewicht am Beispiel eines Kleinwagenantriebstranges

Und welchen Wirkungsgrad hat die Energiespeicherung in der Batterie inklusive On-Board-Charger?
Recherchieren Sie mal...

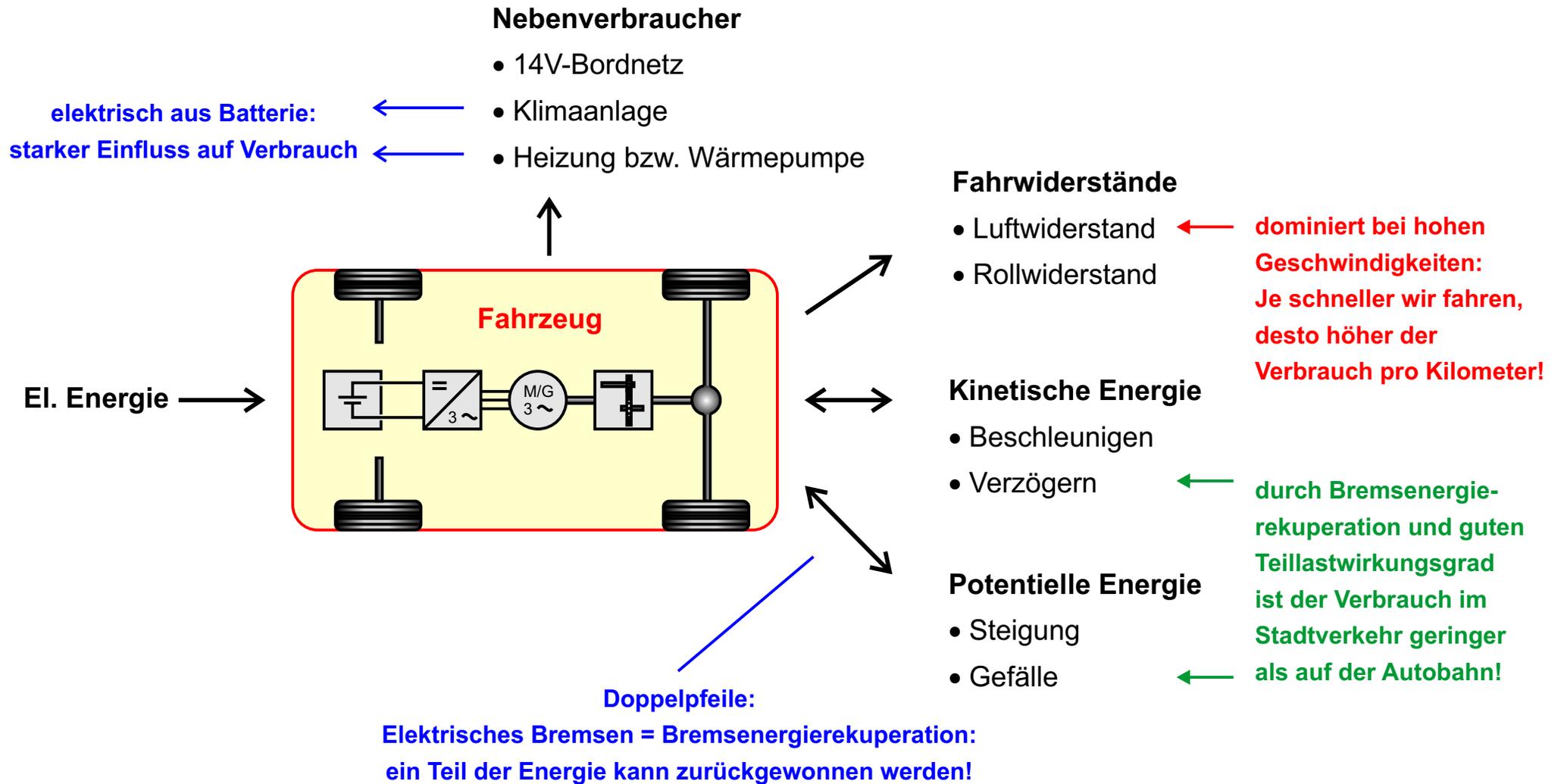
Quelle Gewicht: Dissertation Uwe Reichert, Eine Methode zur Auswahl von Standgetrieben für Antriebsstränge ...

$$\eta_{E\text{-Fahrzeug}} = \eta_{\text{Antriebstrang}} \cdot \eta_{\text{Batterie}} = \dots$$

6.1 Systemebene Baustellen und Schlagworte



6.1 Systemebene Energiefluss im Elektrofahrzeug

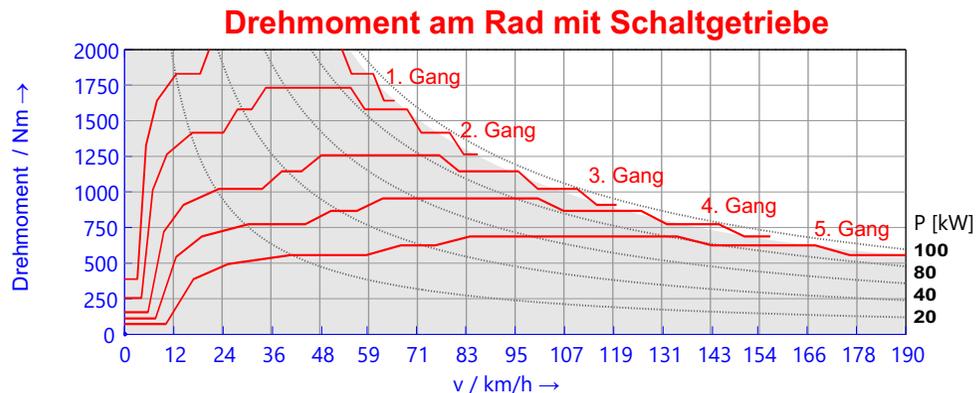
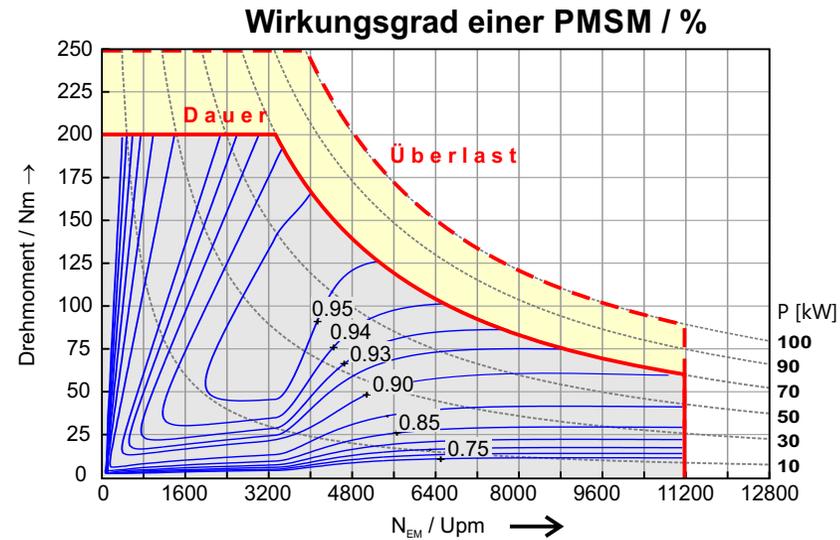
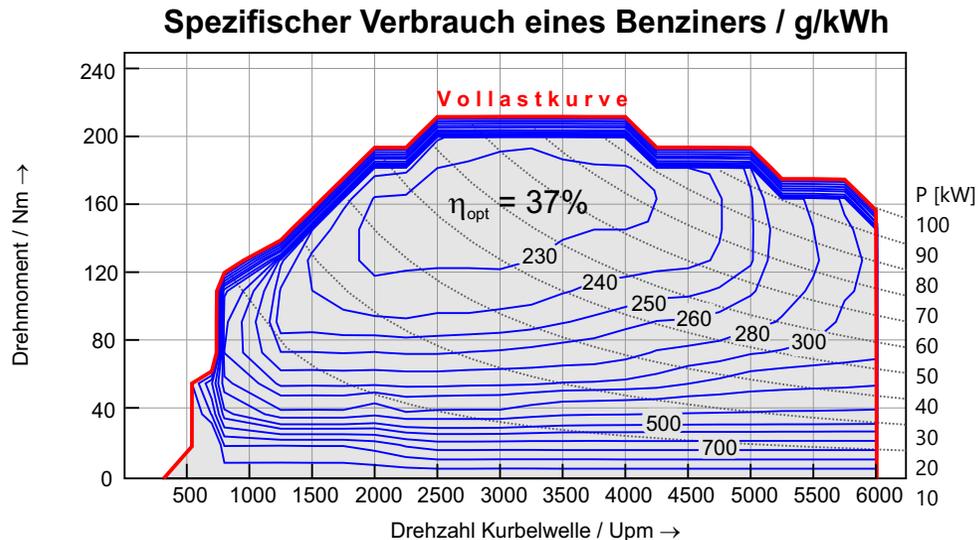


6.1 Systemebene

Gegenüberstellung Verbrennungsmotor — Elektroantrieb

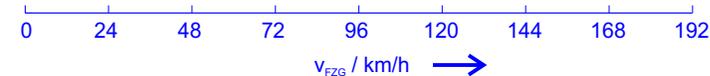
Verbrennungsmotor: Wärmekraftmaschine

Elektromaschine: Energiewandler



Drehmoment am Rad mit fester Getriebestufe

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



6.2 CO₂-Bilanzen

Gegenüberstellung Verbrennungsmotor — Elektroantrieb

Kfz mit Verbrennungsmotor (Beispiel)

Spritverbrauch Benziner: 6,5 l/100km = 58 kWh / 100 km

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)

Energieverbrauch: 20 kWh / 100 km = **um den Faktor 3 besser!**

CO₂ aus Strommix: 370 g CO₂ / kWh

CO₂-Emissionen: **74 g / km**

aber:

- die Herstellung einer 50 kWh - Batterie emittiert ca. 5 t CO₂
- die CO₂-Bilanz hängt direkt vom Strommix ab

Braunkohle: 1150 g CO₂ / kWh Wirkungsgrade 35..40 %

Steinkohle: 800 g CO₂ / kWh Wirkungsgrade 40..45 %

Strommix: 572 g CO₂ / kWh Deutschland, 2013

370 g CO₂ / kWh Deutschland, 2023

Gaskraftwerk: 450 g CO₂ / kWh GuD mit Wirkungsgrad 55 %

330 g CO₂ / kWh Irsching Block 4, $\eta_{opt} = 60,75\%$

Photovoltaik: ca. 50 g CO₂ / kWh Energy-Payback-Time 1..1.3 Jahre

Windkraft: 12 / 17 g CO₂ / kWh Offshore / Onshore

Kernkraftwerk: 12 g CO₂ / kWh

Daten für die Kraftwerkstypen: www.tech-for-future.de mit unterschiedlichen Quellen. Aufwand für Speicherung bei PV und Wind nicht berücksichtigt.

Schnell Fahren?

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: $12,5 \text{ kWh} / 100 \text{ km}$

Antriebswirkungsgrad 86 %

aus der Batterie:

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

freie Fahrt, 160 km/h

Fahrzeit: $\frac{1}{2}$ Stunde

Antriebsleistung: 50 kW (Luftwiderstand dominiert!)

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

Energieverbrauch: $31,3 \text{ kWh} / 100 \text{ km}$

Antriebswirkungsgrad 92 %

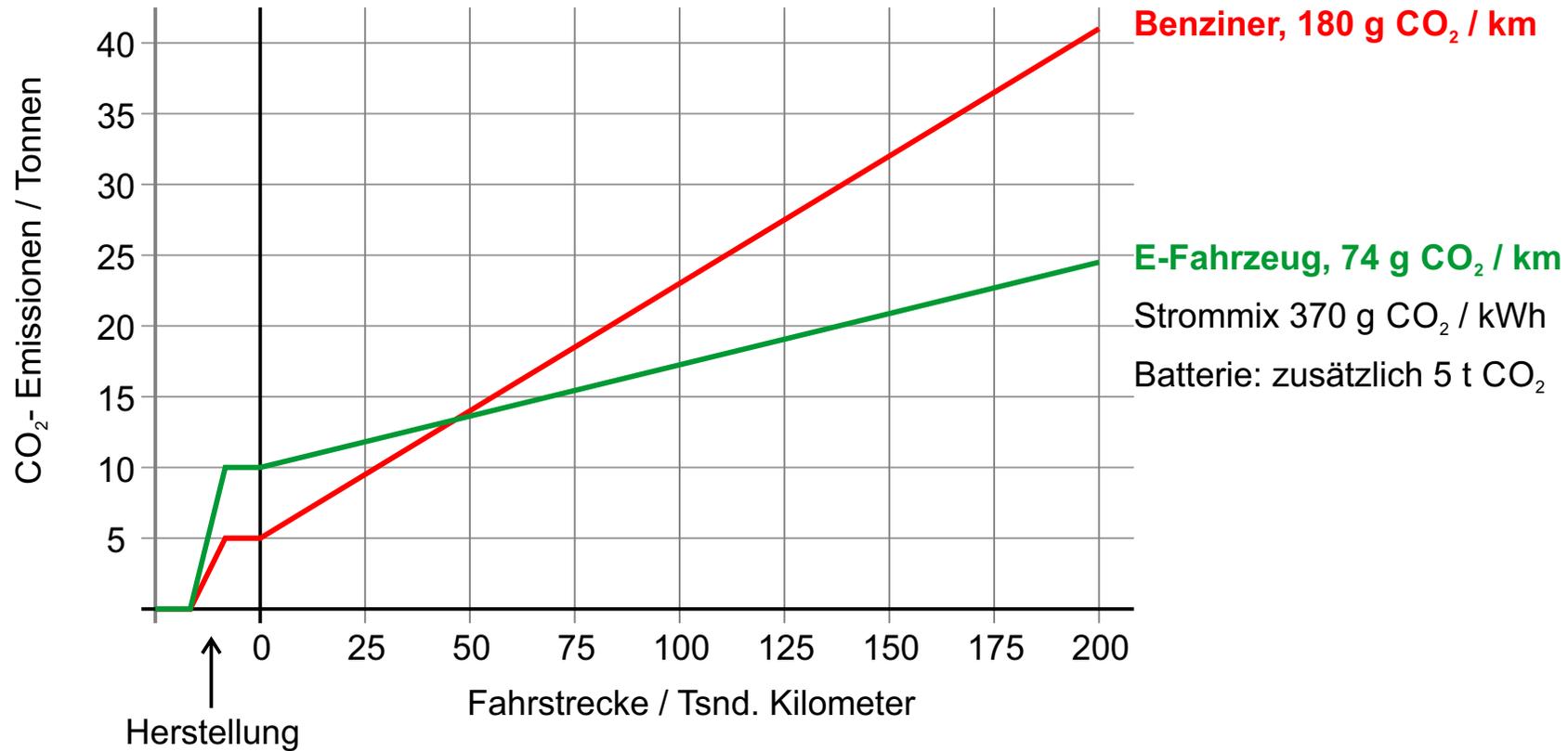
aus der Batterie:

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

6.2 CO₂-Bilanzen

Gegenüberstellung Verbrennungsmotor — Elektroantrieb

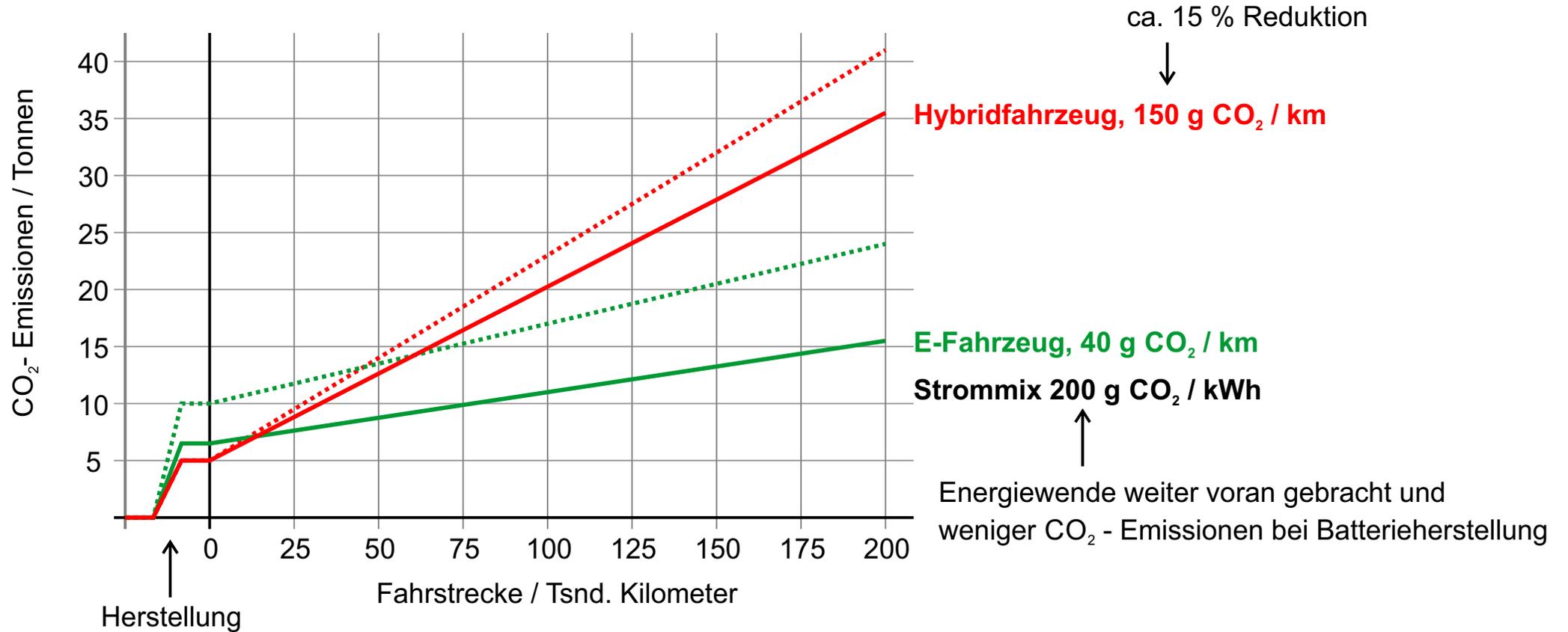
Iststand



6.2 CO₂-Bilanzen

Gegenüberstellung Verbrennungsmotor — Elektroantrieb

mittelfristiges Potential



CO₂ - Bilanz anhand unserer Beispielrechnung

- Elektrofahrzeug: Energiebedarf und CO₂-Ausstoß sind bei der Herstellung (noch) höher als bei herkömmlichen Kfz
- trotzdem: ein Elektrofahrzeug ist ab ca. 50.000 km im Vorteil
- Ein Elektrofahrzeug verursacht aktuell nach 200.000 km Fahrstrecke ca. 40% weniger CO₂ als ein konventionelles Kfz
- Aber: wir sind von einer CO₂-freien Mobilität noch weit entfernt

⇒ CO₂-Bilanz Strommix muss für die Elektromobilität viel besser werden
⇒ mehr Erneuerbare Energien + Strategie für die Speicherung el. Energie
⇒ Alternativen könnten übergangsweise einen wichtigen Beitrag leisten



- keine Lösung: "wir fahren mit reinem Ökostrom" ⇒ verschlechtert die Strommixbilanz aller anderen



- je größer und schwerer ein Fahrzeug, desto höher sein Energieverbrauch, egal wie es angetrieben wird

- je schneller wir fahren, desto höher ist der Energieverbrauch eines Fahrzeuges: Luftwiderstand!

- auch erneuerbare Energien wird es nie im Überfluss geben. Dazu ist die Erzeugung zu aufwändig!

6.3 Energieerzeugung

Elektrifizierung der gesamten Fahrzeugflotte, geht das überhaupt?

Pkw-Fahrleistung Deutschland:	582,4 Mrd. km	2021
mittlerer Energieverbrauch:	20 kWh / 100km	
η-Kette Batterie, Laden und Netz:	85%	
Energieverbrauch Pkw-Fahrleistung:	137 TWh	

Lkw-Fahrleistung Deutschland:	68 Mrd. km	2021
Verbrauch E-FORCE (ETHZ-Studie):	80 kWh/ 100km	18 Tonner
Verbrauch MAN E-Truck, Langstrecke:	bis 120 kWh/ 100km	40 Tonner
Wirkungsgrad Batterie, Laden und Netz:	85%	
Energieverbrauch Lkw-Fahrleistung:	80 TWh	

} im Mittel: 100 kWh / 100km angenommen

Summe: **217 TWh** 1 TWh = 1 Mrd. kWh, "Tera" = 10¹²

Nettostromverbrauch Deutschland:	506 TWh	2021
Erzeugung Erneuerbare Energien:	237 TWh	Wind 118 TWh, PV 49 TWh, BM 51 TWh, WK 19 TWh
Nettostromverbr. + Fahrzeugflotte:	723 TWh	das wäre das 3-fache der 2021 verfügbaren Erneuerbaren

übrigens: der Heizenergieverbrauch der Haushalte in D inkl. Warmwasser lag 2020 bei ca. 600 TWh.

Zusätzlicher Energiebedarf bei kompletter Umstellung auf Wärmepumpe mit JAZ = 3: 200 TWh elektrisch.

6.3 Energieerzeugung

Grunddaten zur Elektrischen Energieerzeugung

Gesamter Primärenergieverbrauch Deutschland 2023:

$$E_{\text{Prim}} = 10791 \text{ PJ} = 10,791 \cdot 10^{18} \text{ J} = 2997,5 \cdot 10^{12} \text{ kWh} = 2997,5 \text{ Mrd. kWh} = 2997,5 \text{ TWh} \text{ (2021: 3.387 TWh)}$$

$$T = \text{Tera} = 10^{12} \quad P = \text{Peta} = 10^{15} \quad 1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

davon elektrische Energieerzeugung Deutschland 2023:

Nettostromerzeugung: $E_{\text{SE}} = 448,5 \text{ TWh}$ mit 370 g/kWh CO_2

Nettostromverbrauch: $E_{\text{SV}} = 456,8 \text{ TWh}$ Stromimport (Saldo): $11,7 \text{ TWh}$

davon erneuerbar: $E_{\text{SE}} = 251,2 \text{ TWh} = 56\% \text{ von } E_{\text{SE}}$ Quelle = Bundesnetzagentur

davon Erneuerbar erzeugte Elektrische Energie (EE) 2023:

Quelle	Erzeugung	Installiert	Nutzungsgrad
Photovoltaik:	52,4 TWh	82,2 GWp	7,3 %
Wind, onshore:	116,2 TWh	61,0 GWp	21,7 %
Wind, offshore:	23,5 TWh	8,5 GWp	31,6 %
Biomasse:	41,8 TWh	9,0 GWp	53,0 %
Wasserkraft:	19,5 TWh	4,9 GWp	45,4 %

Die Summe ergibt nicht exakt den oben angegebenen Wert $E_{\text{SE}} = 251,2 \text{ TWh}$, da Energy Charts als Quelle verwendet wurde. Zwischen den Quellen bestehen teils deutliche Unterschiede.

Nutzungsgrad = Vollaststunden der Anlage pro Jahr / Stunden pro Jahr
 = Verhältnis Stromerzeugung pro Jahr zu installierter Leistung $\times 8760\text{h}$
 = Verhältnis mittlere Leistung zu installierter Leistung

6.3 Energieerzeugung

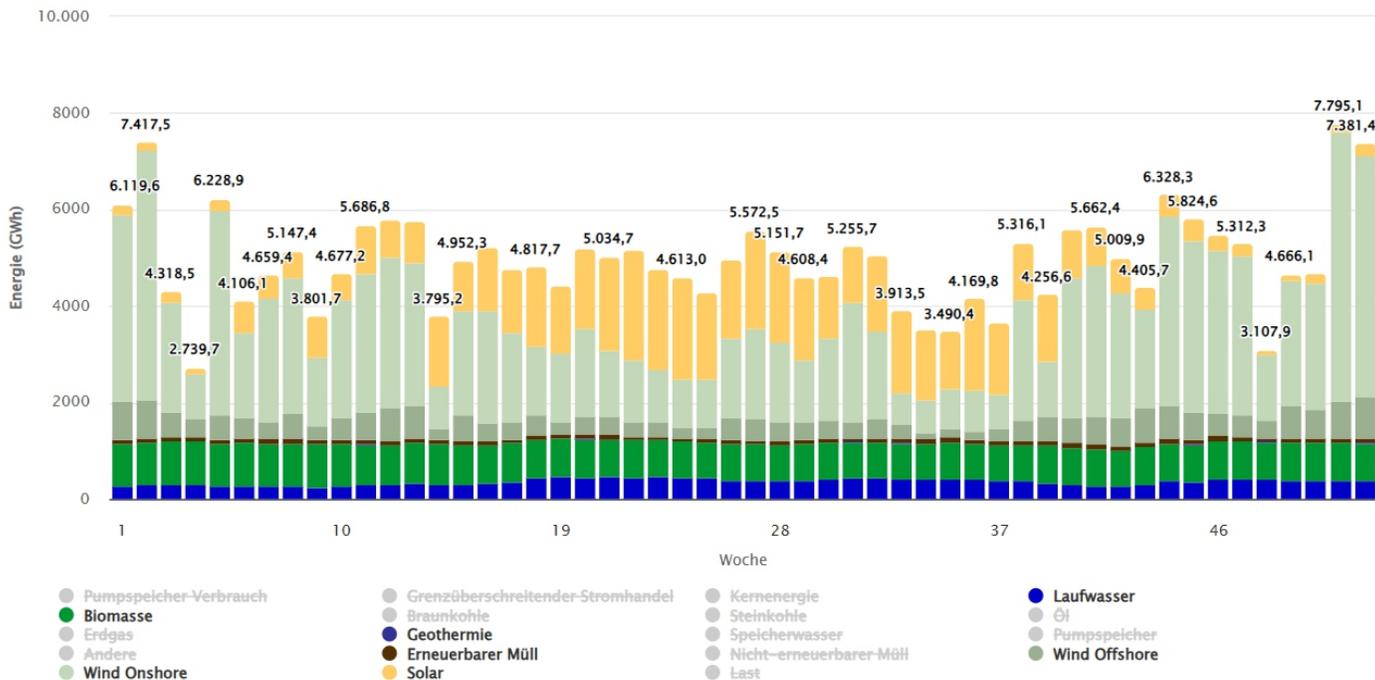
Nur Erneuerbare - wird das machbar sein?

Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien 2023

Quelle: <https://www.energy-charts.info> → Energie → Säulendiagramme zur Stromerzeugung

Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland 2023

Energetisch korrigierte Werte



Fazit:

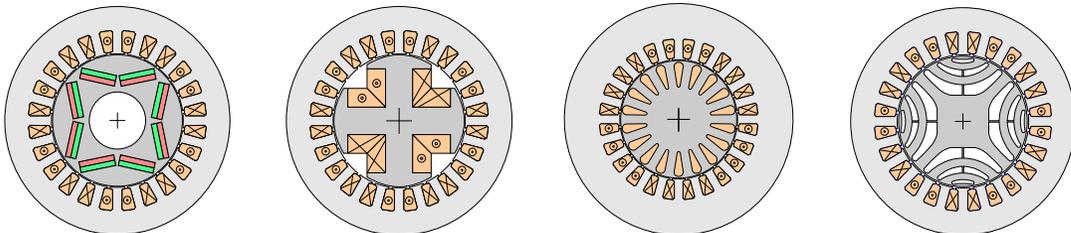
- Wind und Solar ergänzen sich gut über Sommer/Winter
- dennoch: Erzeugung stark volatil!
- Gaskraftwerke als Backup nötig
- große elektr. Energiespeicher?
- Wasserstoff als Energieträger?

Energy-Charts.info - letztes Update: 29.02.2024, 23:42 MEZ

6.4 Traktionsmotoren

Maschinenvarianten

Stator:
verteilte Wicklung, klassische Drehfeldmaschinen



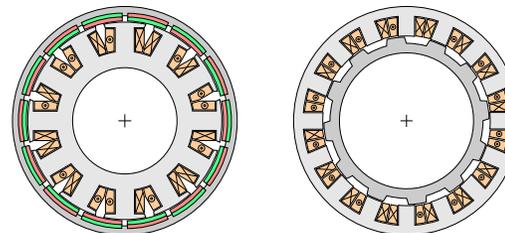
Rotor:
vergrabene Magnete
Schenkelpole, elektr. Erregung
Käfigläufer (kurzgeschlossen)
Flussbarrieren (ohne Magnete)

IPMSM **fremderregte SM** **ASM** **synchrone RM**

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

Einsatz:
aktuell Standardtraktionsmotor für E-Fahrzeuge
Renault ZOE
BMW-Fahrzeuge
Tesla Model S
Audi
u. A.
Forschung

Stator:
konzentrierte Wicklung



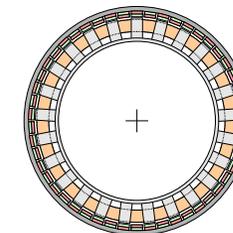
Rotor:
Permanentmagnete hier: Außenläufer
Zähne hier: Innenläufer

PMSM mit Einzelzahnwicklung **SRM (geschaltete RM)**

- 👉 hohes spezifisches Drehmoment
- 👉 Geräusch, Verluste, max. Drehzahl
- 👉 einfach, robust
- 👉 Geräusch, Umrichtertopologie

Einsatz:
als Starter-Generator
Forschung

Stator:
Ringwicklung



Rotor:
Permanentmagnete hier: Außenläufer

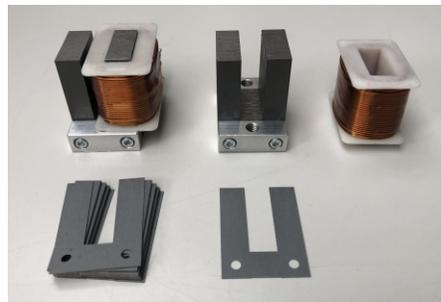
TFM (Transversalflussmaschine)

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

Einsatz:
Forschung

6.4 Traktionsmotoren

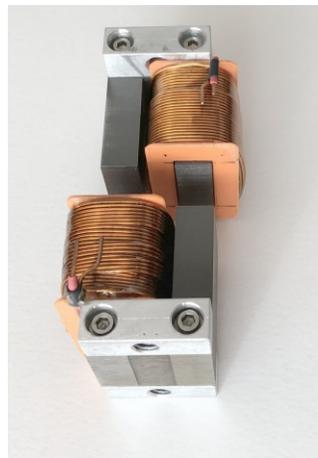
Forschung an der HS Landshut: Axialflussmaschine "AxMDM"



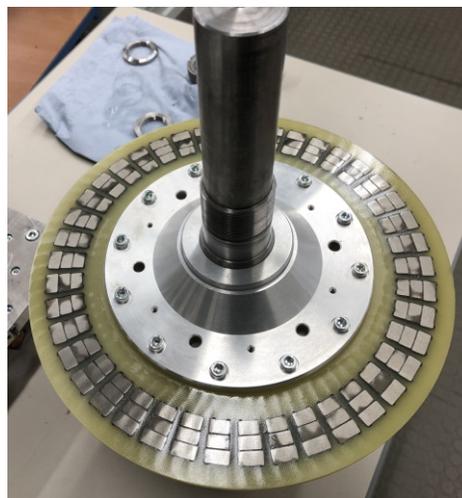
Joche aus UI30-Kernblechen
mit Steckspulen



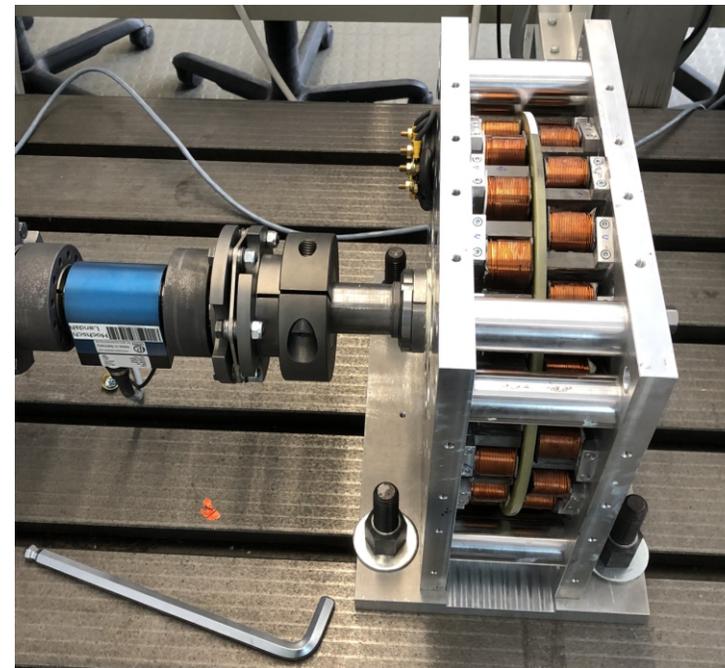
Statorhälfte mit aufgeschraubten U-Jochen



Jochpaar eines Stranges



Rotor: GFK-Scheibe mit
Permanentmagneten



komplette Maschine bei Montage auf dem Prüfstand

6.4 Traktionsmotoren

Forschung an der HS Landshut: Prüfstand im Labor

Außenläufermaschine

$M_{\max} = 425 \text{ Nm}$

Eisen: 9,3 kg

Kupfer: 3,0 kg

Magnete: 1,6 kg

Axialflussmaschine

$M_{\max} = 335 \text{ Nm}$

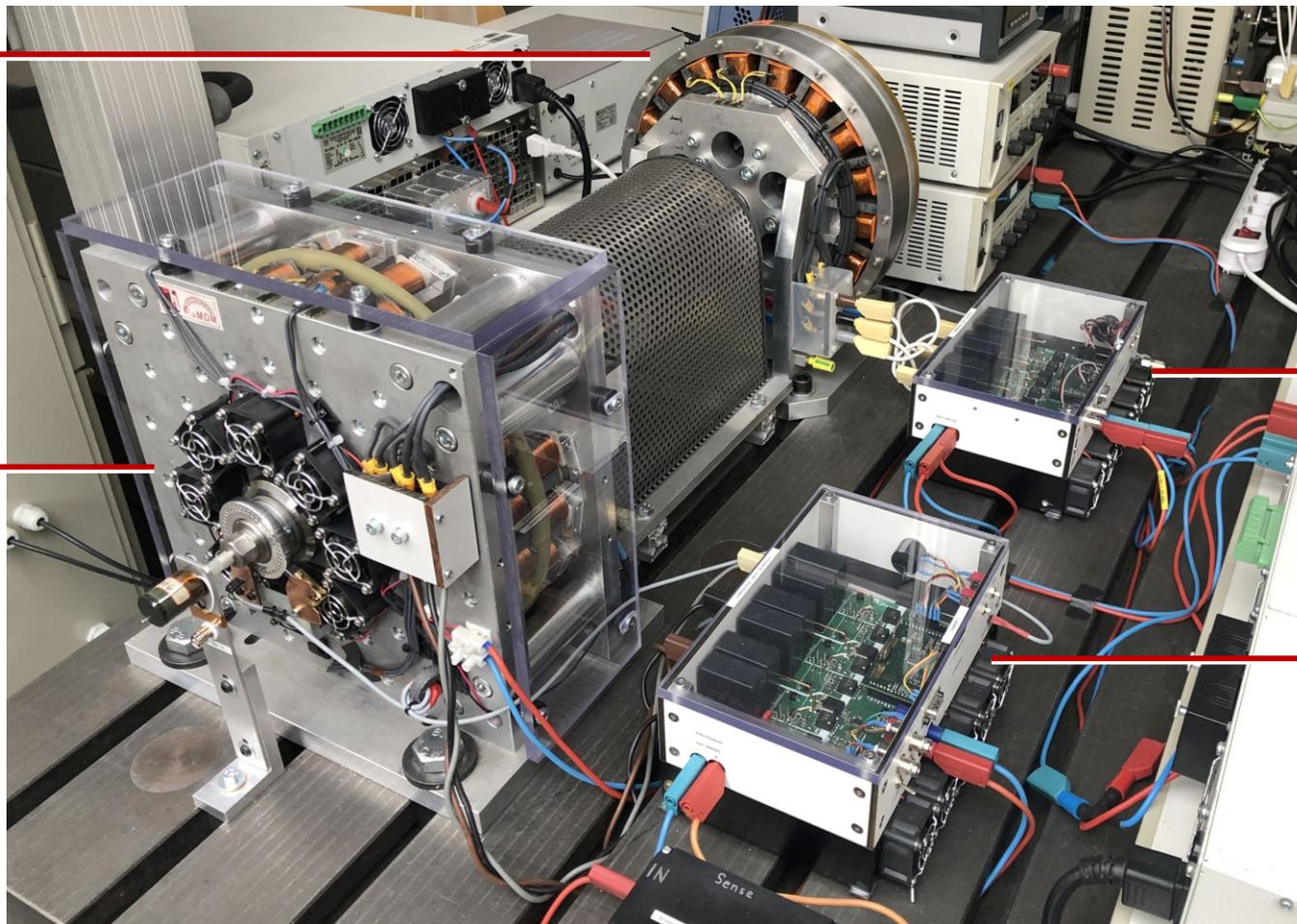
Eisen: 5,7 kg

Kupfer: 3,7 kg

Magnete: 0,7 kg

beide:

$M_N = 180 \text{ Nm}$



SiC-Wechsel-
richter 1

SiC-Wechsel-
richter 2

Mehr dazu: Praktikum Master Elektrische Antriebe Versuch 3

6.4 Traktionsmotoren

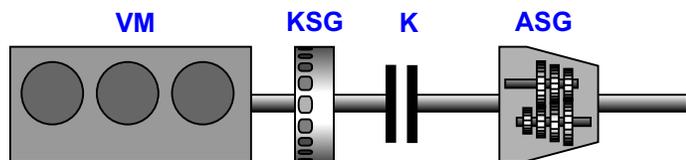
Fazit

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:

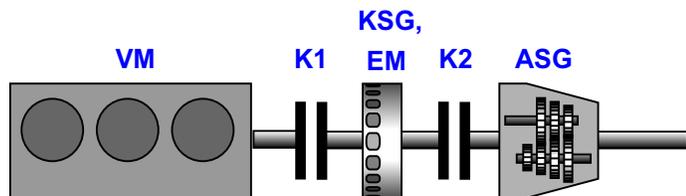
- Masterverlesung Elektrische Antriebe Kapitel 10 und Vorlesung neue Antriebe (Master AuN)
- Forschungsbericht der Hochschule Landshut zur AxMDM, Feb. 2019
URL: <https://opus4.kobv.de/opus4-haw-landshut/frontdoor/index/index/docId/56>
- U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable 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

6.5 Hybridfahrzeuge Antriebsstrangtopologien

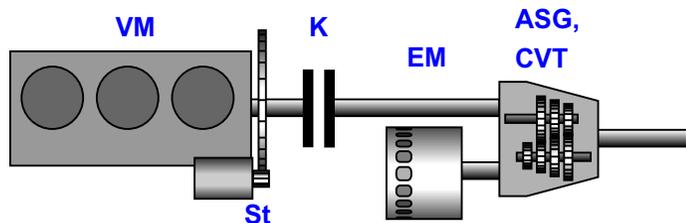


Fahrzeug mit
Starter-Generator

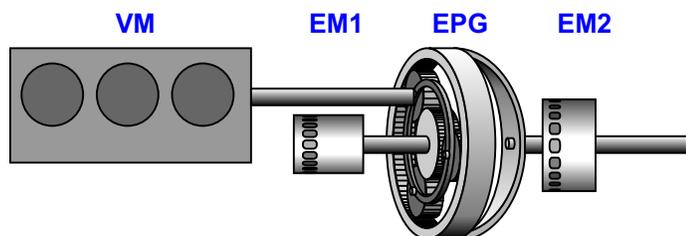
← Bremsenergierekuperation und
elektrisches Fahren eingeschränkt
bzw. nicht möglich



Parallelhybrid



Parallelhybrid



leistungsverzweigter
Hybrid (Toyota Prius)

Legende

VM: Verbrennungsmotor

K: Kupplung

St: Starter

KSG: Kurbelwellenstartergenerator, 3..20kW

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

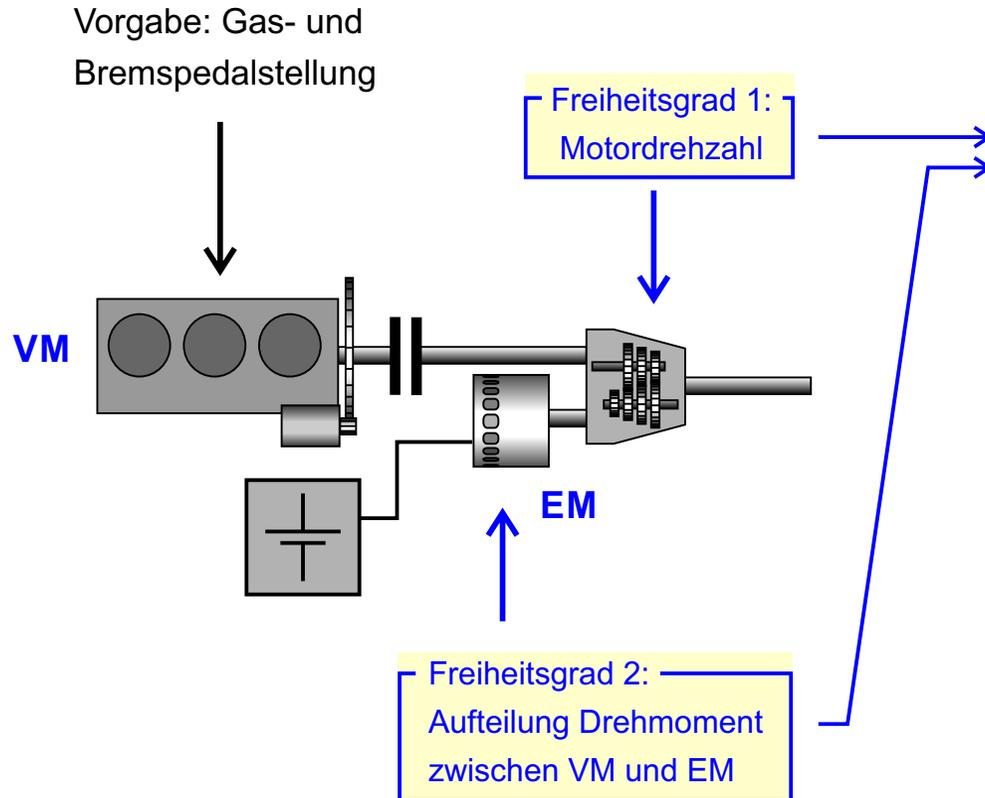
ASG: Automatisiertes Schaltgetriebe

CVT: Continuously Variable Transmission

EPG: Elektrisch gesteuertes Planetengetriebe
(Power Split Drive)

6.5 Hybridfahrzeuge

Betriebsführung



Antriebsstrangsteuerung = Optimierungsaufgabe

Optimierungsziel: minimaler Verbrauch

Nebenbedingungen: Emissionen, Ladezustand, Fahrkomfort, Geräusch

- Antriebsstrangsteuerung durch Betriebsstrategien bzw. intelligente Verfahren (Optimierung, NNs)
- Plug-in Hybrid: Laden an der Steckdose, elektrisches Fahren größerer Strecken
Nachteil = großer elektrischer Teilantriebsstrang
- Mild Hybrid: elektrisches Fahren nur im unteren Geschwindigkeitsbereich, KSG bzw. EM mit 10..20kW

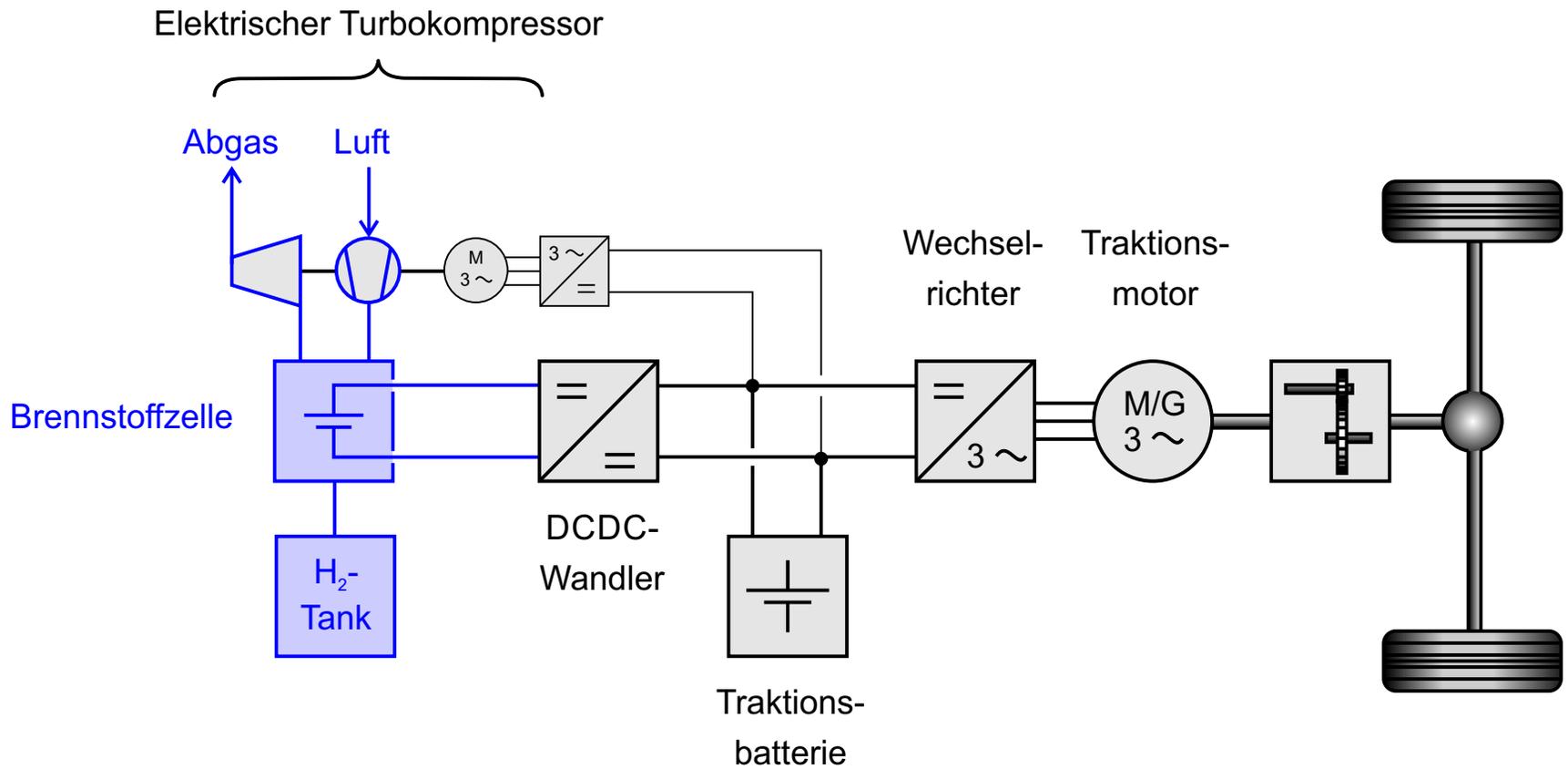
Verbrauchsreduktion:

- Stadtverkehr: 10 .. 30% je nach Fahrsituation möglich
- Autobahn und Überland: gering

Hauptvorteil ist rekuperatives Bremsen und die Vermeidung des extremen Teillastbereiches des VM

6.6 Brennstoffzellenfahrzeuge

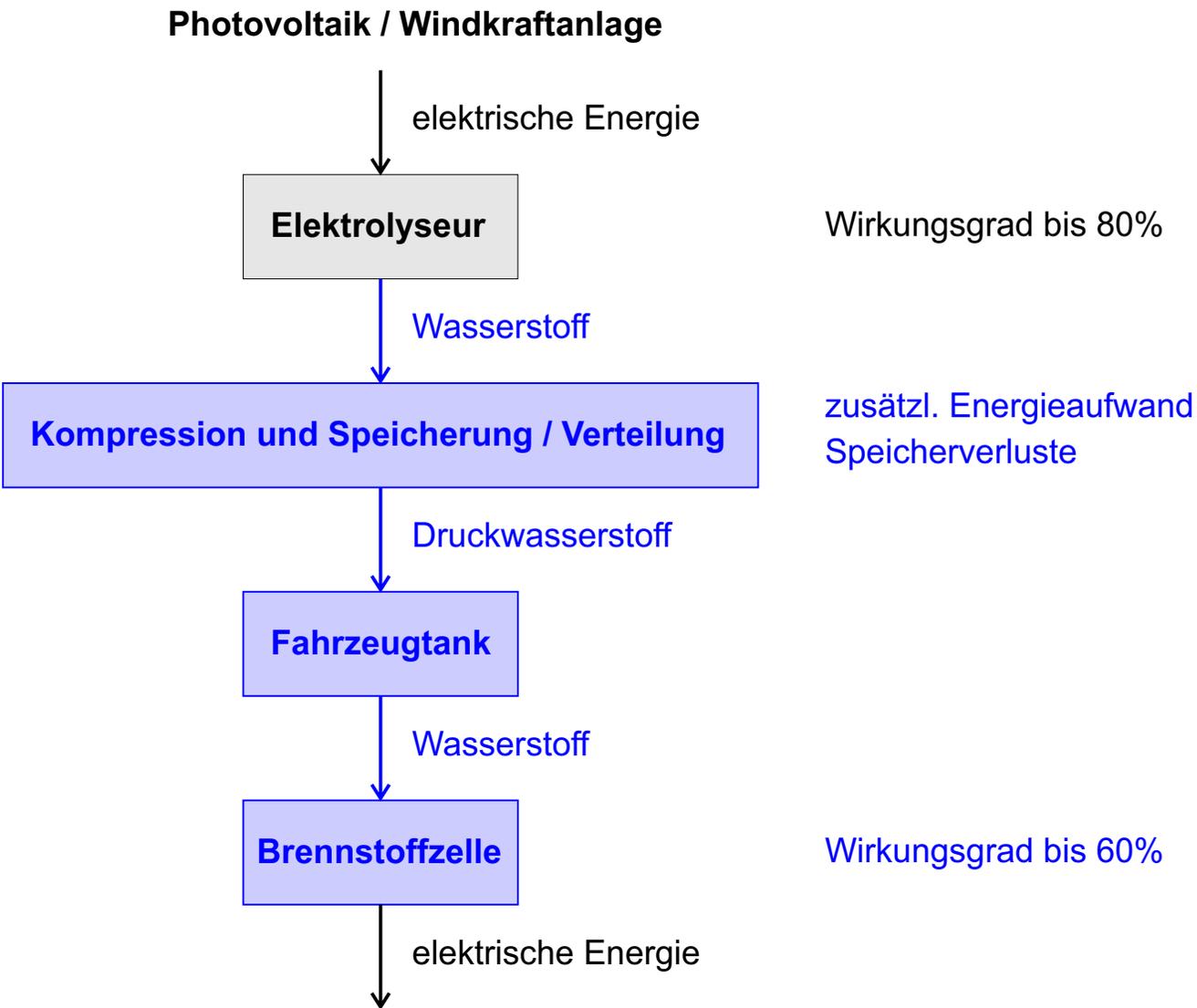
Antriebsstrangtopologie



wird als Zwischenspeicher benötigt!

6.6 Brennstoffzellenfahrzeuge

Problematik: Energieumwandlungskette



Nachteil:
Wirkungsgrad
Energiespeicherung < 40%

Vorteil:
große Energiemengen
saisonal speicherbar
und global transportierbar

ggf. mit Erdgas-Infrastruktur
koppelbar

6.6 Brennstoffzellenfahrzeuge

Vergleich Energieverbrauch Fahrzeugkonzepte

Benzin: V-Motorfahrzeug Mittelklasse: ca. $6,5 \text{ l} / 100\text{km} = 5,0 \text{ kg} / 100\text{km} = 210 \text{ MJ} / 100\text{km} = \mathbf{58 \text{ kWh} / 100 \text{ km}}$
↑ ↑ ↑
 $0,775 \text{ kg/l}$ 42 MJ/kg $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$

Wasserstoff: Brennstoffzellenfahrzeug, Toyota Mirai: ca. $1,0 \text{ kg} / 100\text{km} = 120 \text{ MJ} / 100\text{km} = \mathbf{33 \text{ kWh} / 100 \text{ km}}$
↑ ↑ ↑
Erzeugung? ADAC-Test 120 MJ/kg $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$

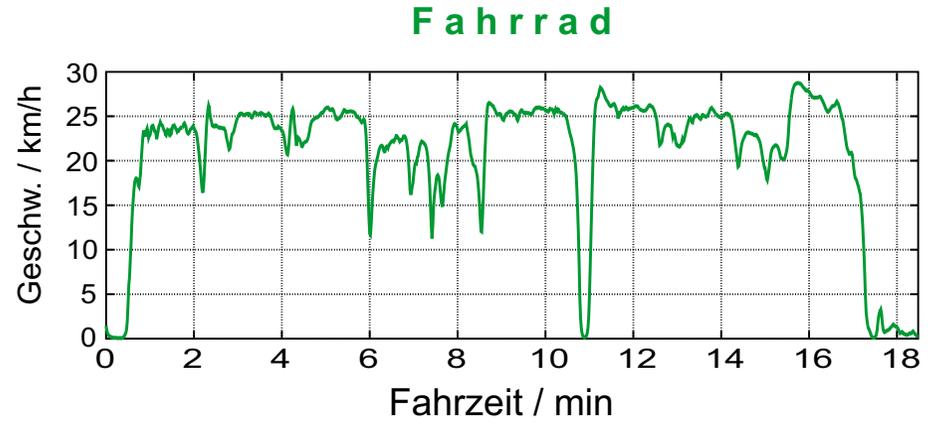
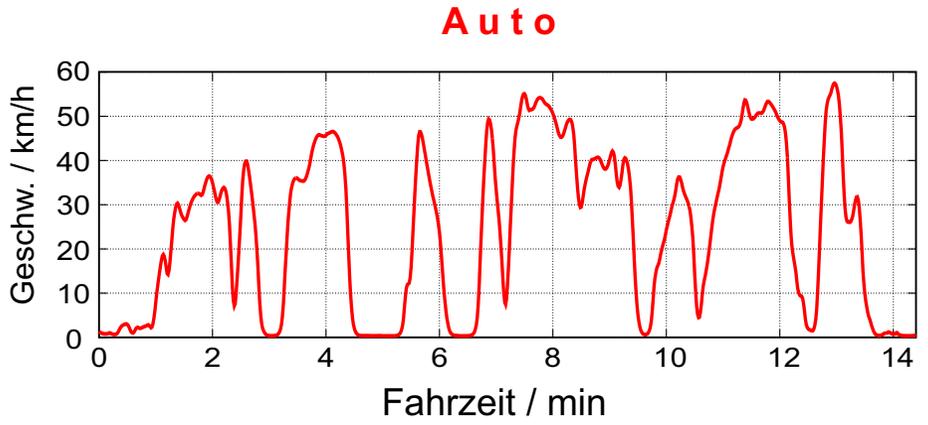
Elektr. Energie: Elektrolyseur → Druckwasserstofferzeugung → Brennstoffzellenfahrzeug → $\mathbf{54 \text{ kWh} / 100 \text{ km}}$
↑ ↑ ↑ ↑
regenerativ erzeugbar $\eta = 70\%$ $\eta = 88\%$ *Abdampfverluste?* $33 \text{ kWh} / 100 \text{ km}$

Elektr. Energie: Elektrofahrzeug Mittelklasse: ca. $\mathbf{20 \text{ kWh}_{el} / 100\text{km}}$

Elektr. Energie: E-Fuel → V-Motorfahrzeug: nochmal um den Faktor 1,5..2 schlechter als ein Brennstoffzellenfahrzeug!

6.7 Human Powered Vehicles

Einsatz von Fahrrädern im Stadtverkehr



Gewicht Fahrzeug + Fahrer: 1285 kg

← x 12,9

Gewicht Fahrzeug + Fahrer: 100 kg

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

→ x 1,3

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

Dauer: 14,4 min

Dauer: 18,5 min

Geschw.: 33 km/h Durchschnitt

Geschw.: 23 km/h Durchschnitt

Leistung: 20 kW Peak (beim Beschleunigen)

Leistung: 500 W Peak (beim Beschleunigen)

Energie: 0,49 kWh am Rad

← x 16,3

Energie: 0,03 kWh am Rad

Verbrauch: ca. 0,5 l Sprit

Verbrauch: 20 g Fett

50 Fahrten mit leerem Magen im Fettverbrennungsmodus:
 ≈ 1kg Bauchspeck

6.8 Diverses 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	Nenn Drehmoment	nominal torque
Nenn Drehzahl	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	TFM	Transverse Flux Motor
Mosfet	Metal oxide semiconductor	PLL	Phase Locked Loop
	field effect transistor	VFD	Variable Frequency Drive