

Praxisorientierte Projektierung elektrischer Antriebe (PPEA) - Elektroautos



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

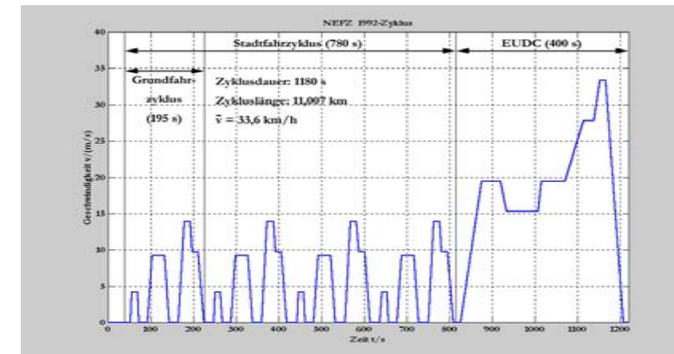
TU DARMSTADT – Grundlagen der Antriebsberechnung

Technische Universität Darmstadt
Institut für Elektrische Energiewandlung

Prof. A. Binder

abinder@ew.tu-darmstadt.de

**Basierend auf Unterlagen von M. Ade,
M. Brüggemann und P. Morrison**



Quelle: Daimler



Inhalt

- Hybrid-Automobile - Übersicht
- Elektro-Automobile – Übersicht
- Elektro-Automobile - Antriebskomponenten
- Elektro-Automobile – Simulation Fahrzeug - Fahrbahn
- Elektro-Automobile – Simulation Antriebskomponenten
- Elektro-Automobile – Simulationsbeispiele

TESLA Roadster



Hybrid-Automobile - Übersicht

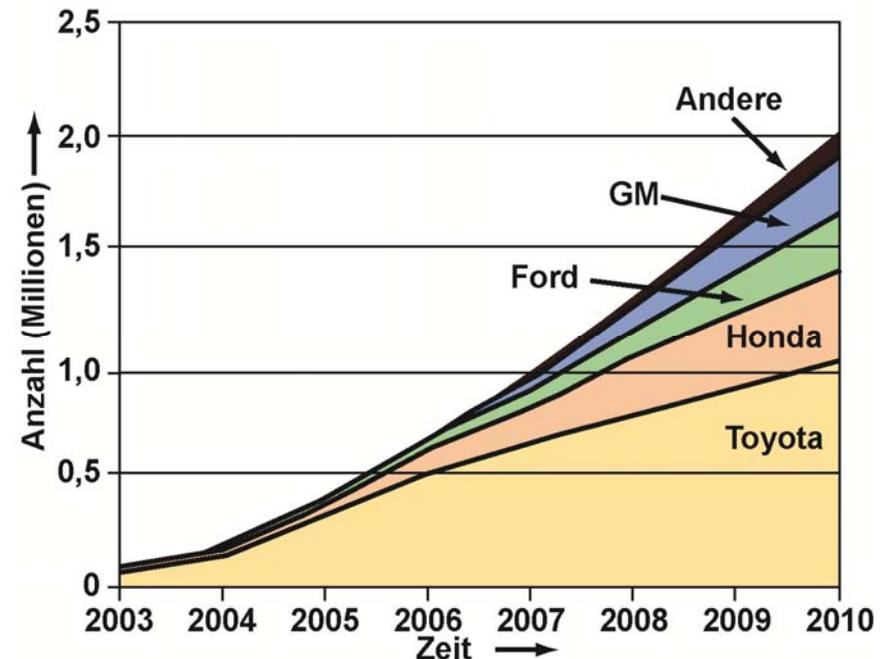
Motivation für Hybridantriebe

▪ Marktprognose 2010

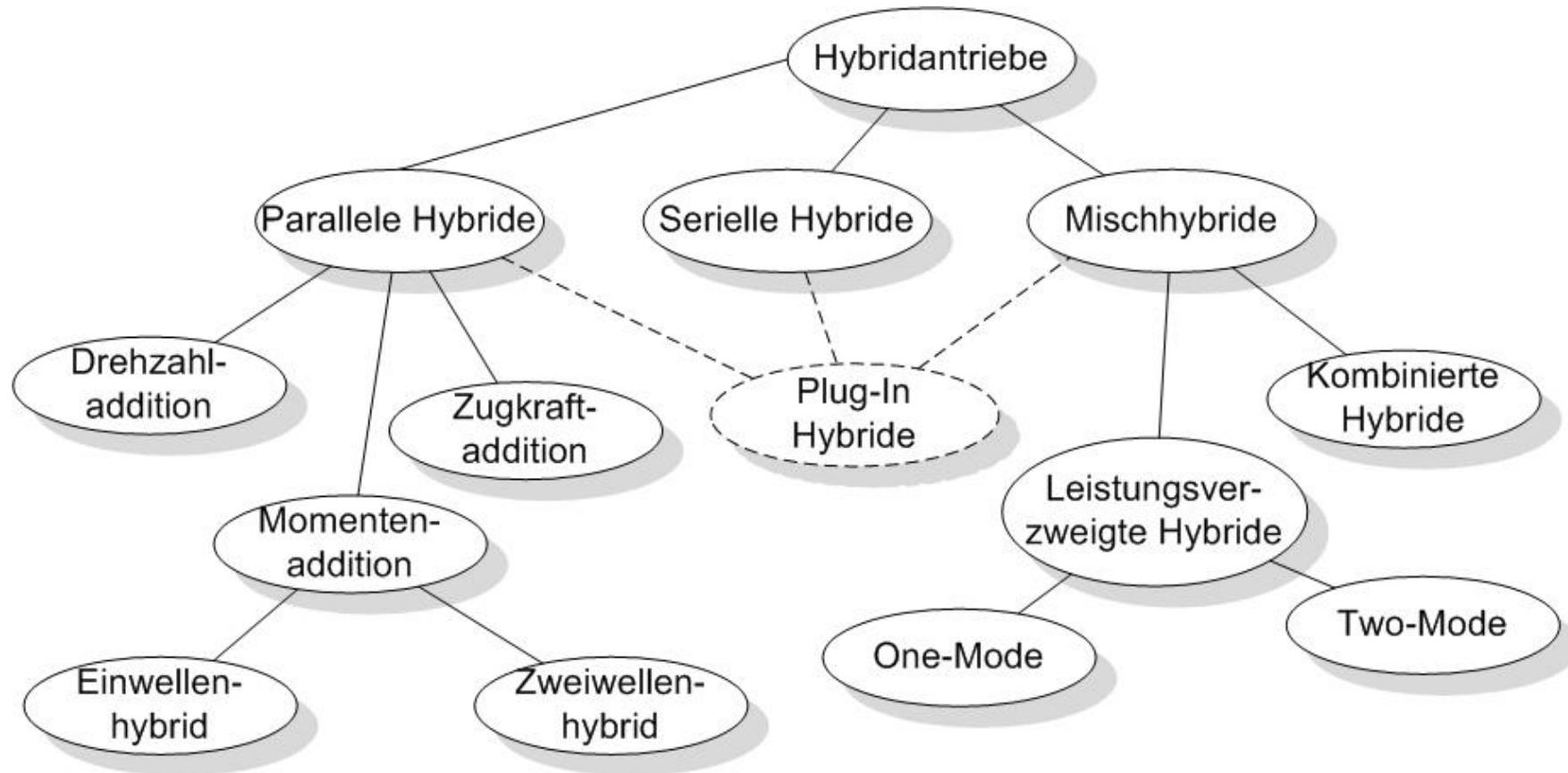
- Globale Produktion ca. 65 Mio. Kfz
- Marktanteil HEV ca. 3 % (Marktsegment Mini in BRD 2006 ca. 3 %)
- Anteil europäischer Marken gering
 - Aufholbedarf Produktion / Verkauf
 - Weiterentwicklung u. A. durch Verwendung v. Simulationsprogrammen

▪ Vorteile Simulationsmodelle

- Aufbau von Know How / Entwicklungswerkzeug
- Auslegung / Abstimmung / Dimensionierung v. Triebstrang-Komponenten vor Prototypfertigung
 - Beitrag zur Verminderung von Entwicklungskosten



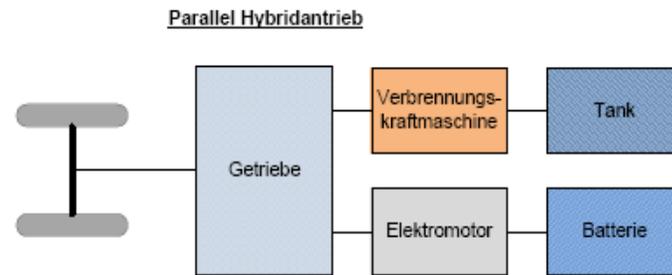
Mögliche Hybridtopologien



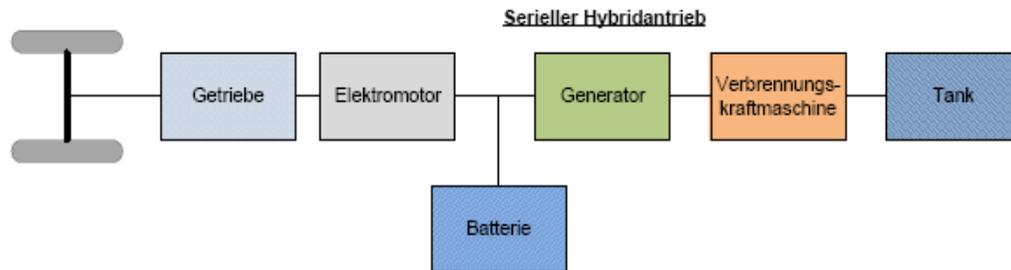
Übersicht Hybridfahrzeuge

	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Vollhybrid
Leistungsbereich [kW]	2-3	10-15	> 15
Spannung [V]	12	42	> 100
Motor Start/Stop	X	X	X
Rekuperation		X	X
Boost			X
Rein elektrisches Fahren			X

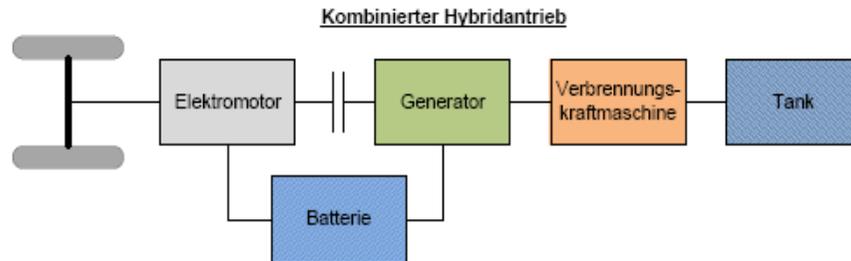
Parallelhybrid



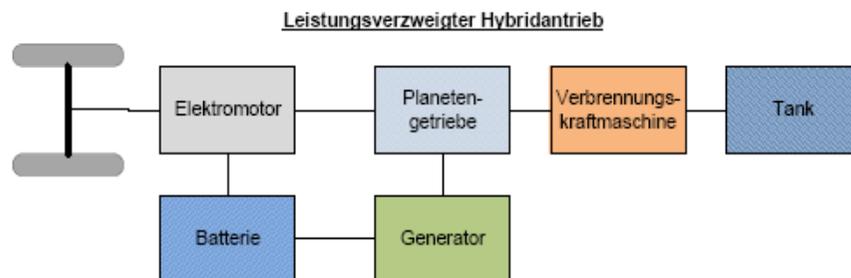
Seriellhybrid



Kombinierter Hybrid



Leistungsverzweigter Hybrid



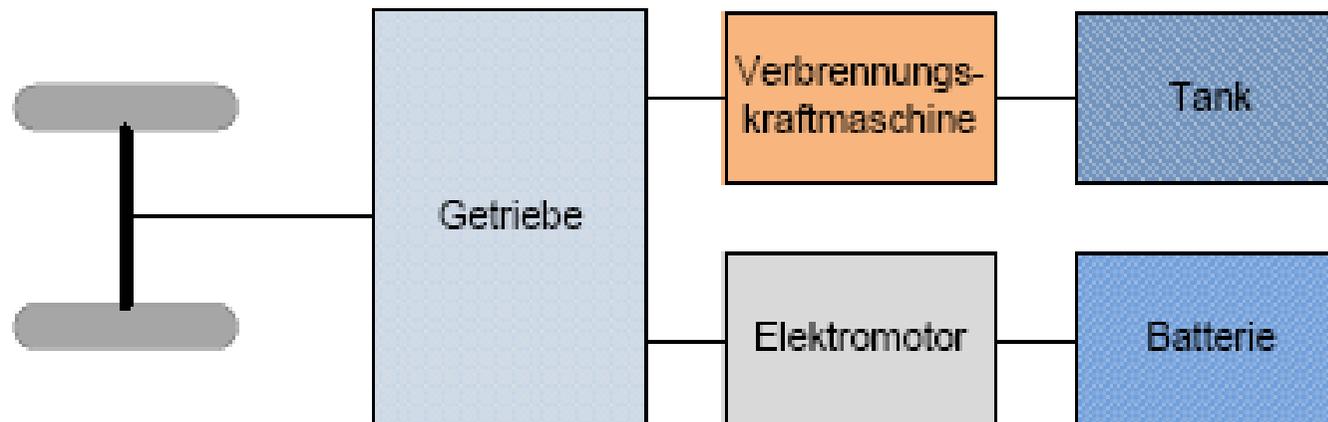
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Übersicht Hybridfahrzeuge



Parallelhybrid

Parallel Hybridantrieb



Parallelhybrid

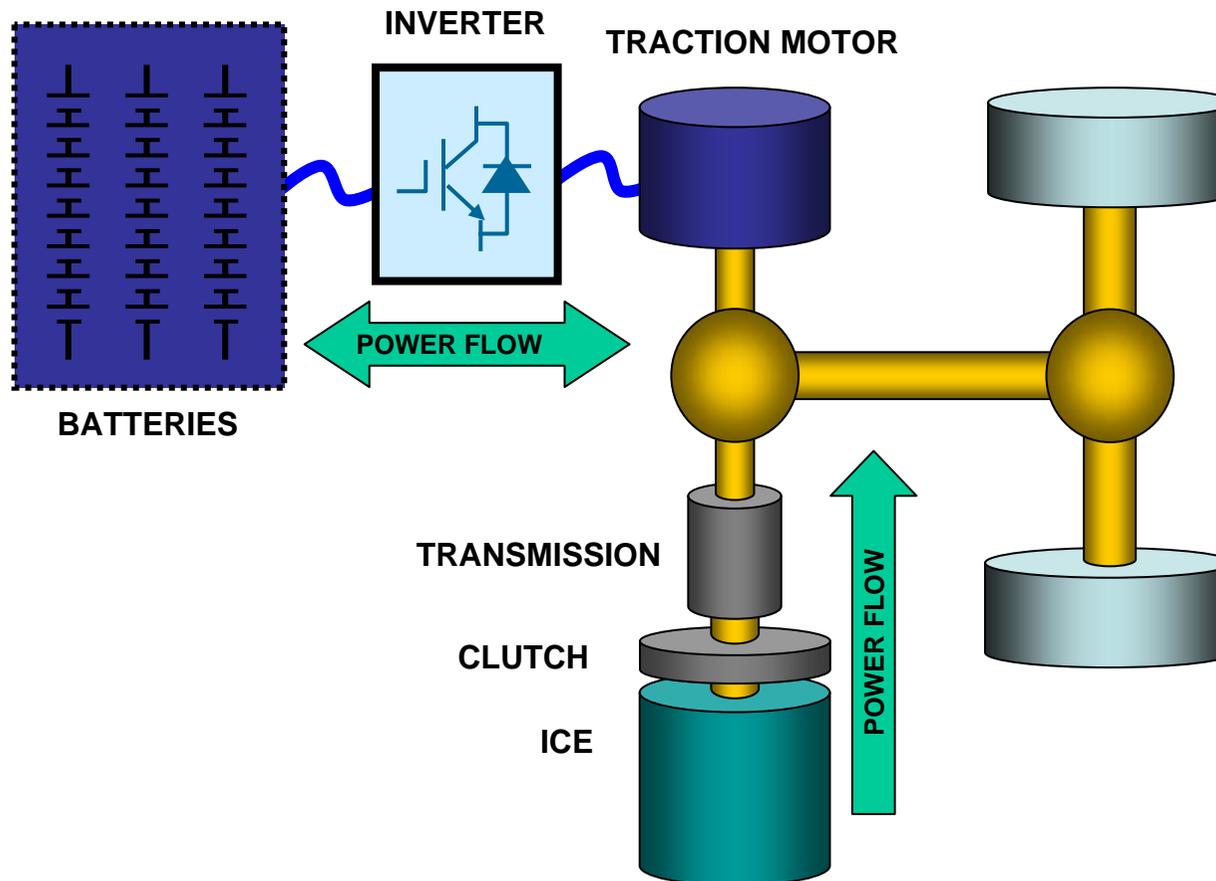
Unterschiedliche Varianten des Parallelen Hybrid

- **Momentenaddition:**
 - Feste Verbindung beider Antriebsarten (bspw. durch Kette, oder Stirnradgetriebe)
 - Differenzierung zwischen Ein- und Zweiwellenhybrid

- **Zugkraftaddition („Through-the-Road Hybrid“):**
 - Sonderfall der Momentenaddition
 - Koppelung beider Antriebsarten über Fahrbahn

- **Drehzahladdition:**
 - Verbindung über Planetengetriebe
 - Festes Drehmomentverhältnis zwischen Antrieben, dafür freie Drehzahlwahl

Parallelhybrid



----- Mechanical load sharing -----

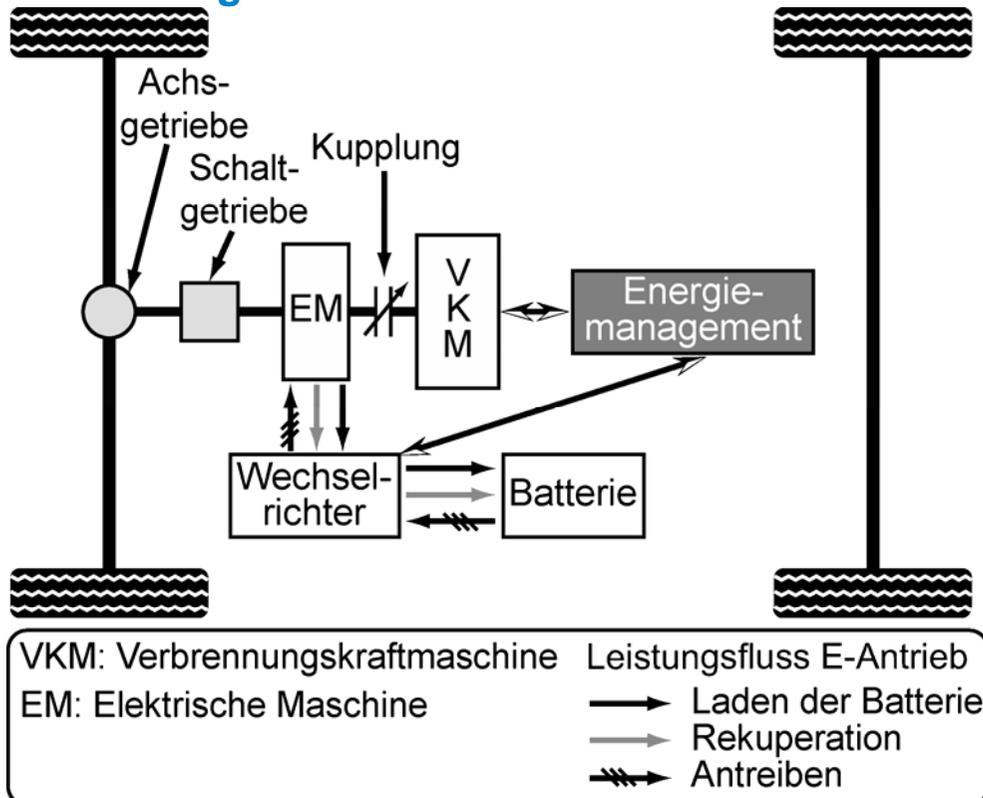
Quelle:

Parker Hannifin

Parallelhybrid

- Mercedes Benz (MB) E-Klasse 220 CDI
 - Fahrzeug: fiktiv
 - Elektrisch versorgte Nebenaggregate
 - Max. Zusatzverbraucherlast

Fahrzeugaufbau



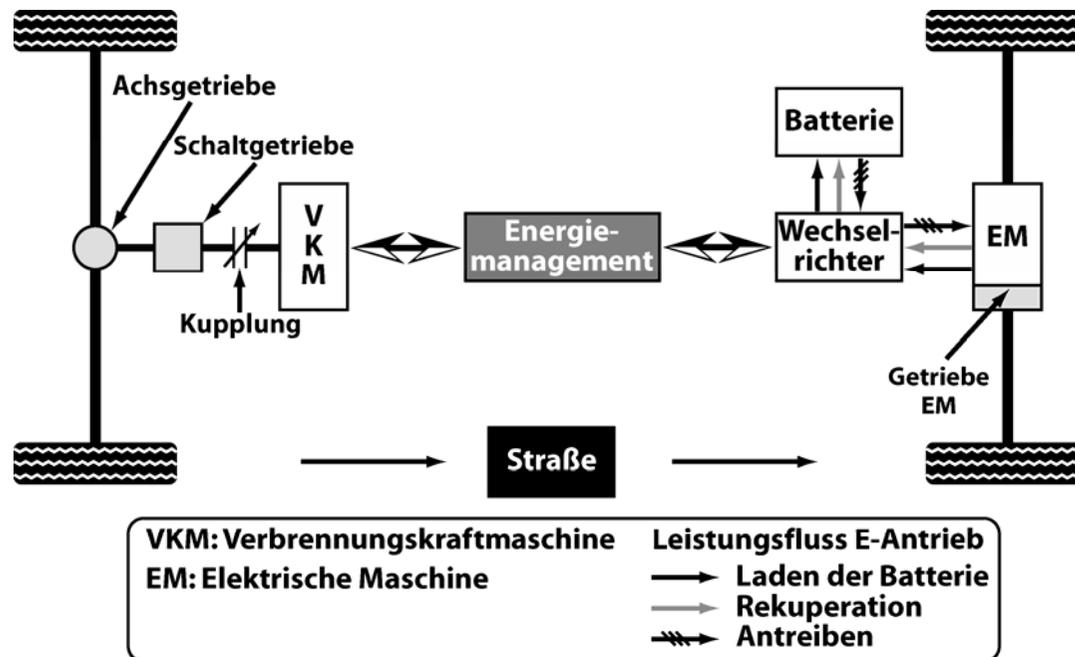
Beispiel: Fahrzeugdaten P-HEV1

VKM	2,2 l CDI
Zylinder	4
M_N / P_N	300 Nm / 105 kW
Getriebe	Automatik
Übersetzungen Gang 1 ... 5	3,95 / 2,42 / 1,49 / 1,00 / 0,83
Achsgetriebe	2,87
Fahrzeug	MB E Klasse
c_W -Wert	0,27
Querspanfläche	~ 2,25 m ²
Reifen	$r = 0,299$ m
Leermasse	1640 kg
Batterie	40 kg
E-Maschine	60 kg
WR	10 kg
DC/DC-Wandler	5 kg
Bordnetzbatterie	-10 kg
Lichtmaschine	-5kg
Gesamtmasse	1740 kg
→ Mehrmasse	ca. 100 kg



Parallelhybrid „Through the road“

- Mercedes Benz (MB) B-Klasse
 - Fahrzeug: fiktiv
 - Elektrisch versorgte Nebenaggregate
 - Max. Zusatzverbraucherlast
- Fahrzeugaufbau

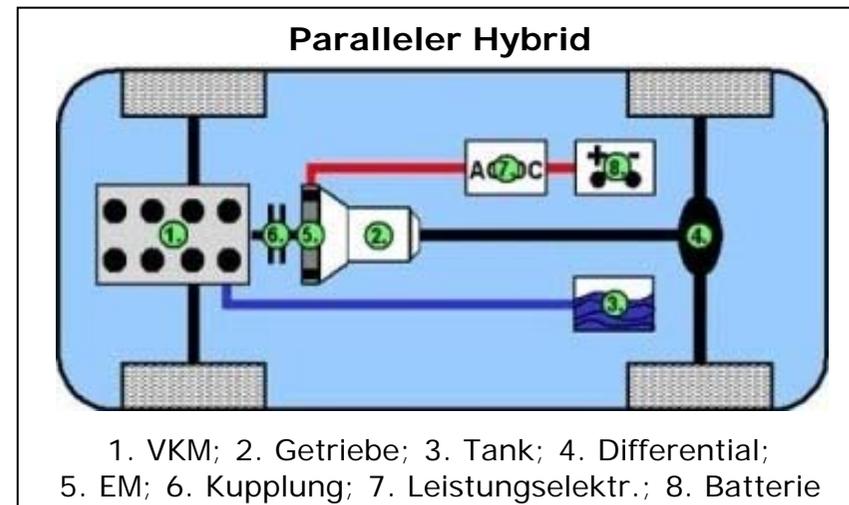
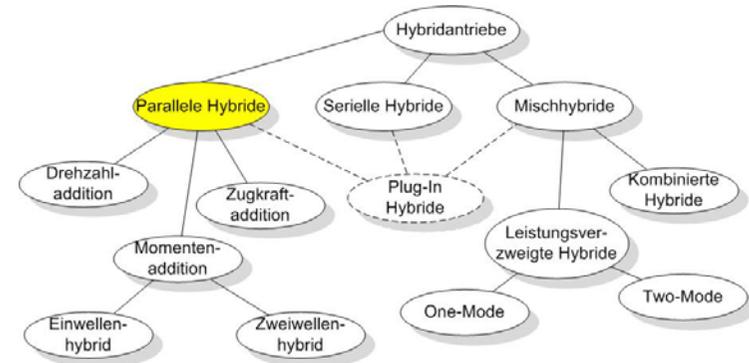


Beispiel: Fahrzeugdaten P-HEV2

VKM	1,7 l CDI
Zylinder	4
M_N / P_N	180 Nm / 67 kW
Getriebe	Automatik
Übersetzungen Gang 1 ... 5	2,72 / 1,69 / 1,12 / 0,79 / 0,65
Achsgetriebe	3,95
Fahrzeug	MB B Klasse
c_W -Wert	0,3
Querspanfläche	~ 2,42 m ²
Reifen	$r = 0,3205$ m
Leermasse	1435 kg
Batterie	40 kg
E-Maschine	42 kg
WR	8,5 kg
DC/DC-Wandler	5 kg
Bordnetzbatterie	-10 kg
Lichtmaschine	-5kg
Gesamtmasse	1515 kg
→ Mehrmasse	ca. 80 kg

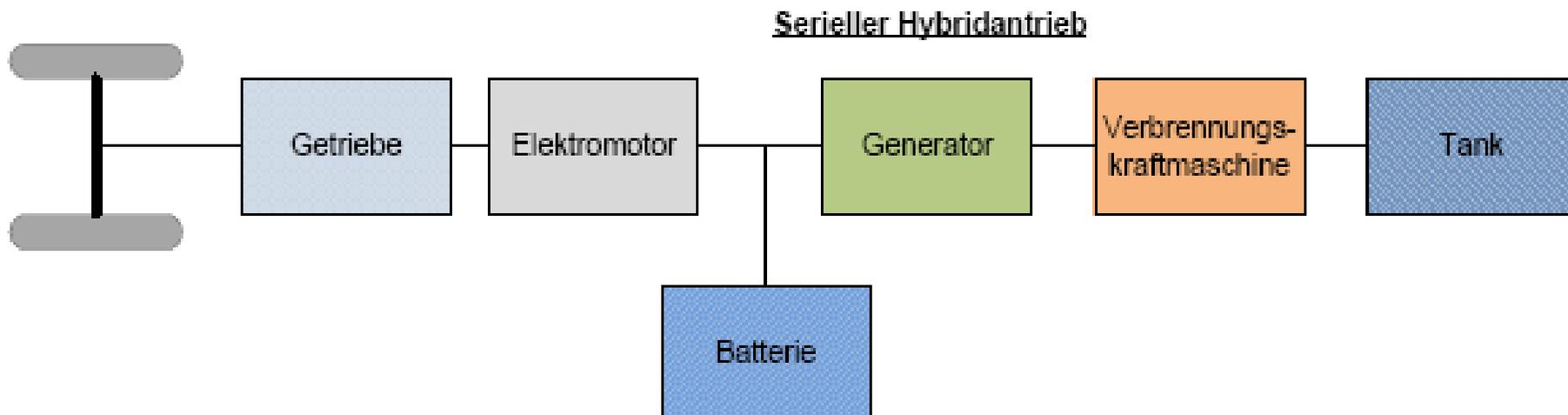
Parallelhybrid

- VKM und E-Maschine können antreiben
- Vorteile:
 - Nur zwei Maschinen
 - Teil des Vortriebs direkt durch VKM (keine „unnötige“ Energiewandlung)
 - Weitere Einsparpotentiale bei „Downsizing“
- Nachteile:
 - VKM-Betriebspunkte von Fahrumgebung abhängig
 - Komplexeres Energiemanagement



(Bildquelle: Hybrid-Autos.info)

Seriellhybrid



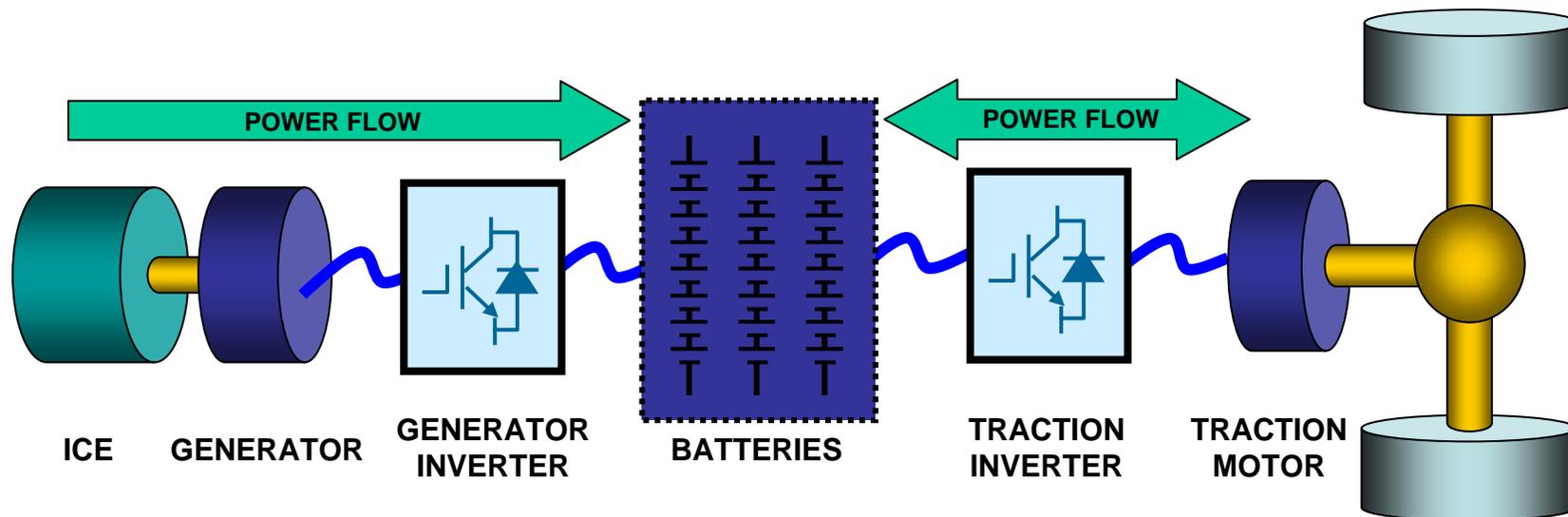
Beispiel: Dieselelektrische Stadtbusse: Dieselmotor fährt im Bestpunkt = max. Wirkungsgrad (z. B. 43%)

E-Motoren über Umrichter drehzahlvariabel !

Seriellhybrid

Quelle:

Parker Hannifin



----- No mechanical connection -----

Seriell-Hybrid-Busse

Elektrische Komponenten:

- Control Panels
- Traction Inverters
- Advanced Battery System
- Traction Motors
- Generators (PM AC)
- Charging Inverters



Quelle:

Parker Hannifin

Seriell-Hybrid-Bus



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



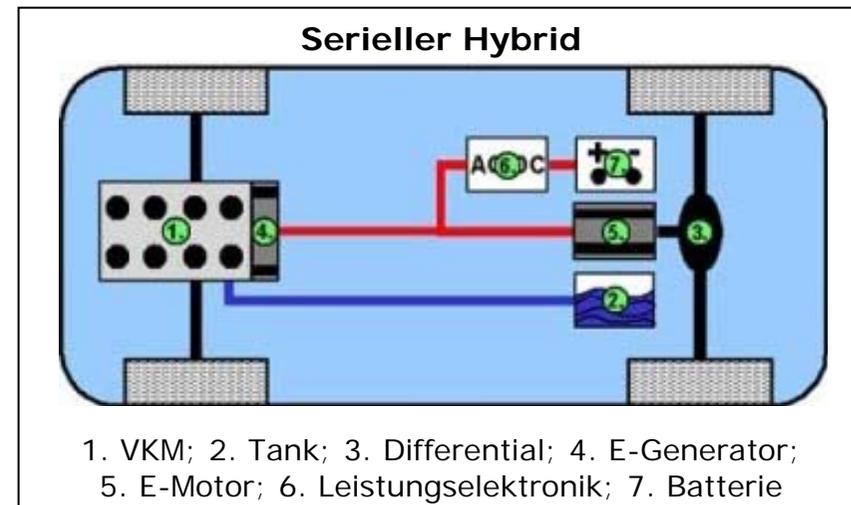
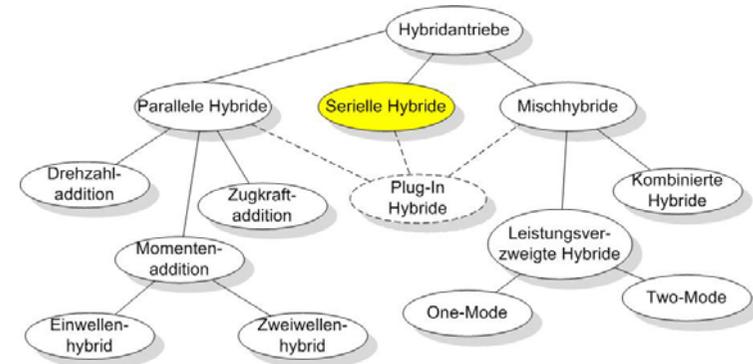
Quelle:

Parker Hannifin



Seriellhybrid

- VKM nur zur Stromerzeugung
- Keine mechanische Verbindung von VKM und Straße
- Vorteile:
 - Freiheiten beim Fahrzeugdesign
 - Betrieb der VKM im besten Wirkungsgrad
 - Kein Getriebe notwendig
- Nachteile:
 - Zusätzliche, doppelte Energiewandlung
 - Drei vollwertige Maschinen (→ Vollhybrid!)



(Bildquelle: Hybrid-Autos.info)

Mischhybride

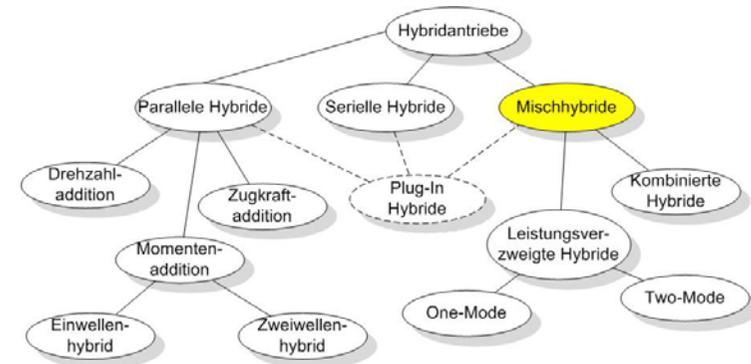
▪ Unterschiedliche Varianten des Mischhybrid

▪ Kombiniertes Hybrid:

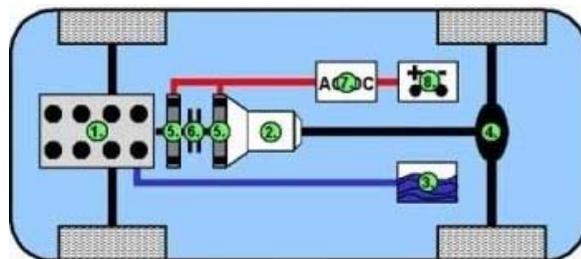
- Wahlweise Antrieb als Serieller oder Paralleler Hybrid

▪ Leistungsverzweigter Hybrid

- One-Mode: Ein fester Betriebsbereich
- Two-Mode: Zwei Betriebsbereiche und vier feste Gänge

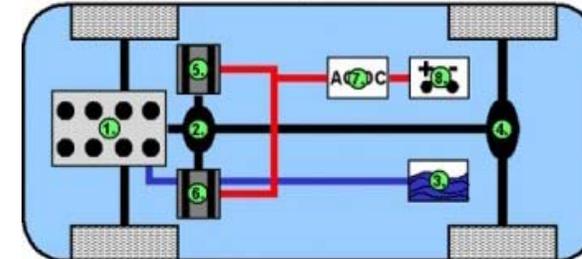


Kombiniertes Hybrid



1. VKM; 2. Getriebe; 3. Tank; 4. Differential;
5. E-Gen. (links), E-Mot. (rechts); 6. Kupplung;
7. Leistungselektronik; 8. Batterie

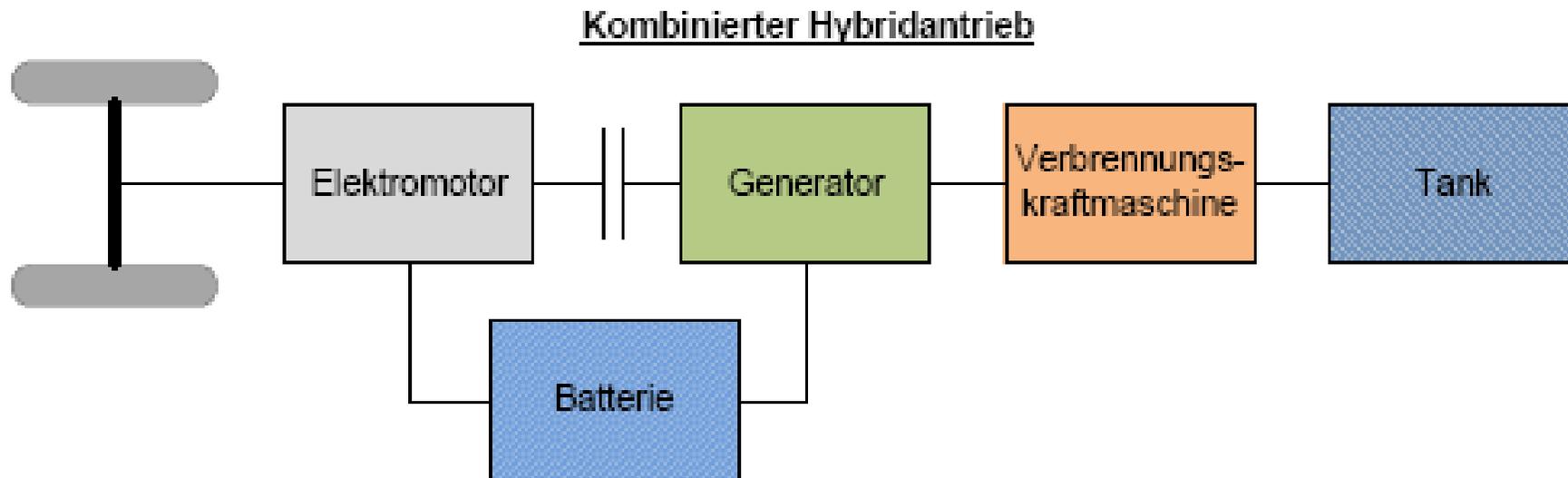
Leistungsverzweigter (One-Mode) Hybrid



1. VKM; 2. Planetengetriebe; 3. Tank;
4. Differential; 5. EM 1; 6. EM 2;
6. Leistungselektronik; 7. Batterie

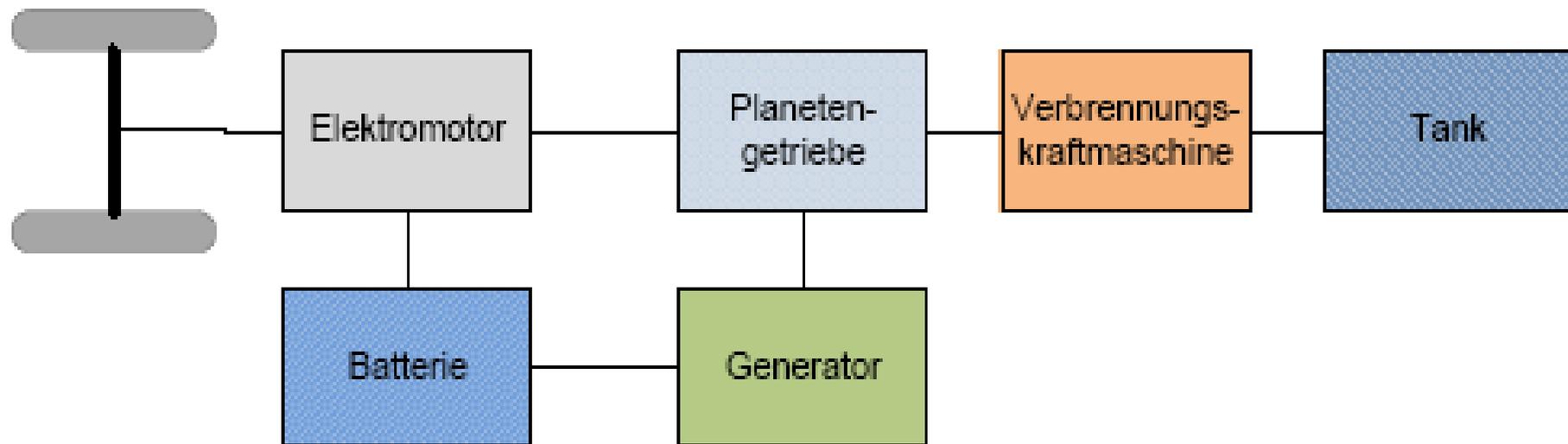
(Bildquelle: Hybrid-Autos.info)

Kombiniertes Hybrid



Leistungsverzweigter Hybrid

Leistungsverzweigter Hybridantrieb



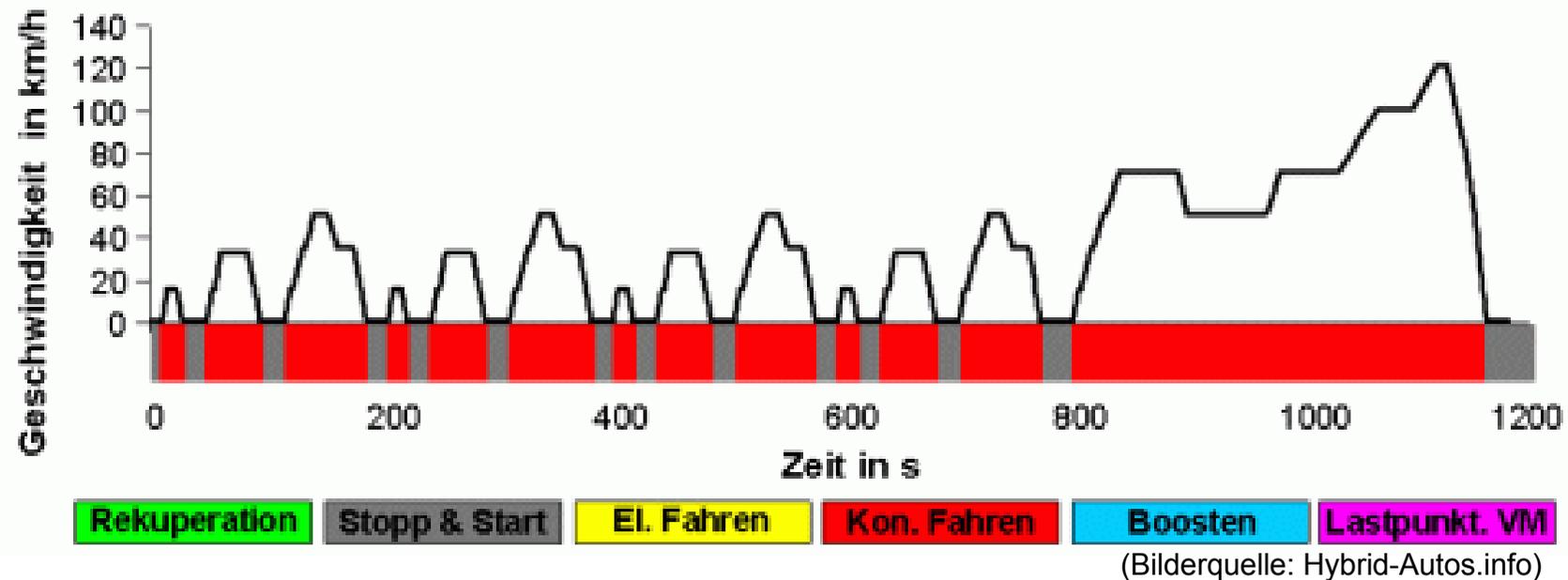
*Beispiel: Toyota Prius: mit leistungsverzweigendem Getriebe,
Ni-Me-Hybrid-Batterie*

Hybridisierungsklassen

Klasse	Mikro-Hybrid	Mild-Hybrid	Vollhybrid
Leistungsbereich	2 – 3 kW	10 – 15 kW	>15 kW
Betriebsspannung	12 V	42 – 144 V (mit DC-DC-Wandler)	>> 100 V (mit DC-DC-Wandler)
Charakteristika	<ul style="list-style-type: none"> • Kaum Veränderung zu konventionellen Fahrzeug • Starter-Generator anstatt Lichtmaschine 	<ul style="list-style-type: none"> • Traktions- anstatt Bordbatterie • Einsatz von Kurbelwellen-Stator-Generatoren • „Downsizing“ - Option 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausreichend groß dimensionierte Traktionsbatterien und E-Motoren für rein elektrischen Antrieb
Komponenten einer Betriebsstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Keine „echte“ Rekuperation, aber optimiertes Laden der Bordbatterie • Start-Stop-Funktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Echte Rekuperation • Start-Stop-Funktion • „Boost“ – Option • Lastpunktverschiebung 	<ul style="list-style-type: none"> • Echte Rekuperation • Start-Stop-Funktion • „Boost“ – Option • Lastpunktverschiebung • Rein elektrisches Fahren möglich
Einsparpotentiale *	2 – 10 %	10 – 20 %	20 – 50 %

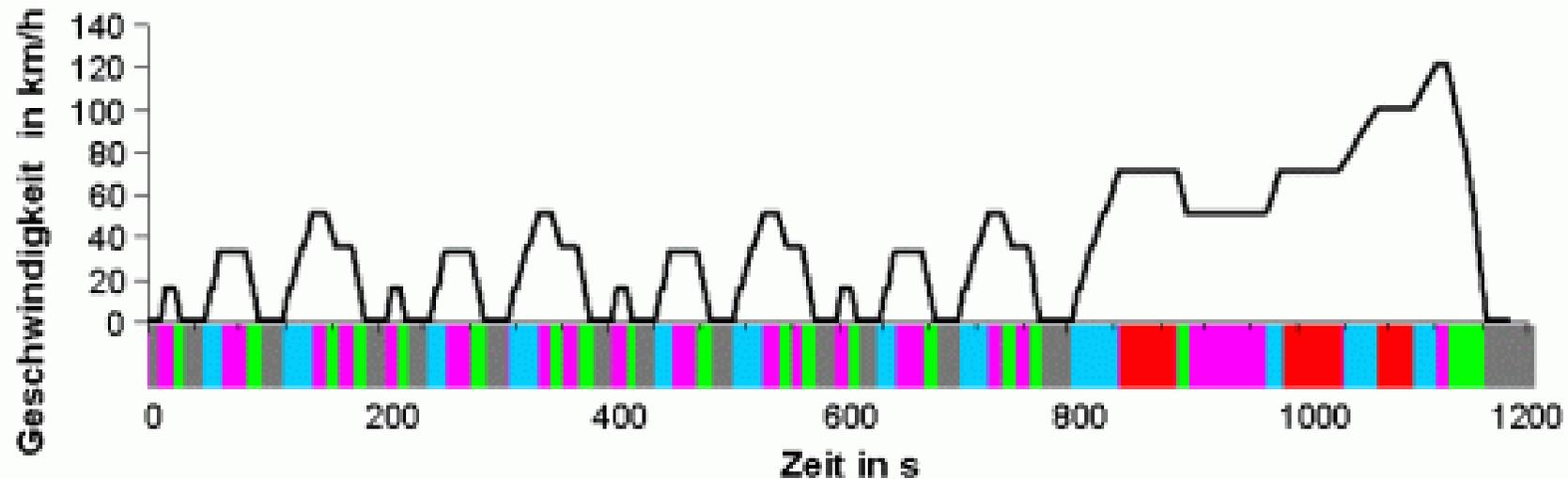
(* nach C. C. Chan: „Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modelling“)

Mikrohybrid



- Start-Stop
- Konventionelles Fahren

Mildhybrid



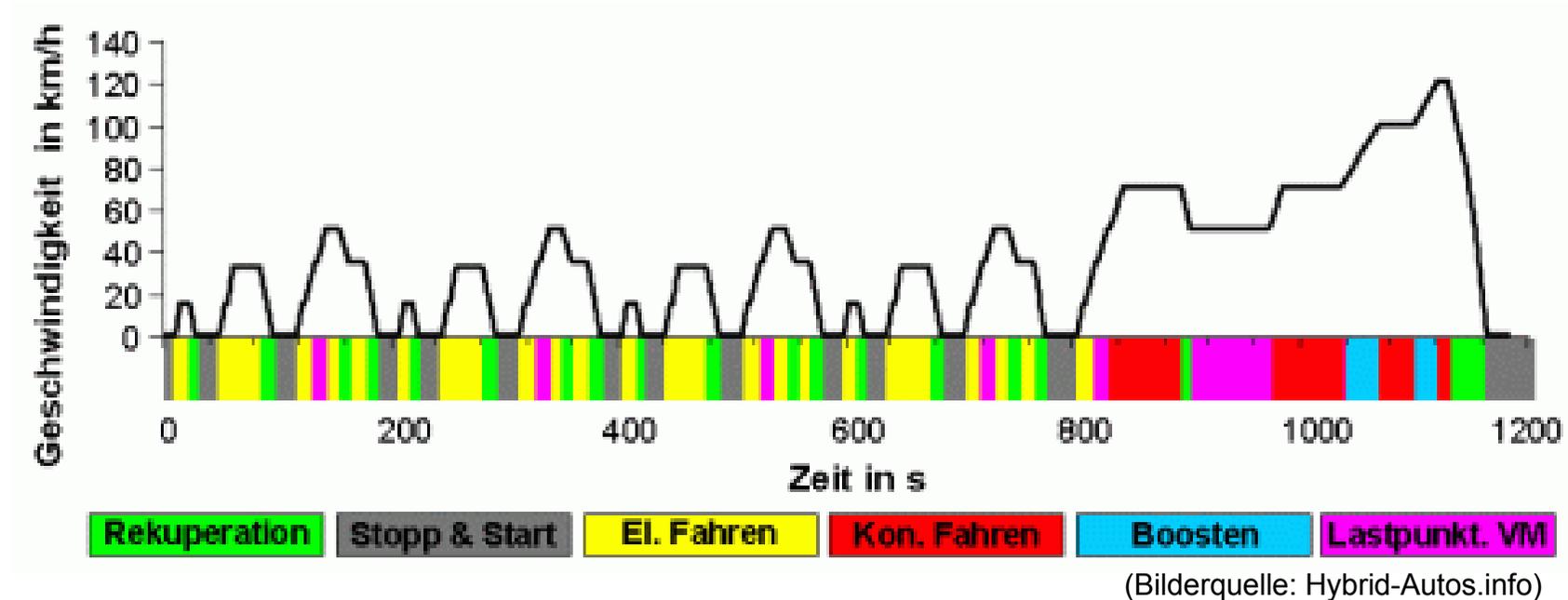
Rekuperation Stopp & Start El. Fahren Kon. Fahren Boosten Lastpunkt. VM

(Bilderquelle: Hybrid-Autos.info)

Zusätzlich zu Mikrohybrid:

- Rekuperation
- Boosten
- Lastpunktverschiebung

Vollhybrid



Zusätzlich zu Mildhybrid:

- Rein elektrisches Fahren

Aktuelle und zukünftige Hybridfahrzeuge (Auswahl)

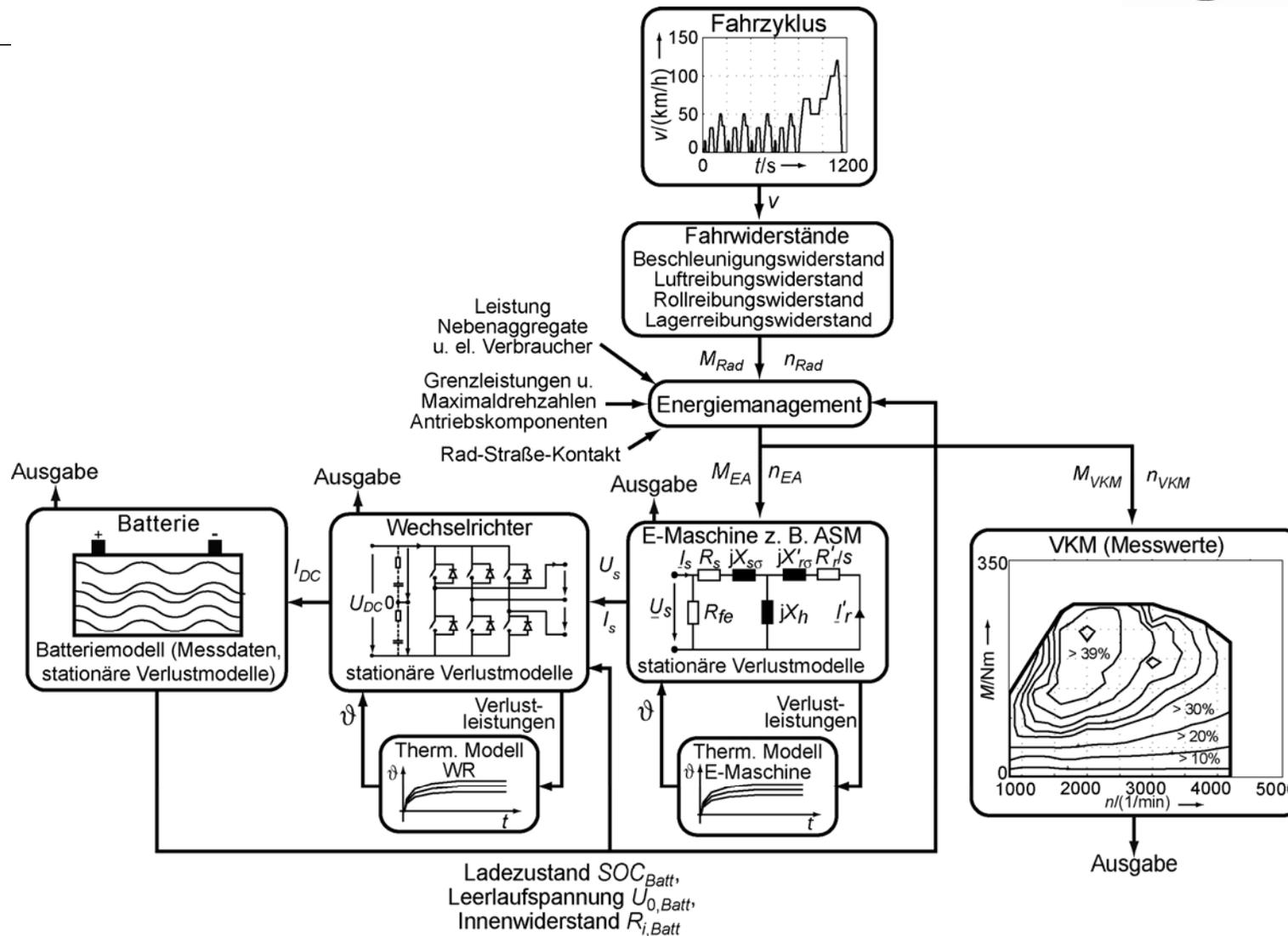
	Serieller Hybrid	Paralleler Hybrid: Momenten-addition	Paralleler Hybrid: Zugkraft-addition	Mischhybrid: kombiniert	Mischhybrid: leistungs-verzweigt (One-Mode)	Mischhybrid: Leistungs-verzweigt (Two-Mode)
Mild-hybrid	(nicht sinnvoll)	Honda („IMA“): <ul style="list-style-type: none"> • Jazz • Insight • CR-Z BMW: <ul style="list-style-type: none"> • ActiveHybrid 7 Mercedes-Benz: <ul style="list-style-type: none"> • S400 BlueHYBRID 	(nicht bekannt)	(nicht sinnvoll)	(nicht sinnvoll)	(nicht sinnvoll)
Voll-hybrid	Audi: <ul style="list-style-type: none"> • A1 e-tron (2013) BMW: <ul style="list-style-type: none"> • Megacity Vehicle (2013) 	Audi: <ul style="list-style-type: none"> • Q5 Hybrid (2011) • A8 Hybrid (2011) VW: <ul style="list-style-type: none"> • Touareg Hybrid (2011) Porsche: <ul style="list-style-type: none"> • Cayenne S Hybrid 	Peugeot („Hybrid4“): <ul style="list-style-type: none"> • 3008 (2011) 	Opel: <ul style="list-style-type: none"> • Ampera (2011) Chevrolet: <ul style="list-style-type: none"> • Volt (2011) 	Toyota („HSD“): <ul style="list-style-type: none"> • Prius 3 • Auris HSD Lexus („HSD“): <ul style="list-style-type: none"> • CT 200h • HS 240h • GS 450h • LS 600h • RX 450h 	BMW: <ul style="list-style-type: none"> • X6 ActiveHybrid Mercedes: <ul style="list-style-type: none"> • ML 450 Hybrid

Fahrzeugklassen: [Kompaktklasse](#) [Mittelklasse](#) [obere Mittelklasse](#) [Oberklasse](#) [Geländewagen](#)

Simulationsmodelle für Hybridantriebe



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Hybridbetrieb: Energiemanagement



Ziel einer Energiemanagementstrategie:

→ Erreichen des Zielorts bei...

- Minimalem Verbrauch
(Kriterium für die durchgeführte Matlab-Simulation)
- Minimalen Emissionen
- Etc.

Herausforderung: (teilweise) fehlende vorherige Kenntnis von...

- Verkehrsaufkommen
- Fahrverhalten des Fahrers
- Topographie der Route
- Wetter (→ Einsatz von Scheinwerfern, Klimaanlage, etc.)
- Lademöglichkeiten am Stromnetz (→ Plug-In Hybrid)
- ...

Folge:

- Die optimale Betriebsstrategie gibt es nicht, aber
- Viele verschiedene, mehr oder weniger gute Annäherungen



Hybridbetrieb: Energiemanagement



▪ Aufgabe:

- Generiert Sollwerte für Antriebe mit Blickpunkt auf ein gewünschtes Ziel
- Allgemeine Gültigkeit

▪ Ziel: Minimierung des Kraftstoffverbrauchs

▪ Mittel: Ausnutzung der Hybridfunktionen

- VKM-Start/Stopp
- VKM-Lastpunktverschiebung
- Elektrisches Fahren
- Elektrisches Boosten

▪ Randbedingungen:

- Begrenzung Startvorgänge VKM
 - Nachlaufzeit / Mindest-Einschaltdauer
- SOC innerhalb Band $SOC_{min} \dots SOC_{max}$
- Maximalmoment rotierender Triebwerksteile (VKM, E-Maschine, Getriebe)
- Maximalleistung statischer Antriebskomponenten (Batterie, WR)
- Maximaltemperaturen der Aktivteile WR und E-Maschine



Hybridbetrieb: Energiemanagement



Weg zu einer guten Energiemanagementstrategie:

- Geschicktes Zerlegen der Gesamtleistung und Verteilen auf die einzelnen Maschinen:
- Berücksichtigen der Charakteristika von E- und V-Maschine sowie variabler Parameter (bspw. in der Batterie)

Zwei grundsätzliche Optimierungsansätze:

Vorausschauendes Energiemanagement

- Abschätzen der künftig benötigten Leistung aus vergangenem Leistungsbedarf

Betriebszustandsmanagement der VKM

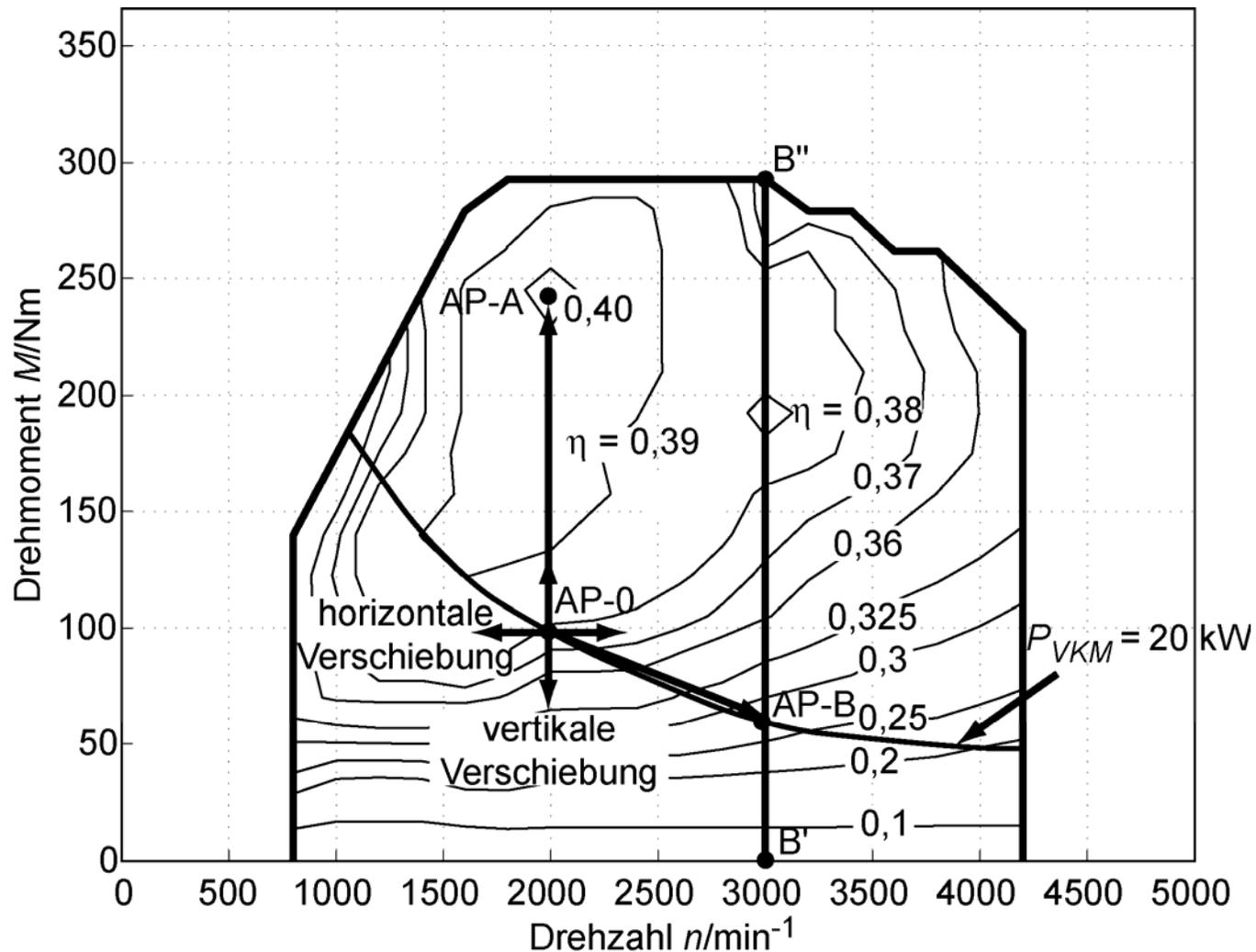
- Berücksichtigung von Randbedingungen,
- bspw. VKM-Temperatur
- → Lastpunktverschiebung



Beispiel: VKM-Lastpunktverschiebung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



VKM-Lastpunktverschiebung - Batterieladung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Die **Batterie-Nutzleistung** ist die Lade- bzw. Entladeleistung abzüglich der Batterie-Verluste.
- Die Ladung der Batterie erfolgt (abgesehen vom regenerativen Bremsen) durch **Lastpunktverschiebung der VKM** unter Aufwendung von Kraftstoff.
- Beim Entladen der Batterie wird dieser Kraftstoffverbrauch in Antriebsleistung umgesetzt. Diese Ladungsmenge ist **zu einem späteren Zeitpunkt** durch die VKM wieder zu ersetzen.
- Die **Belastung des Triebstrangs** (resultierende Triebstrangverluste) durch die Batterieladung wird berücksichtigt.
- Laden: $P_{B,Nutz}$ zu Verlusten addiert, Entladen: $P_{B,Nutz}$ von Verlusten subtrahiert.
- Einfluss dieser Lastpunktverschiebung **mit Faktor $k_{Batt} = 1, 2, \text{ oder } 3$ gewichtet**:
 $k_{Batt} \cdot P_{B,Nutz}$ zu Verlusten addiert bzw. subtrahiert: Erlaubt Sensitivitätsanalyse bei der Simulation für minimale Gesamtverluste.



Beispiel: Berechnung Kraftstoffverbrauch HEV

Ergebnisse P-HEV1

Zyklus	k_{Batt}	$P_{E-Drive,max}$ kW	ΔSOC %	Min. Verbrauch l/(100 km)		Kraftstoff- Einsparung
				P- HEV1	VKM- Kfz	
NEFZ	1	10	5	8,1	10,2	20 %
UDDS	2	10	10	8,4	10,6	21 %
Japan-10-15	2	10	10	9,6	12,9	25 %
Highway-FET	1	15	5	6,2	6,5	5 %

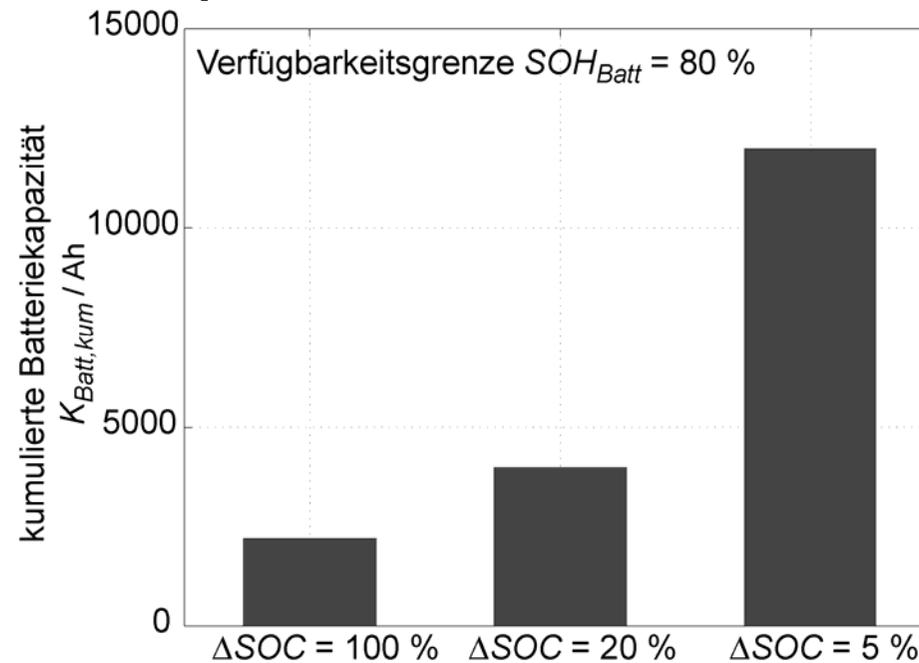
Ergebnisse P-HEV2

Zyklus	k_{Batt}	$P_{E-Drive,max}$ kW	ΔSOC %	Min. Verbrauch l/(100 km)		Kraftstoff- Einsparung
				P- HEV2	VKM- Kfz	
NEFZ	1	15	5	8,1	9,3	13 %
UDDS	1	10	5	8,5	9,8	13 %
Japan-10-15	1	10	5	9,5	11,7	19 %
Highway-FET	1	10	5	6,1	6,1	0 %

Beispiel: Berechnung Kraftstoffverbrauch HEV



- Ergebnisse hängen vom Fahrzyklus und dem Aufbau des HEV ab
- k_{Batt} : Batterieladung nicht / nur geringfügig künstlich erzwingen
- $P_{E-Drive,max}$: Elektrisches Anfahren auf kleine Leistungen begrenzen
- ΔSOC : Batterienutzung auf kleines Fenster ΔSOC begrenzen
→ kumulierte Batteriekapazität hoch



Spezifische Aspekte beim Energiemanagement verschiedener Topologien

- Serieller Hybrid:
 - 2-dimensionale (Drehmoment und Drehzahl) Lastpunktverschiebung
 - Nur ein antreibender Motor -> Einfaches Energiemanagement
 - „Ein-Punkt-Betrieb“ vs. „Trajektorienbetrieb“

- Paralleler Hybrid:
 - Momentenaddtion: Drehmoment-Lastpunktverschiebung
 - Drehzahladdtion: Drehzahl-Lastpunktverschiebung

- Leistungsverzweigter Hybrid:
 - E-Maschine 1 an Antriebswelle: Drehmoment-Lastpunktverschiebung
 - VKM und E-Maschine 2: 2-dim. Lastpunktverschiebung
(solange Getriebegleichungen erfüllt sind)

Elektro-Automobile - Übersicht

Zero Emission Vehicle – Definition



- Definition Zero Emission Vehicle:

Null Emissionen jeglicher Schadstoffe in Betrieb und Stillstand, keine Verdunstungsemissionen, keine indirekten Emissionen

- basierend auf der Umweltgesetzgebung des *California Air Resources Board* (CARB)
- Abgasgesetzgebung der CARB bindend in Kalifornien sowie 12 weiteren Staaten der USA
- Gesetzlich geforderter ZEV-Anteil steigt von
 - 10% in 2003 auf
 - 16% in 2018



***Kalifornien* – Klassifizierung von Fahrzeugen**



- **TLEV: Transitional Low Emission Vehicle**
Dies ist der schwächste Emissionsstandard in *Kalifornien*. TLEVs laufen nach 2004 aus und werden vom Markt genommen.
- **LEV: Low Emission Vehicle**
Alle Fahrzeuge die nach 2004 in *Kalifornien* verkauft werden entsprechen mindestens diesem Emissionsstandard.
- **ULEV: Ultra Low Emission Vehicle**
ULEVs sind 50% sauberer als das durchschnittliche Fahrzeug aktuellen Baujahrs.
- **SULEV: Super Ultra Low Emission Vehicle**
SULEVs sind 90% sauberer als das durchschnittliche Fahrzeug aktuellen Baujahrs.



Kalifornien – Klassifizierung von Fahrzeugen



- **ZEV – Zero Emission Vehicles**

ZEVs haben keine Abgasemissionen. Dies beinhaltet batteriebetriebene und Brennstoffzellen basierende elektrische Fahrzeuge. Die Kategorie ZEV beinhaltet zwei weitere Klassen [18]:

- **PZEV: Partial Zero Emission Vehicle**

PZEVs erfüllen die SULEV Abgasemissionsstandards, haben keine Verdunstungsemissionen und eine 15 Jahre / 150.000 Meilen Garantie. Keine Verdunstungsemissionen bedeutet, dass die Fahrzeuge weniger Emissionen während dem Fahren aufweisen als typische Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor im ausgeschalteten Zustand.

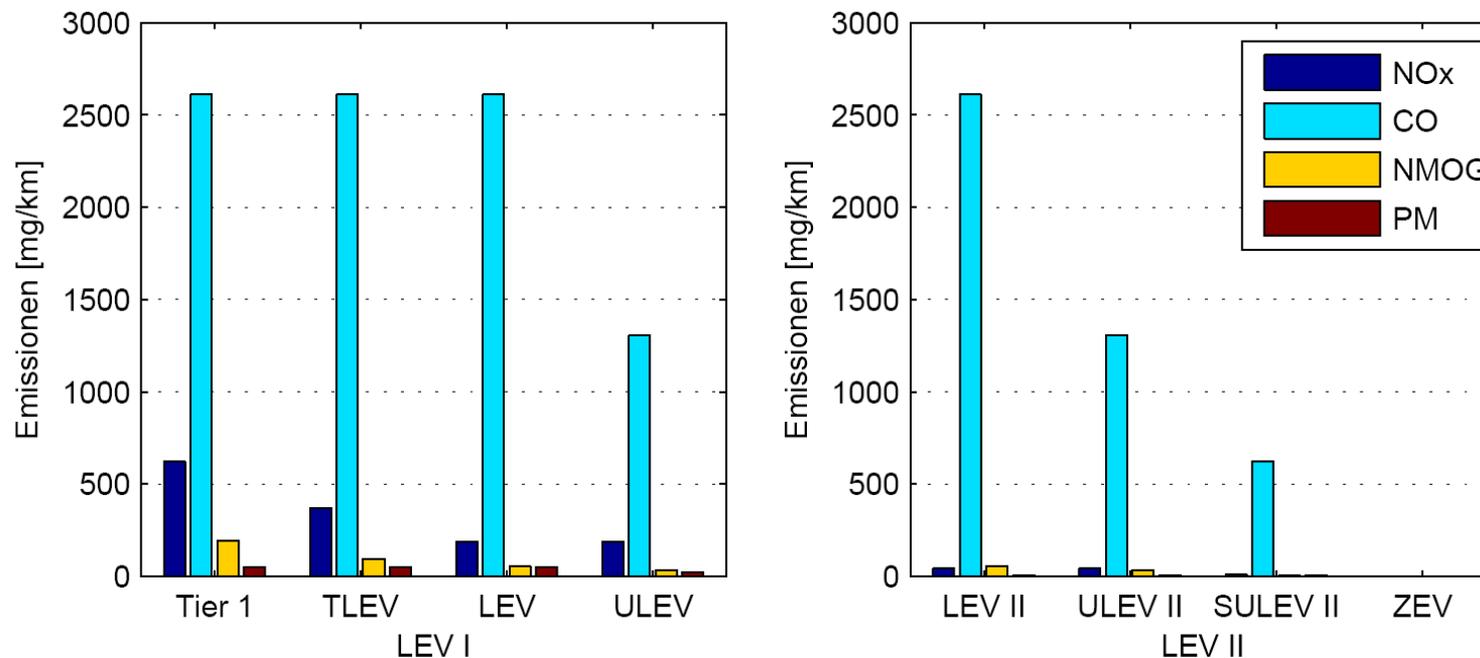
- **AT PZEV: Advanced Technology PZEVs**

AT PZEVs erfüllen die PZEV Anforderungen und haben zusätzlich ZEV-ähnliche Eigenschaften. Ein CNG-Fahrzeug (Compressed Natural Gas) oder ein Hybridfahrzeug mit Motoremissionen die die PZEV Standards erfüllen würden AT PZEV klassifiziert.

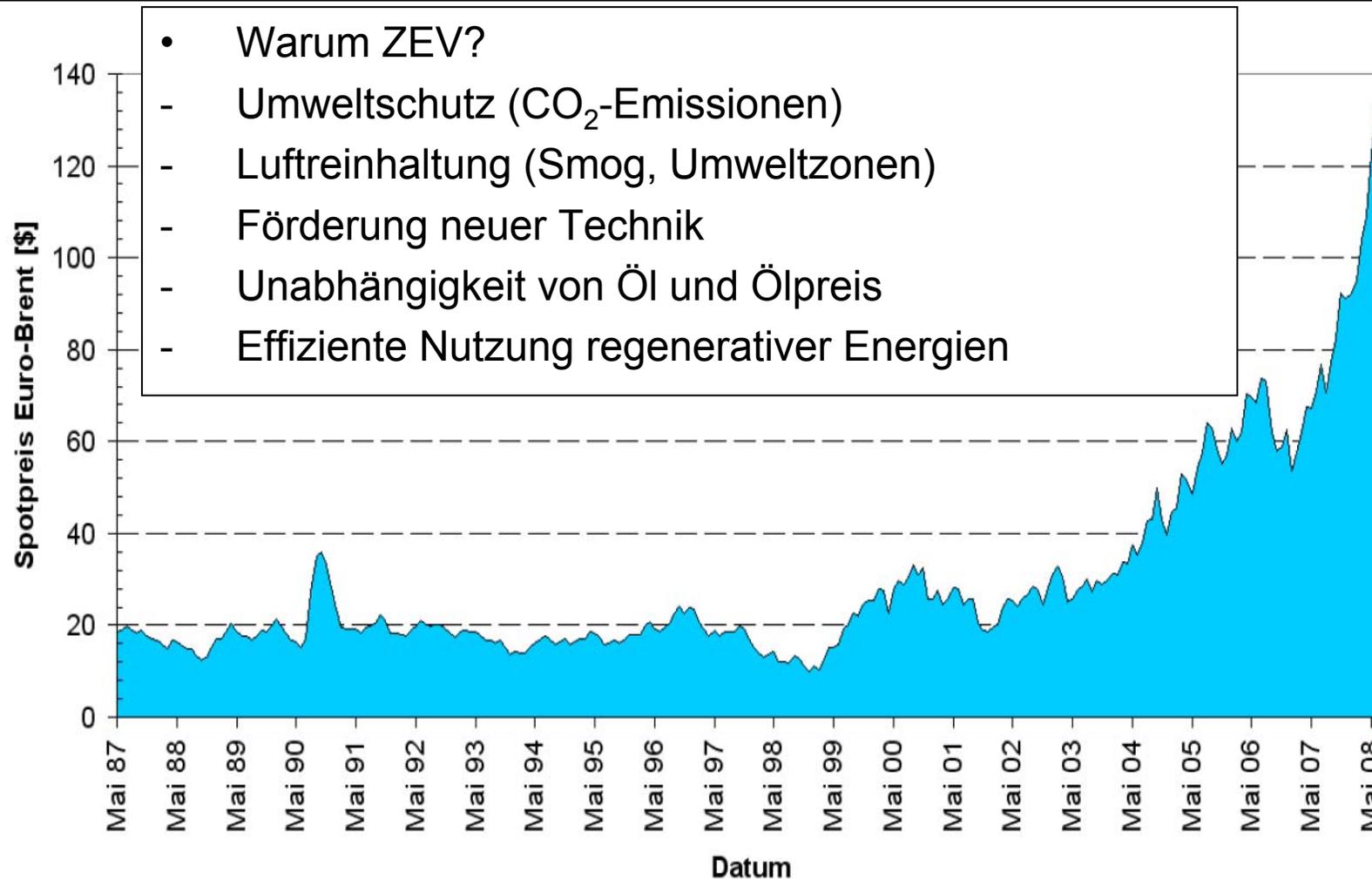


Zero Emission Vehicle – Gesetzgebung

- ZEV mit konventioneller Antriebstechnik / Abgasnachbehandlung nicht umsetzbar
- Möglichkeit der Anrechnung von Partial-Zero-Emission-Vehicle-Credits
 - Anteil kann auch mit SULEV II+ zertifizierten Fahrzeugen erfüllt werden



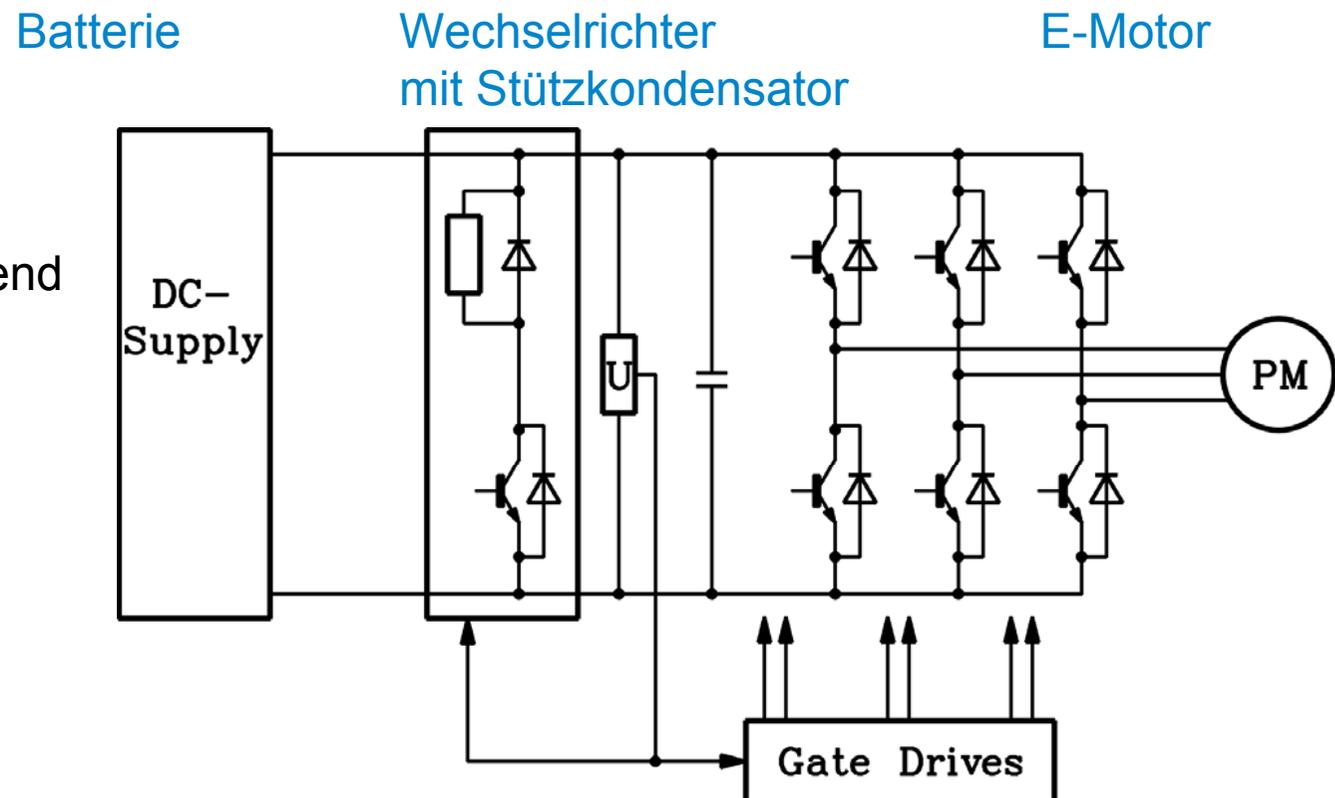
Zero Emission Vehicle – Motivation



Batteriebetriebene Fahrzeuge

System:

- a) Batterie
- b) Wechselrichter
- c) E-Motor
- d) Getriebe untersetzend
- e) Rad
- f) Fahrbahn



Antriebsvarianten für ZEV

Vorgaben und Zielgrößen

- **Beispiel-Anforderungen an ein Zero-Emission-Fahrzeug:**
- **Gesetzlich** geforderte Reichweite im FTP-72 Fahrzyklus 100 Meilen
=> **110 Meilen** (177 km) **Reichweite** als Zielwert im Zyklus FTP-72
- Vorgaben im Beispiel:
 - **7 Sekunden Sprint Null auf 100 km/h**
 - **Merkmal für sportliches Fahren**
 - **vgl. VW Golf GTI, Tesla Roadster**
 - **Kurzzeitige Höchstgeschwindigkeit 150 km/h**
 - keine Langstrecken-Limousine für Autobahnfahrten,
 - eher Pendlerfahrzeug für Stadtverkehr
 - Annahme **Fahrzeugleergewicht 900kg**
 - vergleichbar mit *Smart fortwo*
 - Luftwiderstand $c_w A = 0.5$ (vergleichbar *Smart Roadster*)

TESLA Roadster (USA)

- Lithium-Ionen-Batterien:

 - 6381 Zellen = 11 Serienmodule

 - 1 Modul = 9 Serienbausteine

 - 1 Baustein = 69 Parallelzellen

- max. Drehmoment 271 Nm

- max. Leistung 185 kW

- Sportfahrzeug

- 1.2 Tonnen Leermasse

- 0 ... 100 km/h in 4 Sekunden

- max. 200 km/h (125 mph)

- max. Motordrehzahl: 13000/min

- Käfigläufer-Asynchronmotor



- Reichweite: 392 km im kombinierten EPA-Testzyklus bei 45 kWh Batterieenergie

- 3.5 h Ladezeit

- Lebensdauer 500 Zyklen: $500 \times 392 = 200000$ km

Tesla Roadster (Quelle: <http://www.teslamotors.com/>)

Lightning GT (UK)

- Lithium-Ionen-Batterien:
(*AltairNano*: „NanoSafe“)
Nano-Titanat-Technologie statt Graphit
- max. Leistung 552 kW
- Sportfahrzeug
- Kohlefaser-Kevlar-
Verbundkarosserie
- 0 ... 100 km/h in 4 Sekunden
- max. 210 km/h
- 4 PM-Synchronmotoren als
brushless-DC Radnabenmotoren
($P_N = 120$ kW je Motor),
PML Flightlink Ltd.



- Reichweite: 415 km bei voll geladener
Batterie
- 10 min. Schnell-Ladung: 155 km Reichweite
- Lebensdauer: Nach 15000 Zyklen: 85% der
Neu-Kapazität

Quelle: *Lightning Car Company, UK*

Praxisorientierte Projektierung elektrischer Antriebe (PPEA) - Elektroautos



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

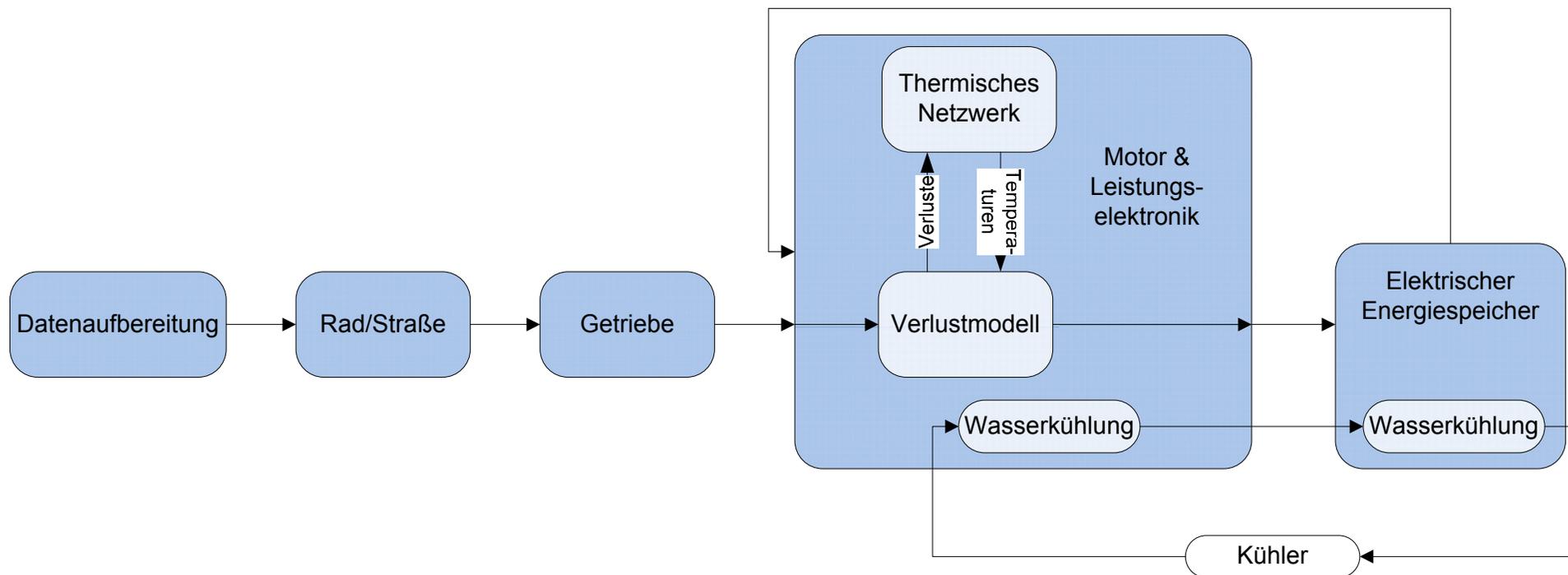
Elektro-Automobile - Antriebskomponenten



Antriebsvarianten für ZEV

Simulation – Simulations-Modell

- Simulations-Modell in *Matlab Simulink* umgesetzt

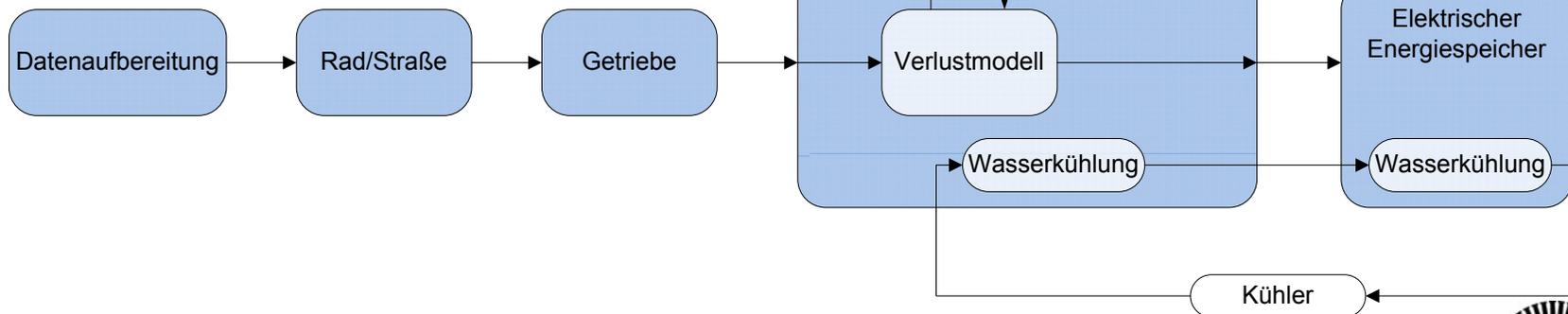
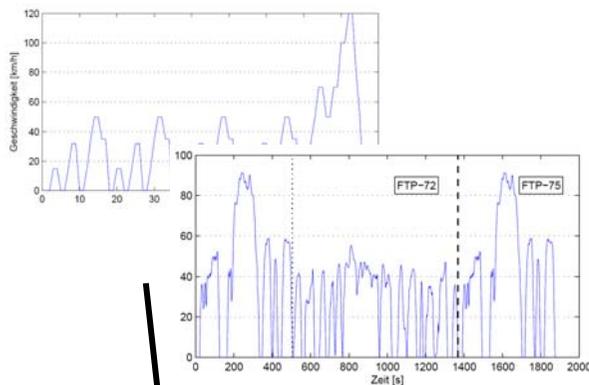


Fahrzyklen für ZEV

Simulation – Simulations-Modell

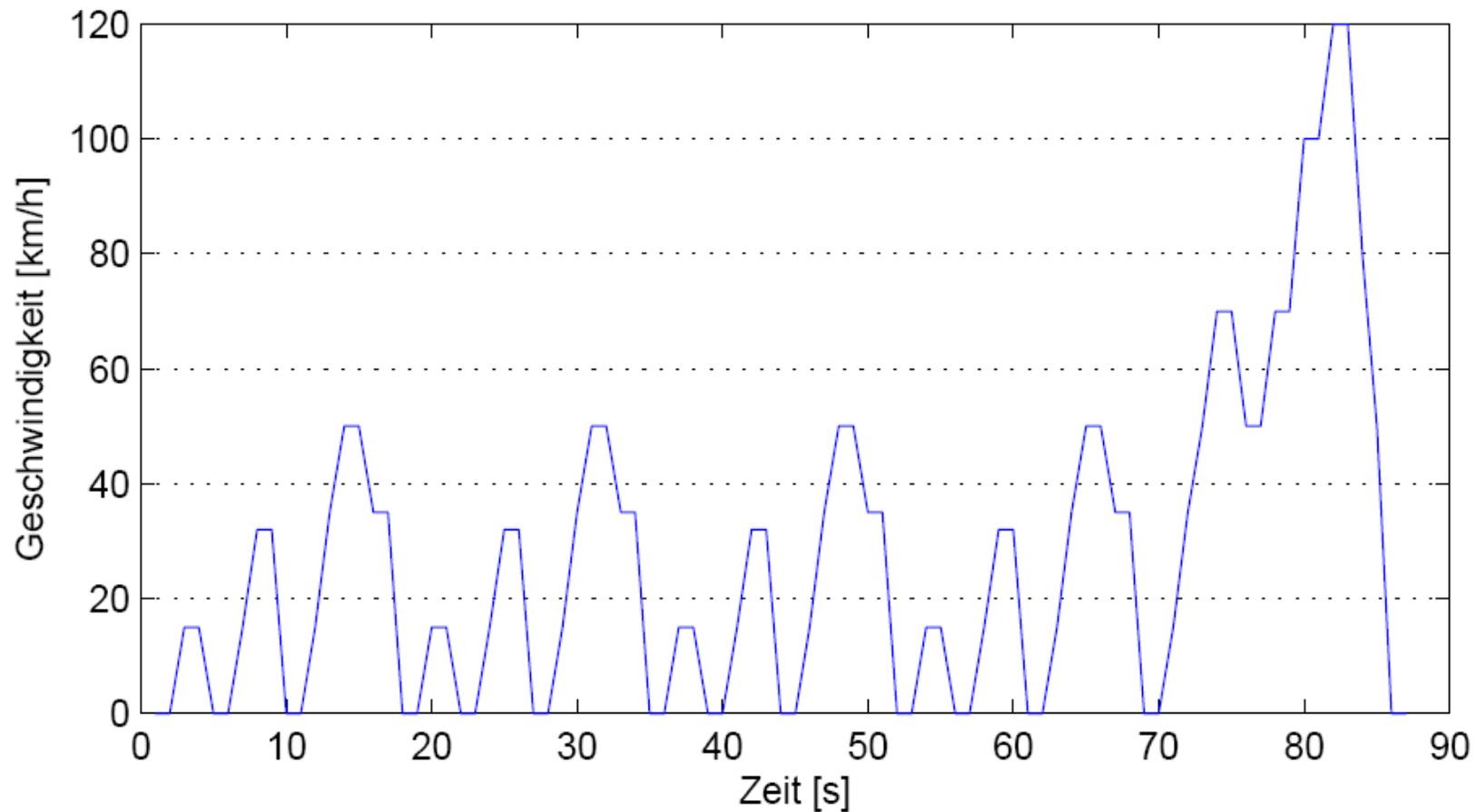
Fahrzyklen

z.B. NEFZ, FTP-72, FTP-75



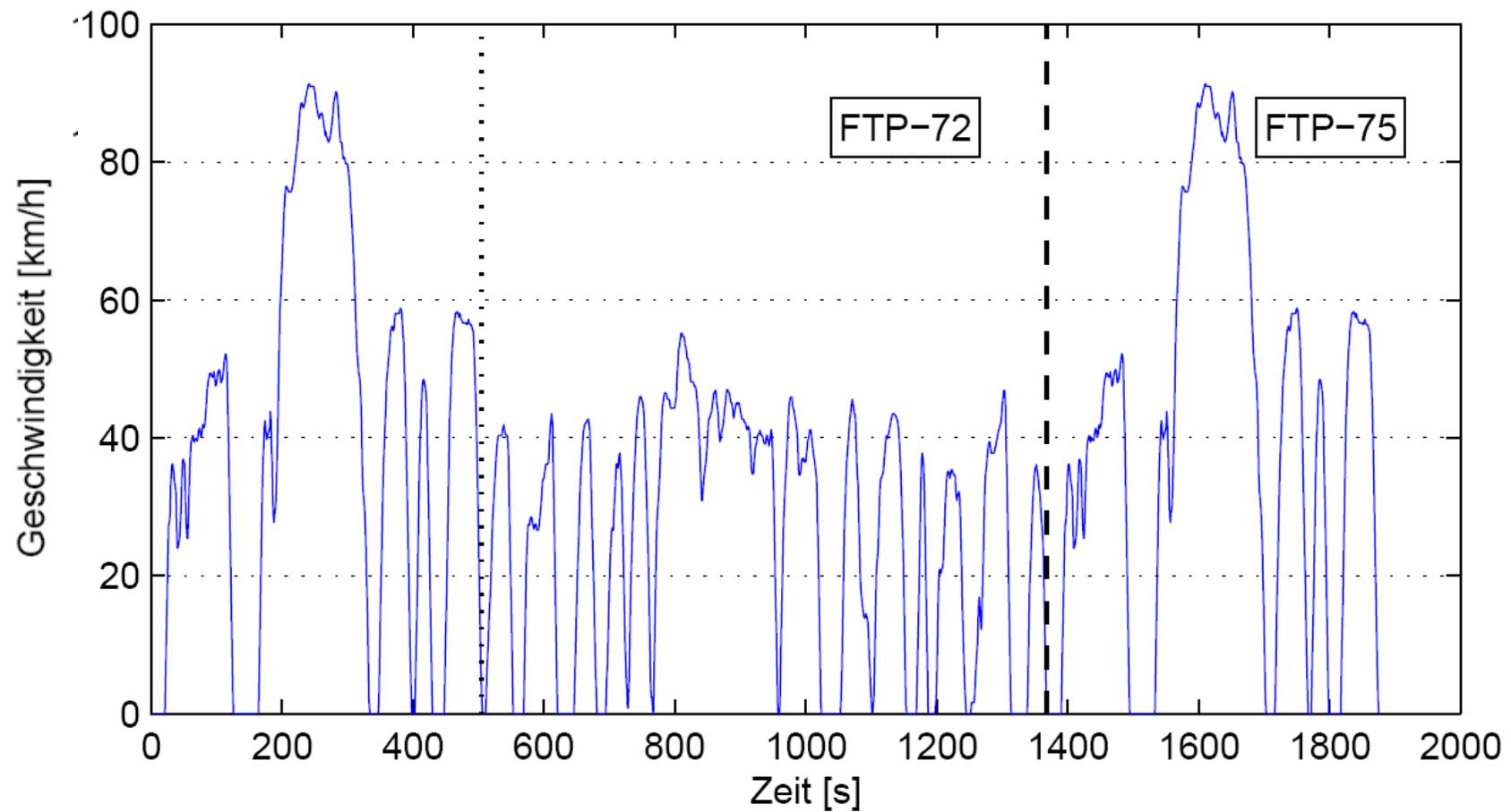
Fahrzyklus NEFZ

Fahrzyklus: NEFZ: Neuer europäischer Fahrzyklus

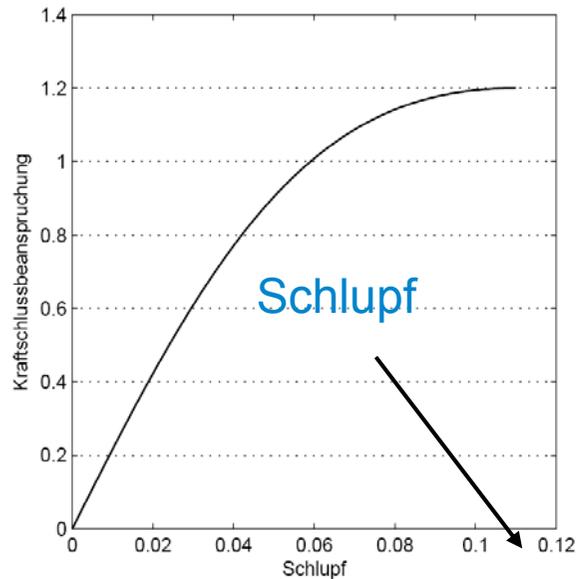


Fahrzyklus FTP-72, FTP-75

Fahrzyklen FTP-72, FTP-75

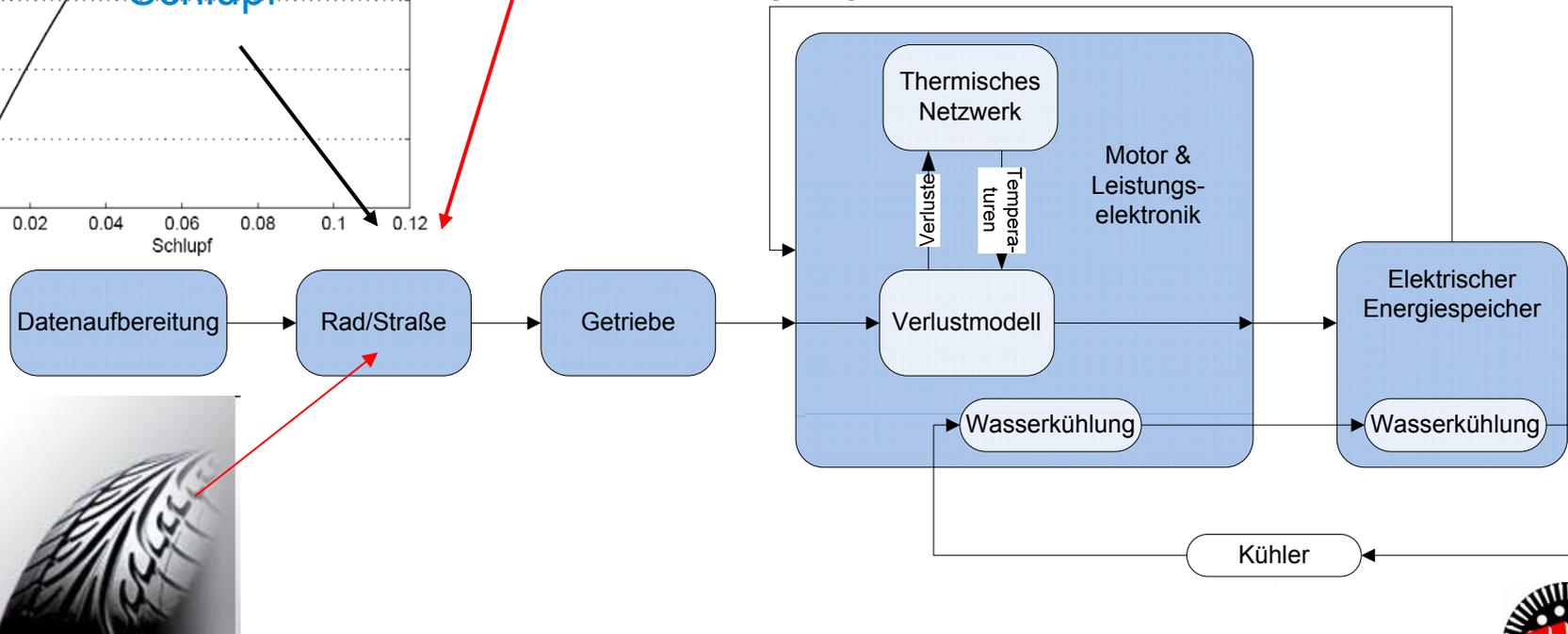


Fahrwiderstände Simulation – Rad / Straße



- Fahrwiderstände:

- Rollwiderstand
- Luftwiderstand
- Beschleunigungswiderstand
- Steigungswiderstand

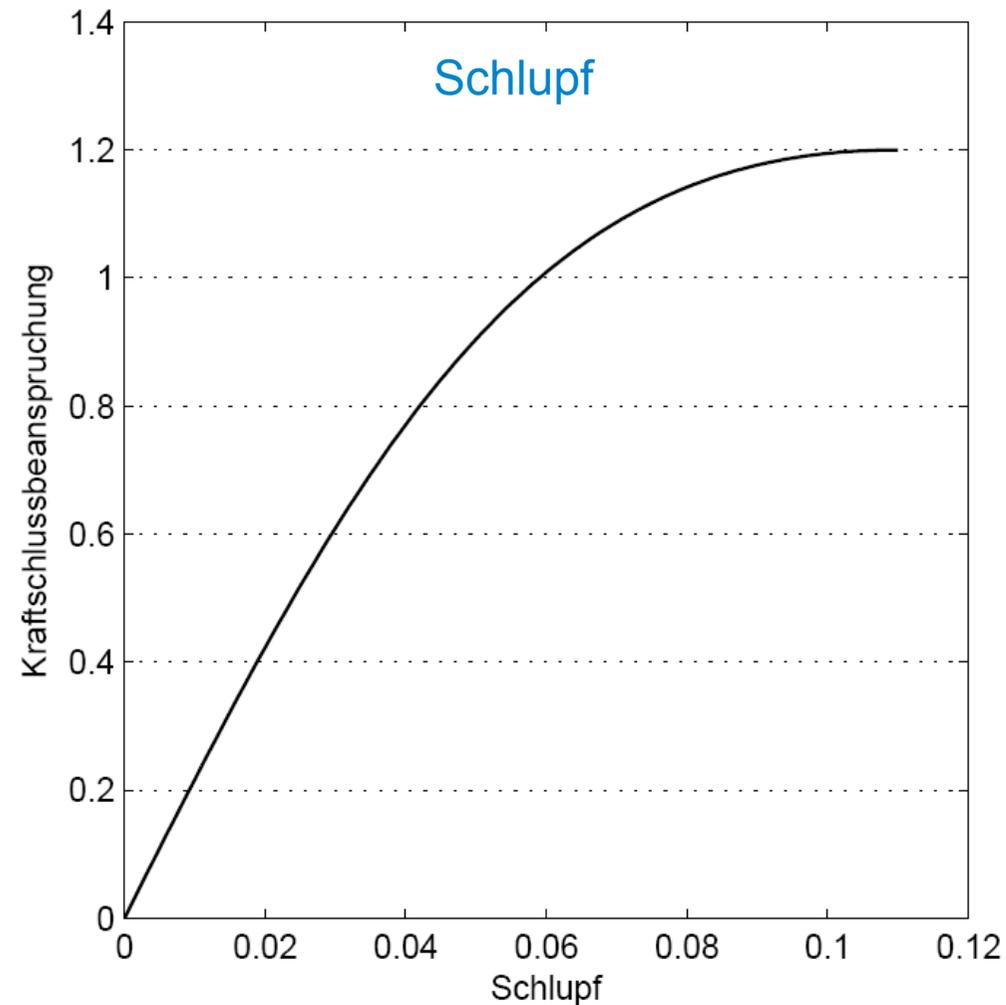


Schlupf zwischen Rad und Fahrbahn Simulation – Rad / Straße



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

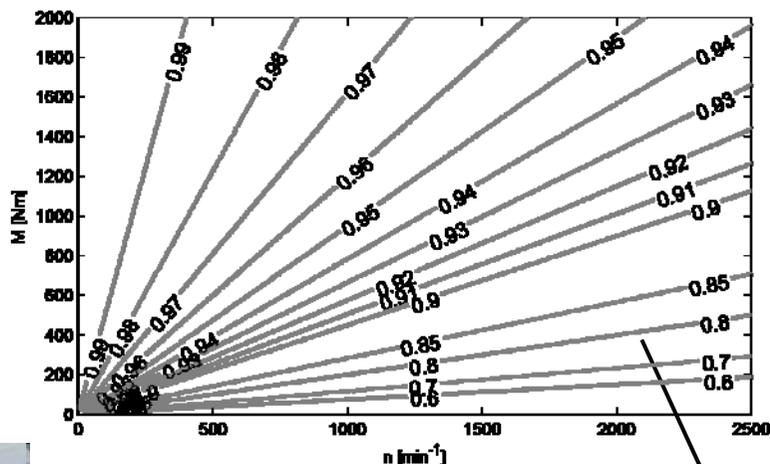
- Ohne Schlupf keine Kraftübertragung auf die Fahrbahn, sondern nur „reines“ Rollen!



Einstufiges Getriebe zwischen Rad und E-Motor



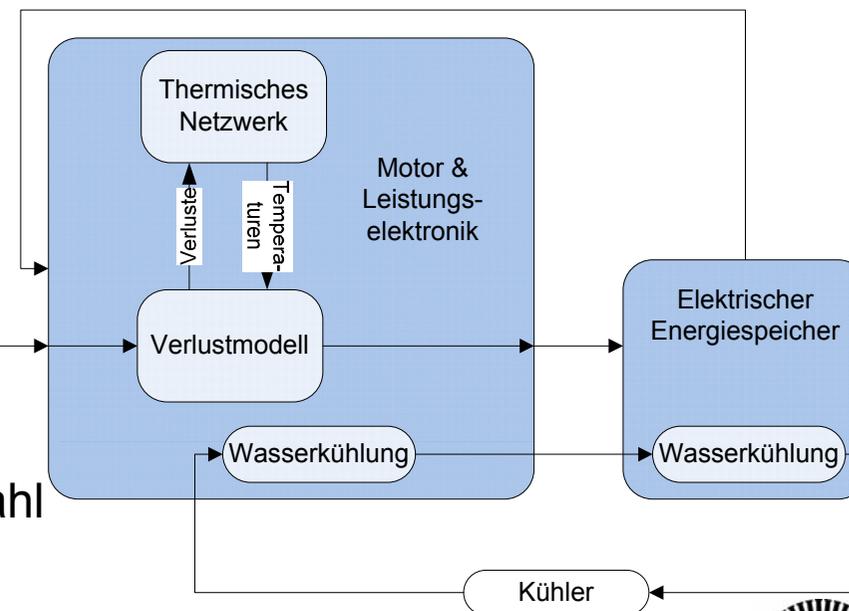
- Getriebewirkungsgrad



Einstufiges
Untersetzungsgetriebe

$$i = 8$$

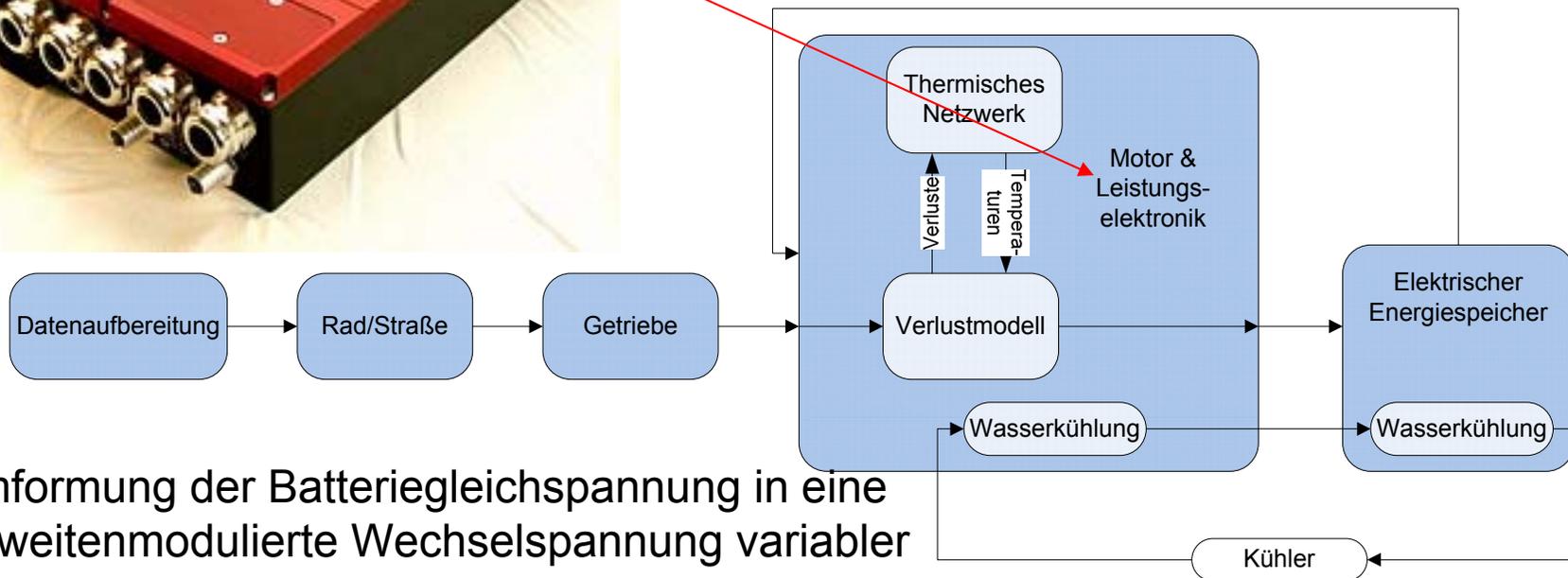
Ab ca. $i = 10$ zweistufiges
Getriebe nötig!



- Niedrige Raddrehzahl, hohe E-Motordrehzahl
- Hohe Motordrehzahl = kleiner E-Motor



Leistungselektronischer Steller (Wechselrichter)



- Umformung der Batteriegleichspannung in eine pulsweitenmodulierte Wechselspannung variabler Frequenz

- Variable Frequenz = veränderbare Motordrehzahl

Beispiel: Wechselrichter Brusa

- *Brusa DMC524* Drehstrom-Umrichter für automobiler Anwendungen
 - 480 V Zwischenkreis-Gleichspannung
 - 600 V IGBTs
 - 80kW Dauerleistung
- Modell zur Berechnung der Schalt- und Durchlassverluste für Dioden und Transistoren
- Für Simulation: z. B.
Bordnetz-Leistung =
= 150 W konstante Leistung



Beispiel: Wechselrichter Brusa

Elektrische Eigenschaften	
Minimale Versorgungsspannung für vollen Ausgangsstrom [V]	200
Maximale Versorgungsspannung im Betrieb [V]	480
Überspannungsabschaltung [V]	500
Maximall zulässige Überspannung [V]	520
Dauerstrom, effektiv [A]	225
Repetitiver Maximalstrom, effektiv, 30s 100%, 90s 50% [A]	300
Dauerleistung [kW]	80
Maximale Leistung [kW]	106
PWM Frequenz (symmetrische Modulation) [kHz]	24
Mechanische Eigenschaften	
Höhe [mm]	88
Breite [mm]	240
Länge [mm]	360
Volumen [cm ³]	7600
Gewicht (ohne Kühlwasser) [kg]	9.5
Umgebungstemperatur für Betrieb [°C]	-40...+85



Beispiel: Wechselrichter – Conti Temic

▪ Technische Daten IGBT-WR

Maximalstrom I_{max}	250 A
Zwischenkreisspannung U_{DC}	110 - 370 V
Schaltfrequenz f_{Schalt}	8 kHz
Masse m_{WR}	10 kg
Kühlmitteldurchfluss \dot{V}	8 l/min
Kühlmittel-Vorlauftemperatur ϑ_{VL}	85 °C
Zwischenkreiskondensator C_{ZK}	2 mF
Zwischenkreiswiderstand R_{ZK}	1 mΩ

Wechselrichter



▪ Verlustgruppen

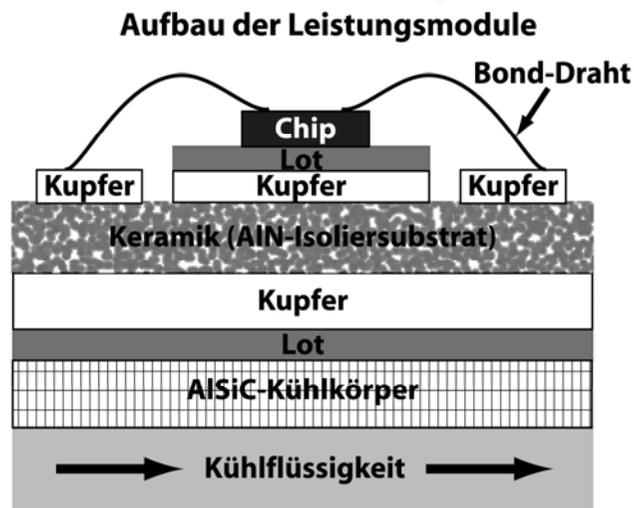
Verluste	IGBT	Diode
Statische Verluste		
Durchlass-Verluste P_D	x	x
Sperr-Verluste P_{Sperr}	(X)	(X)
Schaltverluste		
Anschalt-Verluste P_{ON}	x	(x)
Ausschalt-Verluste P_{OFF}	x	X
Ansteuer-Verluste P_{Steuer}	x	x

Wechselrichter – Erwärmung

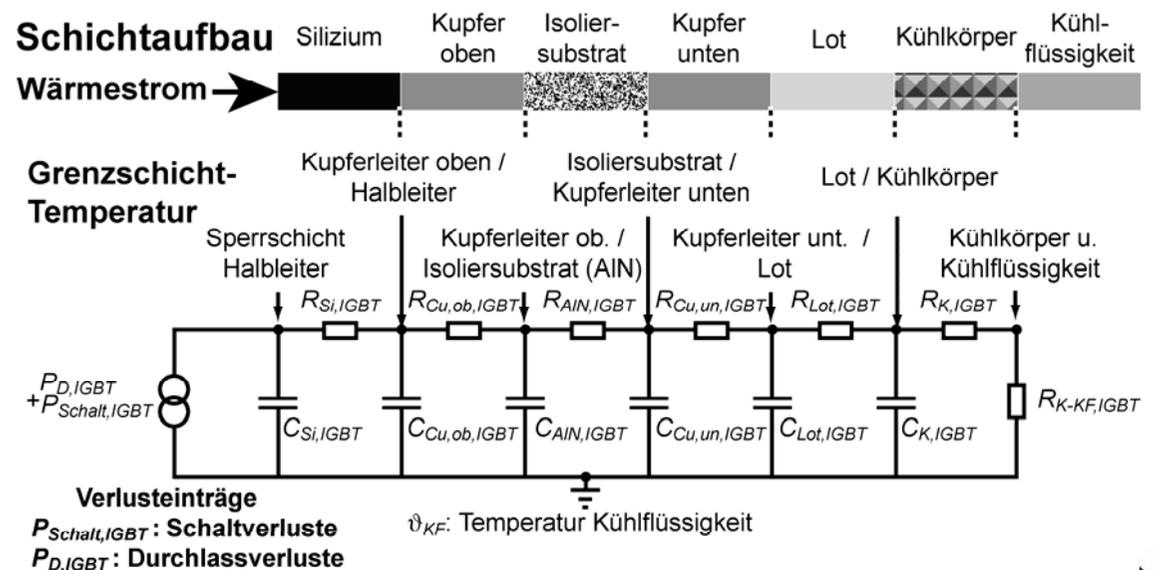
▪ Modellierung

- RC-Netzwerk (R : Wärmewiderstand, C : Wärmekapazität)
→ Dynamische Berechnung Temperaturen
- 6-Körper-Modell
- Analytische Berechnung R , C anhand Aufbau-Geometrie
- Keine thermische Kopplung zu benachbarten Leistungs-Halbleitern

▪ Aufbautechnologie



▪ Thermisches Ersatzschaltbild IGBT



Beispiel: PM-Synchronmaschine *Brusa*

- *Brusa Hybrid Synchronous Machine*
6.17.12
 - 40 kW Nennleistung, 85 Nm
Nenndrehmoment
 - Auf dem Markt erhältlich
 - von Hobby-Bastlern heute für
Elektroautos verwendet



Beispiel: PM-Synchronmaschine *Brusa* Nenndaten

Mechanische Eigenschaften	
Nutzenzahl Q	36
Polzahl	6
Nuten je Strang und Pol q	2

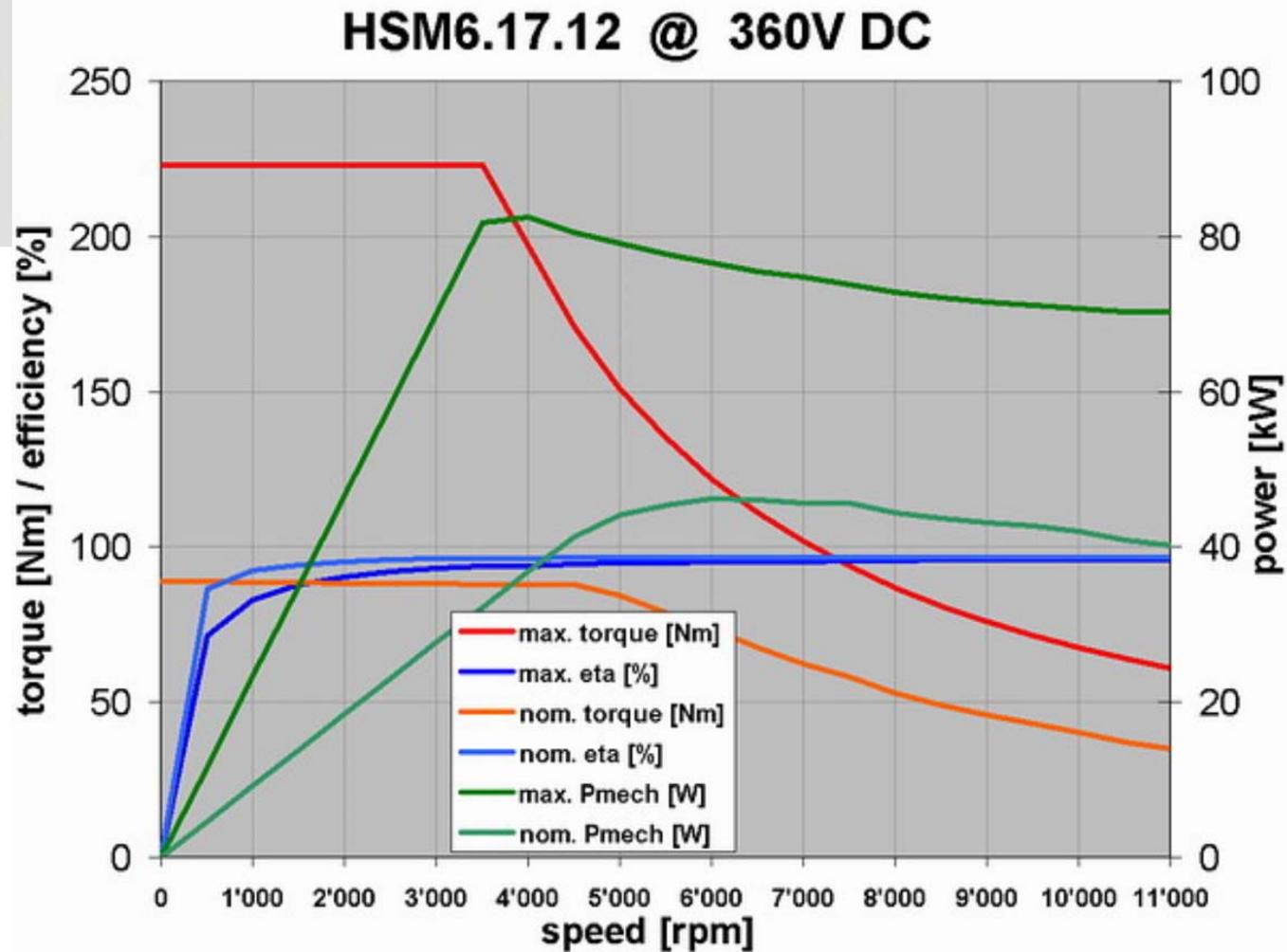
Elektrische Eigenschaften	
Nennleistung [kW]	40
Nenndrehzahl [1/min]	4500
Nenndrehmoment [Nm]	85
Nennstrom [A], Strang	96
Nennspannung [V], Strang	164
$\cos \varphi$	0,885
Wirkungsgrad η [%]	95,7
Verlustleistung [W]	1800



Beispiel: PM-Synchronmaschine *Brusa* Drehmoment-Leistungskurven



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Beispiel: PM-Synchronmaschine *Brusa*

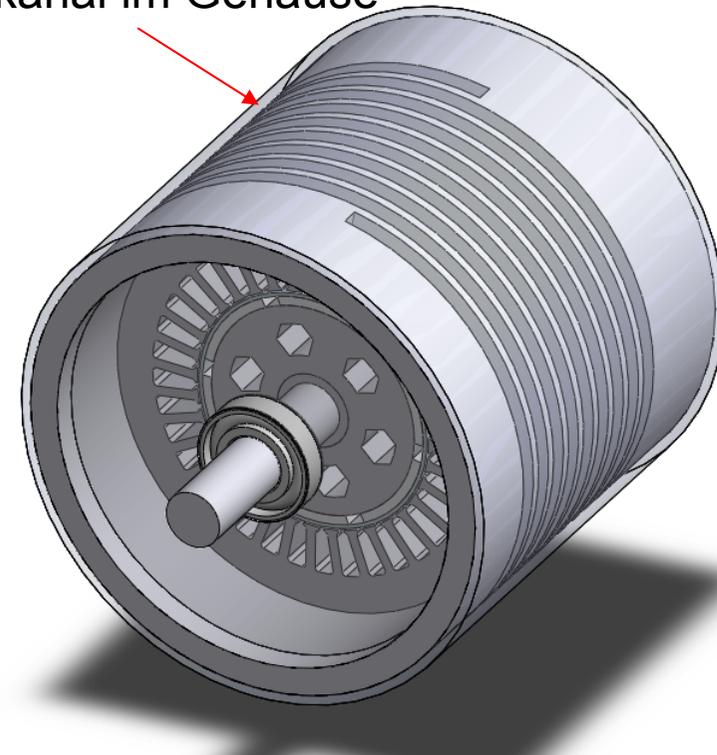
Hauptabmessungen (nachgerechnet)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

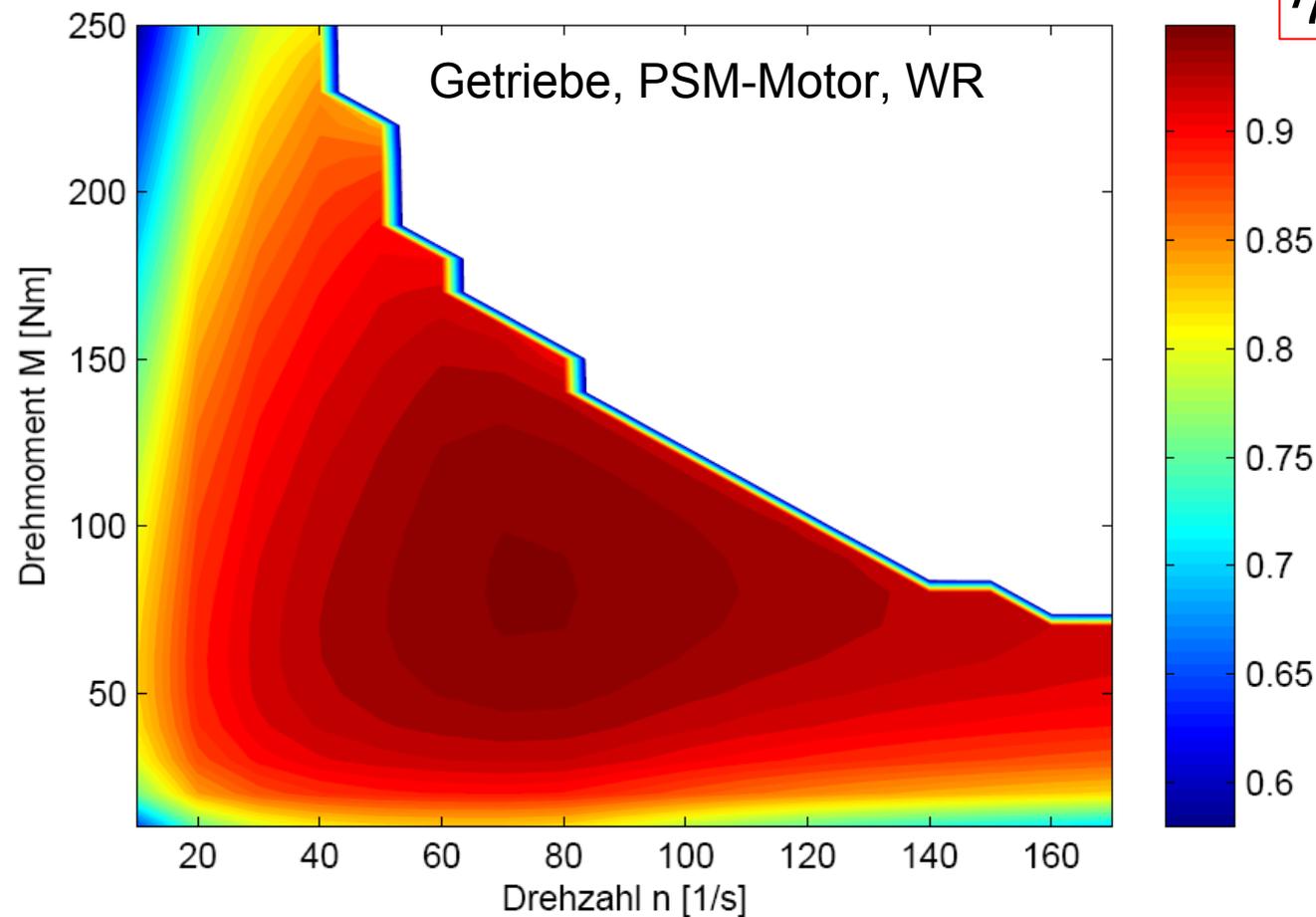
Flüssigkeitsmantelkühlung im
Spiralkanal im Gehäuse

Geometrische Eigenschaften	
Außenlänge [mm]	240
Durchmesser [mm]	260
Rotor-Durchmesser [mm]	114
Eisenlänge [mm]	120
Luftspalt [mm]	1
Bandage [mm]	2
Magnethöhe [mm]	5
Polbedeckung [%]	0,85



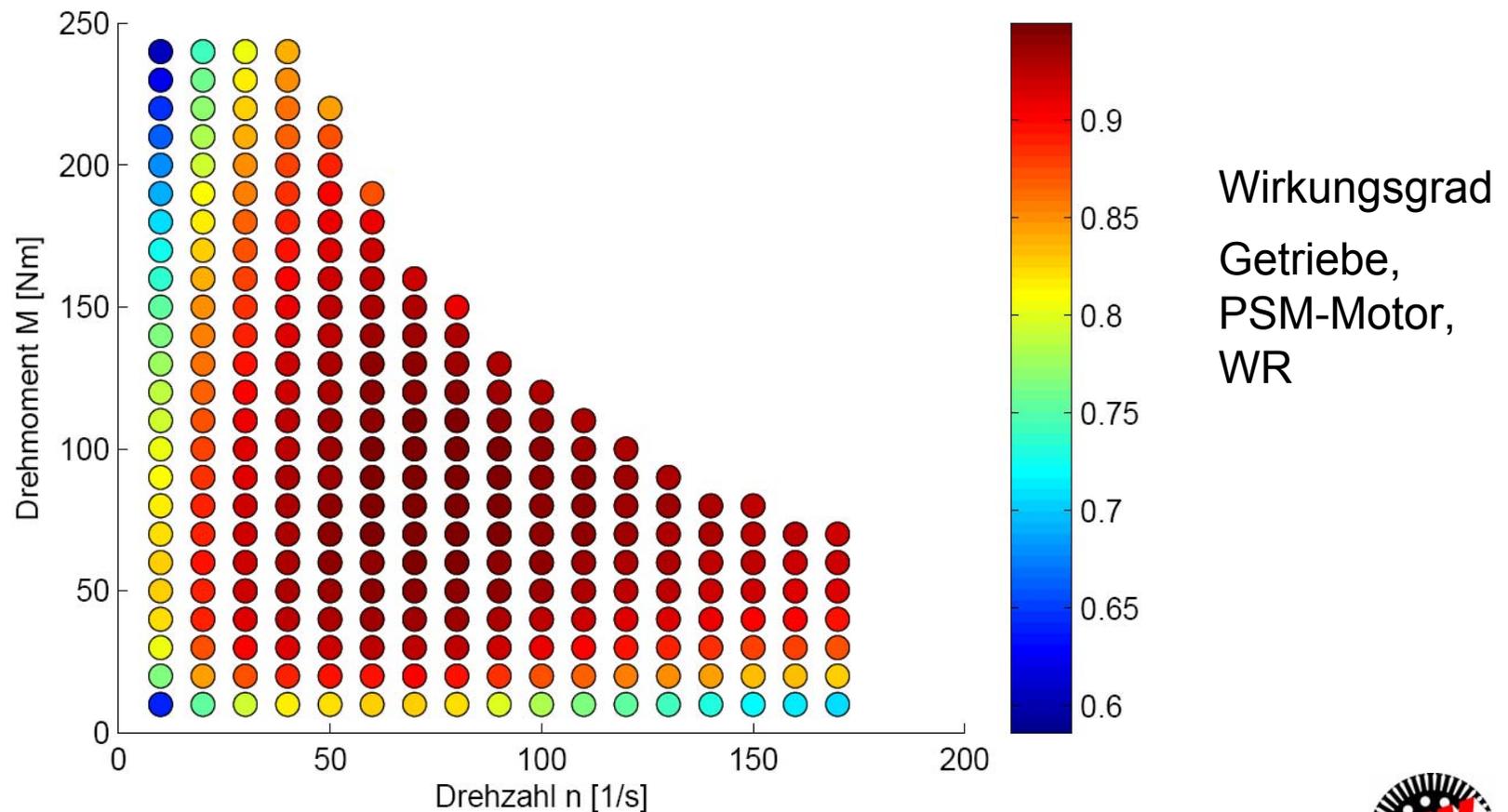
Beispiel: Wirkungsgrad des Antriebsstranges – E-Motor + WR + Getriebe, *Brusa*

Berechnetes Wirkungsgradkennfeld



Beispiel: Wirkungsgrad des Antriebsstranges – E-Motor + WR + Getriebe, *Brusa*

- Gerastertes Wirkungsgrad-Kennfeld
- Unterteilung in 10 Nm und 10 1/s Abstände



Beispiel: PM-Synchron- und Käfigläufer-Asynchronmaschinen (Daimler)

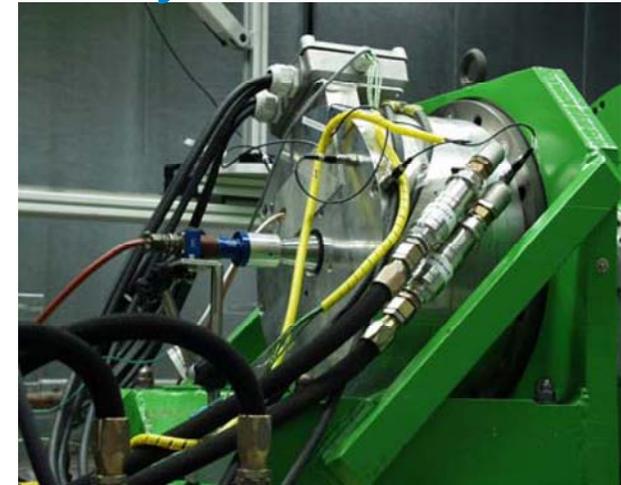


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Technische Daten Elektrische Maschinen

	PSM	ASM
Bemessungsleistung P_N	20,5 kW	15 kW
Maximalleistung P_{max}	42 kW	35 kW
Nenn-drehzahl n_N	1500 min ⁻¹	2765 min ⁻¹
Maximaldrehzahl n_{max}	6000 min ⁻¹	12500 min ⁻¹
Nenn-Drehmoment M_N	130 Nm	52 Nm
Maximal-Drehmoment M_{max}	270 Nm	120 Nm
Außendurchmesser $d_{s,a}$	286 mm	150 mm
Eisenlänge l_{fe}	95 mm	180 mm
Kühlmitteldurchfluss	8 l/min	8 l/min
Kühlmittel-Vorlauftemperatur	85 °C	85 °C
Wärmeklasse	H	H

PM-Synchronmaschine



Käfigläufer-Asynchronmaschine



Verlustgruppen bei PM-Synchron- und Käfigläufer-Asynchronmaschinen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

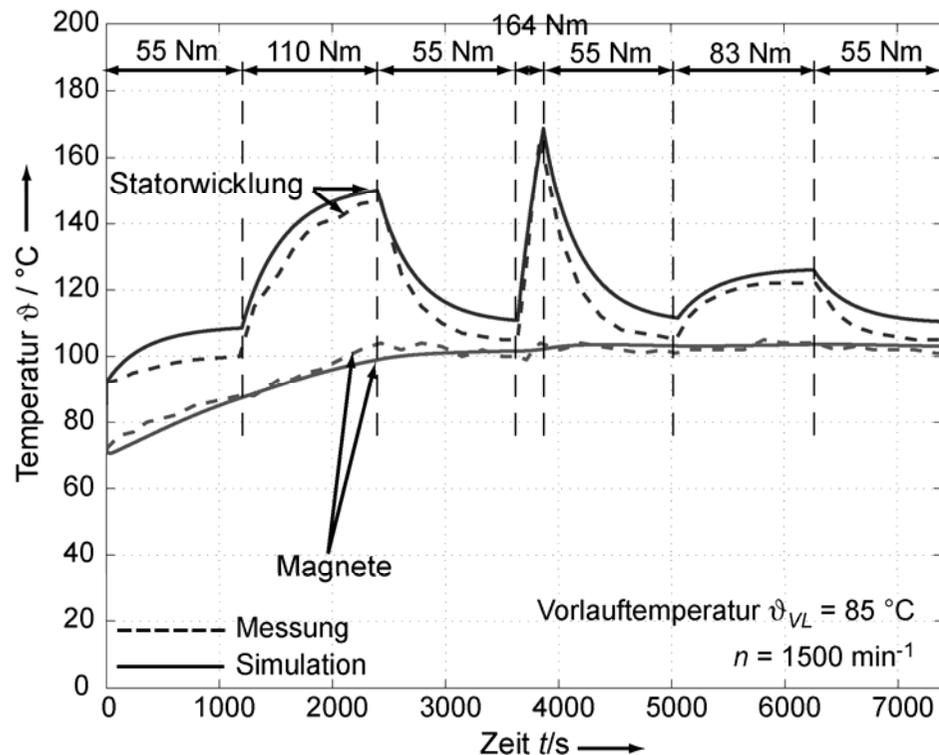
PM-Synchron-Maschine	Käfigläufer-Asynchron-Maschine
	Stator-Stromwärmeverluste
Stator-Stromwärmeverluste	Ummagnetisierungsverluste
Ummagnetisierungsverluste	Rotor-Stromwärmeverluste
Verluste in den Magneten und Läufer	Zusatzverluste bei Sinusstrombetrieb
Ventilations- u. Lagerreibungsverluste	Ventilations- u. Lagerreibungsverluste
WR-Zusatzverluste	WR-Zusatzverluste



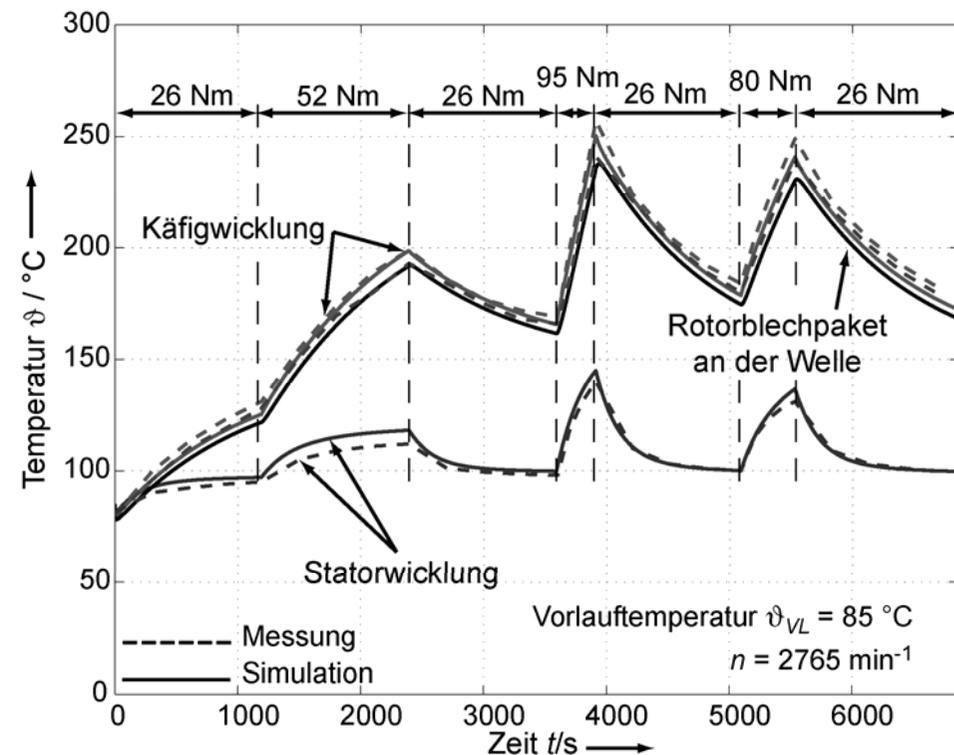
Erwärmung der PM-Synchron- und Käfigläufer-Asynchronmaschinen

- Vergleich Rechnung – Messung (Prüfstand) im Fahrspiel:
konstante Drehzahl, veränderliche Belastung

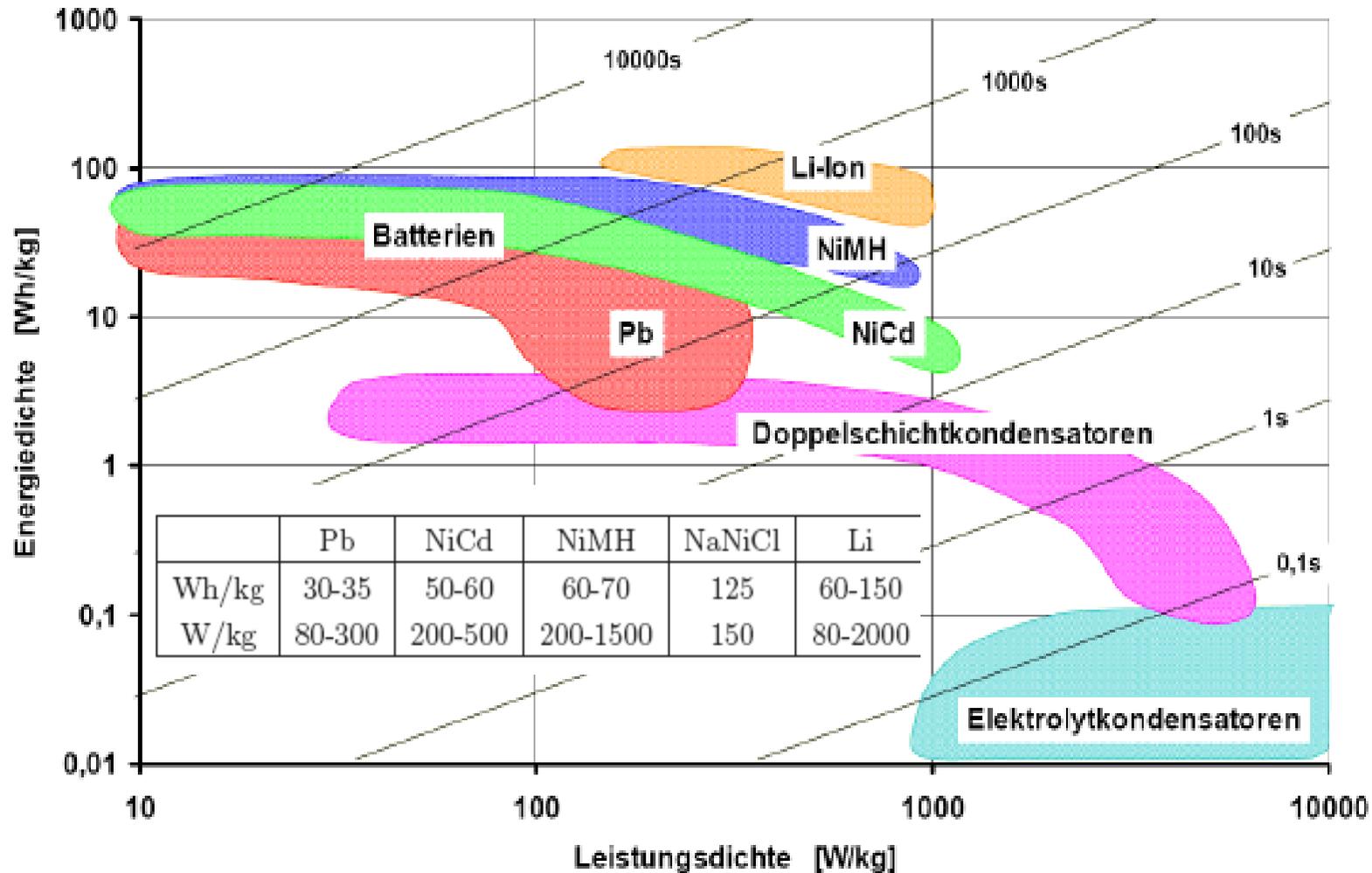
PM-Synchronmotor



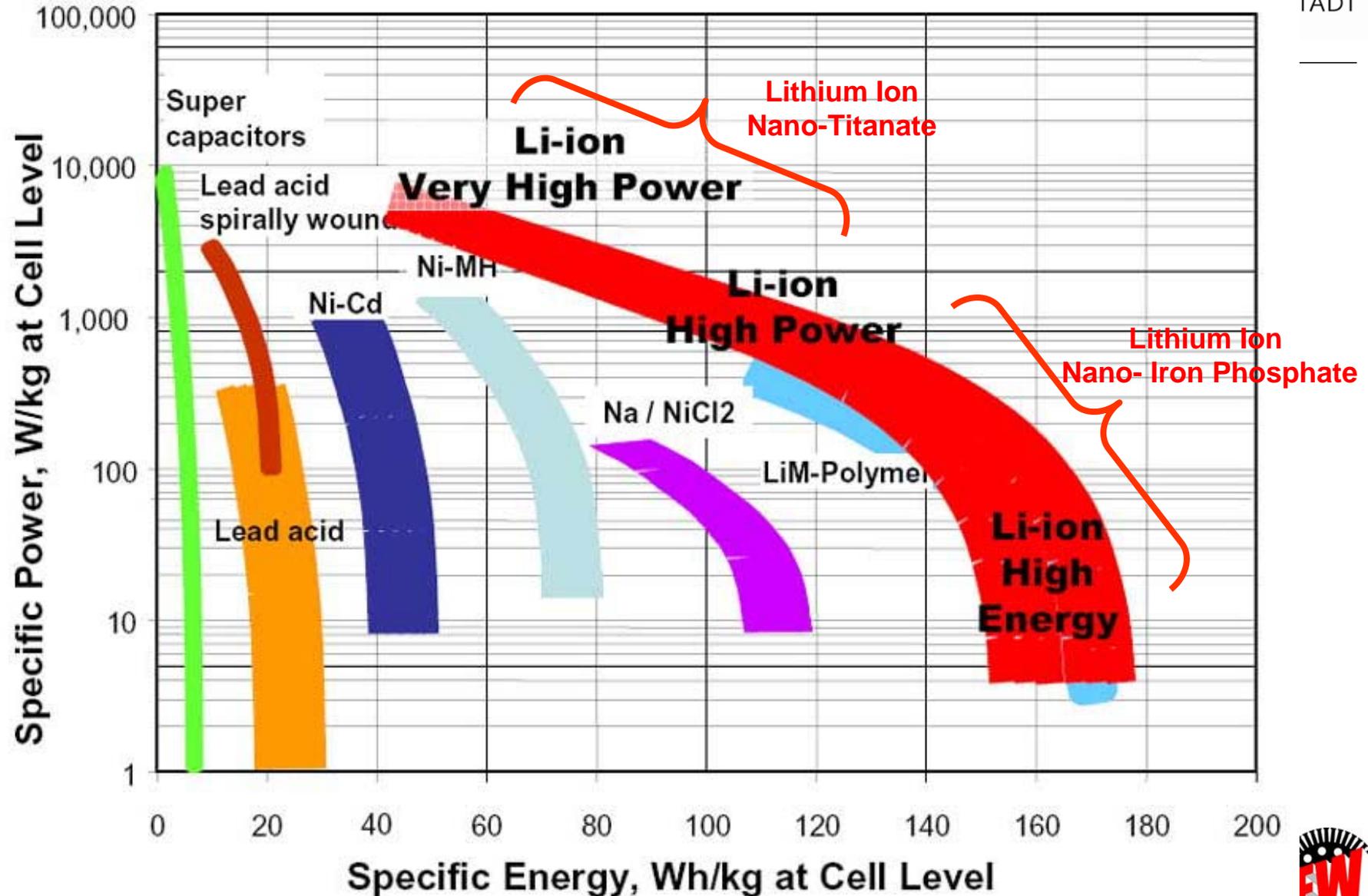
Käfigläufer-Asynchronmotor



Batterievarianten: *Ragone*-Diagramm



Batterievarianten: Energie- & Leistungsdichte



Bleibbatterien: VRLA (Valve-Regulated Lead Acid)

- designation for ‘maintenance-free lead-acid batteries’
- not really “sealed”, but vented for overpressure
- 2 types: Absorbed Glass Mat (AGM) or Gel battery
- use less electrolyte, less space than flooded designs
- high-rate power capacity (short duration)
- cost-effective, deep discharge, used in UPS systems
- 3-5 year life in heavy-duty vehicle service

Traditional choice
for Hybrid
Electric Transit
Vehicle Designs

Low Cost, rugged
and field-proven



Typical VRLA Batteries



VRLA Vehicle Battery Pack String

Can be combined
with UltraCaps
for greater power
cycling capacity

Lithium-Ionen (Li-Ionen) Batterien

- compact, light weight, highest power density
- safety issues with older tech: cell phone/laptop types
- new nano-titanate cells handle 20,000 recharging cycles
- fast charge – up to 80% in one minute
- long life claims – 10+ years;
- new technology – cost is 4-to-5 x VRLA cost, for same power
- price will decrease as technology matures

High power, mid-energy density



Li-Ion nano-titanate battery



“flat” wound cell
2.3 V 11 A-h

High energy, mid-power cycling



Li-Ion nano-iron phosphate battery



Spiral-wound cell
3.3 V 2.3 A-h

Daten von Li-Ionen-Batterien

Eigenschaft	Lithium- Ionen	Lithium- Polymer	Kokam
Leitfähigkeit (20 °C) [mS/cm]	2 – 5	0.05 – 0.5	0.05 – 0.5
Leerlaufspannung [V]	4.2	4.2	4.2
Nennspannung [V]	3.7	3.7	3.7
Entladeschlussspannung [V]	2.5	2.7	2.7
Energiedichte (Gewicht) [Wh/kg]	90 – 160	130 – 144	136
Energiedichte (Volumen) [Wh/l]	200 – 300	230 – 410	276
Leistungsdichte [W/kg]		300 – 1500	2700
Selbstentladung bei 20 °C [%/Monat]	5 – 10	2 – 8	2 – 8
Mögliche Zyklen	500 – 1200	500 – 1000	500 – 1000
Lagerfähigkeit [Jahre]	5 – 10	5 – 10	5 – 10

Beispiel: Lithium-Polymer-Zellen

Kokam SLPB 98188216

	1 Zelle	116er-Pack
Nennspannung [V]	3,7	429,2
Nennladungskapazität [Ah]	30	30
Maximaler Ladestrom [A]	30	30
Maximale Entladestrom [A]	600	600
Abschaltspannung [V]	2,7	313
Gewicht [kg]	~0,82	~95



- 116er-Pack: 116 Zellen in Serie für hohe Zwischenkreisspannung
- Beschränkung der Rekuperationsleistung auf maximal 14,6 kW
- Gewicht wird durch Packaging, Kühlung, Sensoren und Steuergeräte erhöht

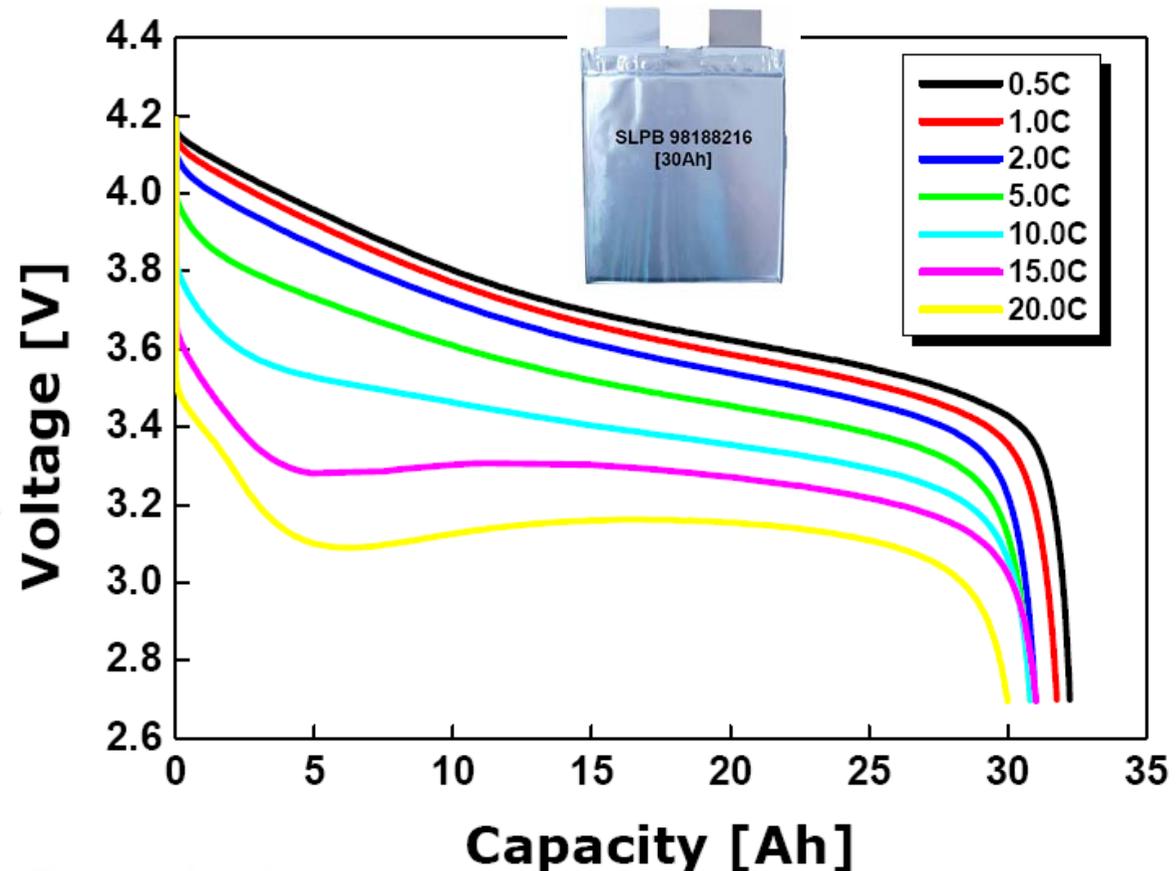
Li-Ionen-Batterien: Entladecharakteristik



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Berechnungsablauf:

1. Bestimmung von Batteriespannung und Batteriestrom
2. Berechnung der Verluste
3. Änderung des Ladezustandes
4. Rückführung der Zwischenkreisspannung zur Leistungselektronik



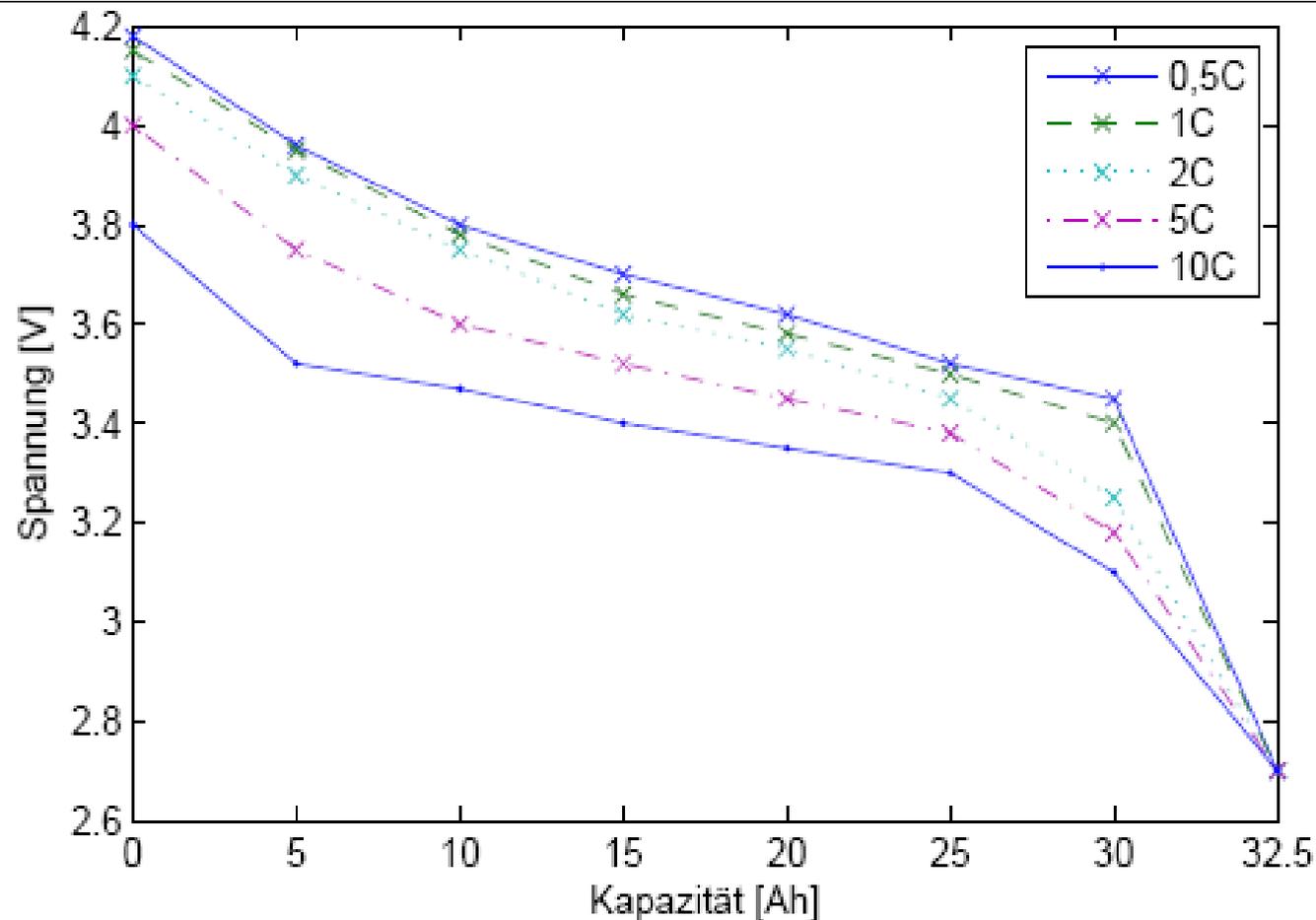
- Entladerate von 1,0C entspricht 30 A



Li-Ionen-Batterie *Kokam SLPB 98188216*: Entladecharakteristik



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



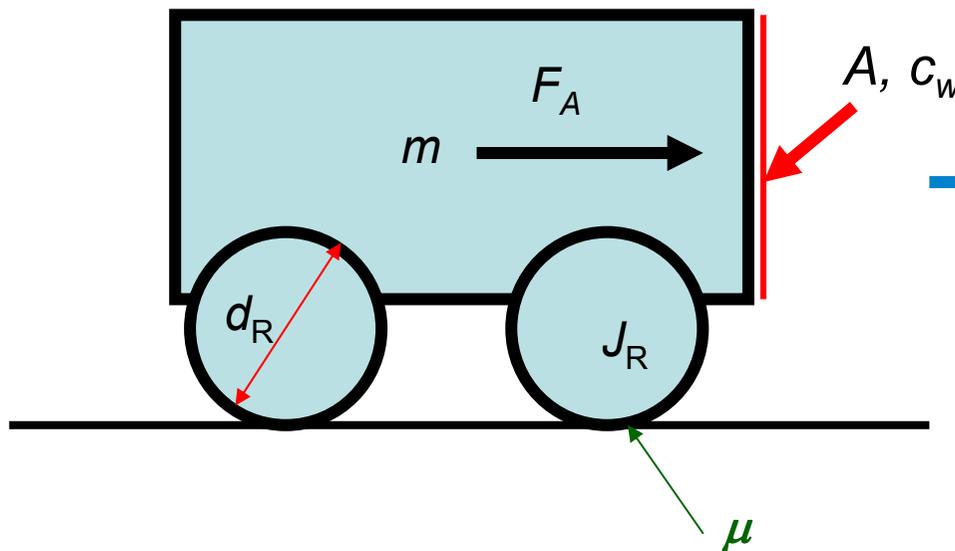
- Entladerate von 1,0C entspricht 30 A



Elektro-Automobile – Simulation

Fahrzeug - Fahrbahn

Modellierung des Fahrzeugs



A : Querspanfläche

c_w : Strömungswiderstandsbeiwert

d_R : Raddurchmesser

v : Fahrzeuggeschwindigkeit

v

μ : Kraftschlussbeiwert

m : Fahrzeugmasse

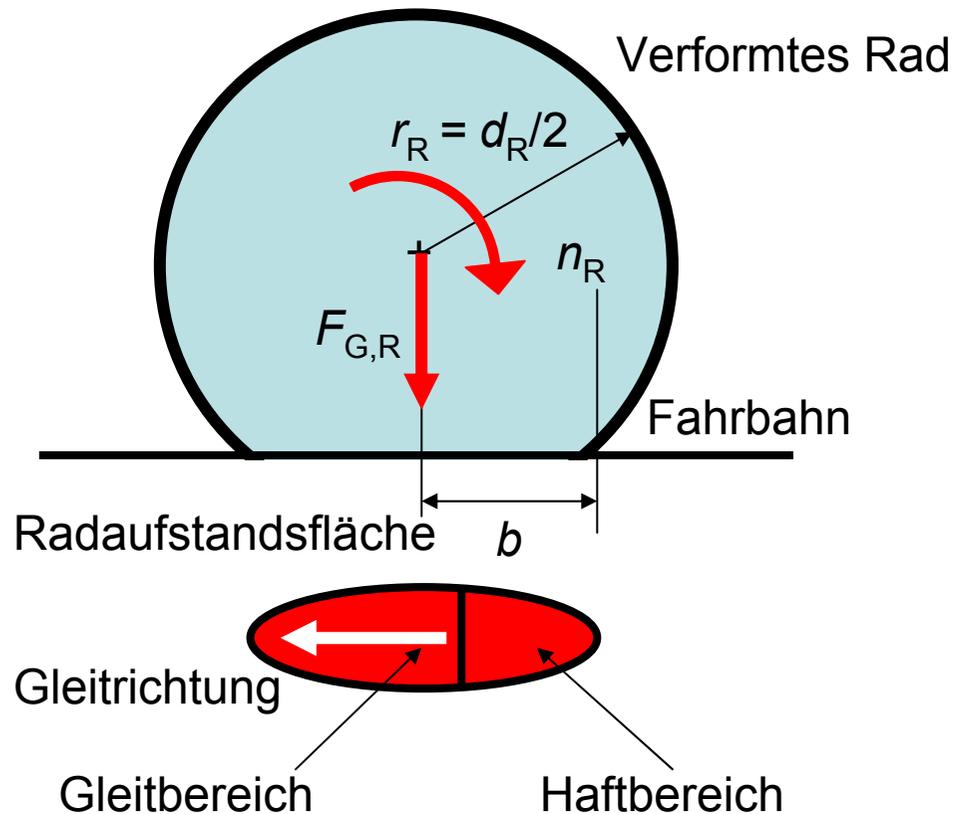
J_R : polares Radträgheitsmoment

P_A : Fahrleistung

F_A : Antriebskraft im Fahrzeug-
schwerpunkt

$$P_A = F_A \cdot v$$

Rad-Fahrbahn-Kontakt



$F_{G,R}$: Normalkraft je Rad

b : Großer Halbmesser der Verformungsellipse

z_R : Anzahl der Räder

g : Erdbeschleunigung

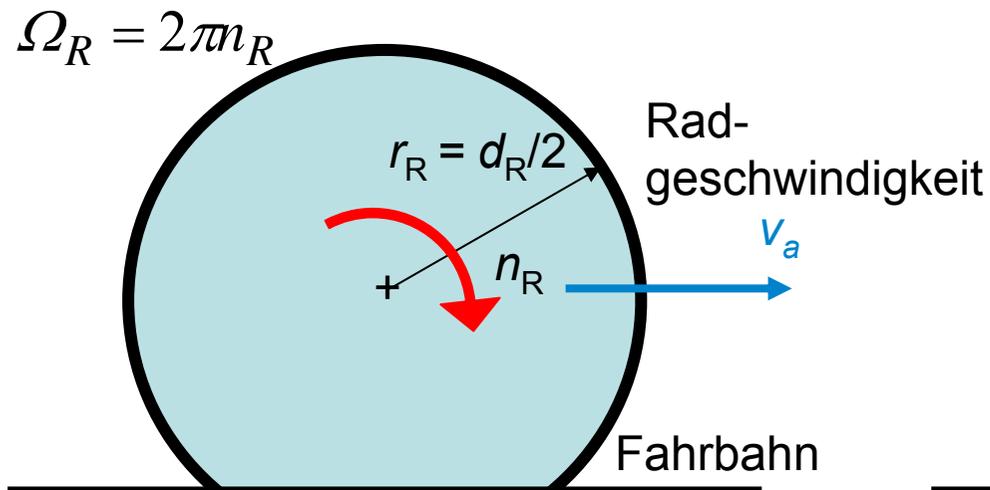
n_R : Raddrehzahl

$$F_{G,R} = m \cdot g / z_R$$

Radschlupf s

Rad mit Kraftübertragung

Schlupf s zwischen Rad und Fahrbahn



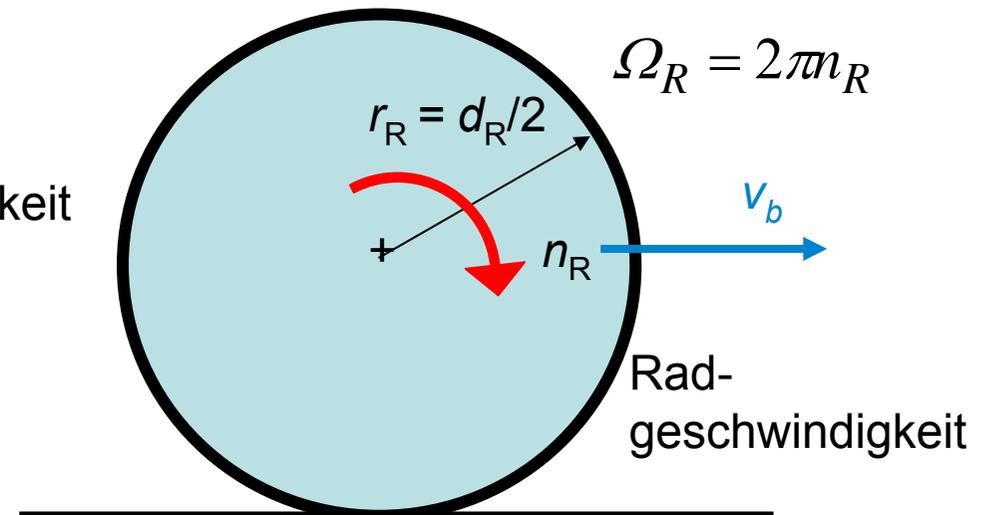
$$\Omega = v_a / r_R \quad s = (\Omega_R - \Omega) / \Omega_R$$

Radgeschwindigkeit v_a ist KLEINER
als Radumfangsgeschwindigkeit v_U

$$v_a < v_U = d_R \pi n_R$$

Rad OHNE Kraftübertragung

„rein rollendes“ Rad, Schlupf $s = 0$



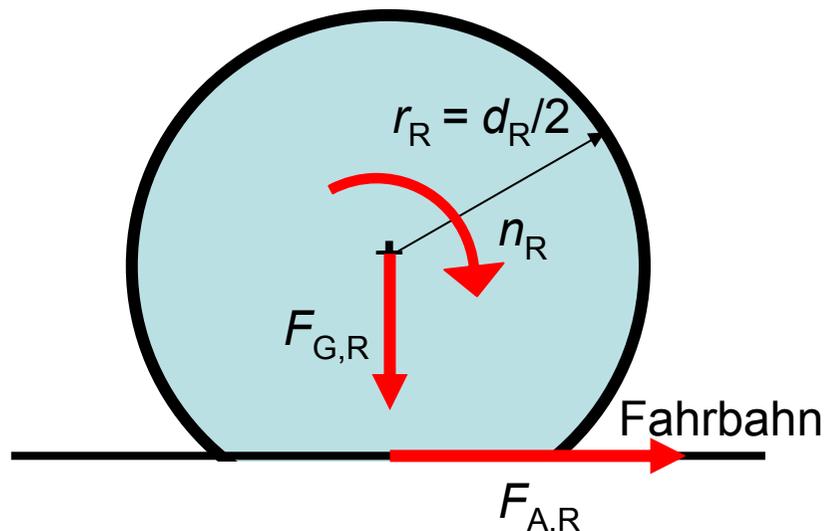
Radgeschwindigkeit $v_b =$
Radumfangsgeschwindigkeit v_U

$$v_b = v_U = d_R \pi n_R$$

Übertragbare Kraft F_A vom Rad auf die Fahrbahn



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Steigung $\tan \alpha$:

$$F_{N,R} = F_{G,R} \cdot \cos \alpha$$

Maximal auf die Fahrbahn übertragbare Antriebskraft je Rad:

$$F_{A,R,\max} = \mu(s) \cdot F_{N,R}$$

μ : Kraftschlussbeiwert

Damit die Antriebsräder nicht durchdrehen („Schleudern“):

$$F_{A,R} \leq F_{A,R,\max}$$

$z_{R,A}$: Anzahl der angetriebenen Räder

Maximal auf die Fahrbahn übertragbare Antriebskraft: $F_{A,\max} = z_{R,A} \cdot F_{A,R,\max}$

Bedingung gegen Schleudern: $F_A \leq F_{A,\max}$



Schlupf zwischen Rad und Fahrbahn

Simulation – Rad / Straße



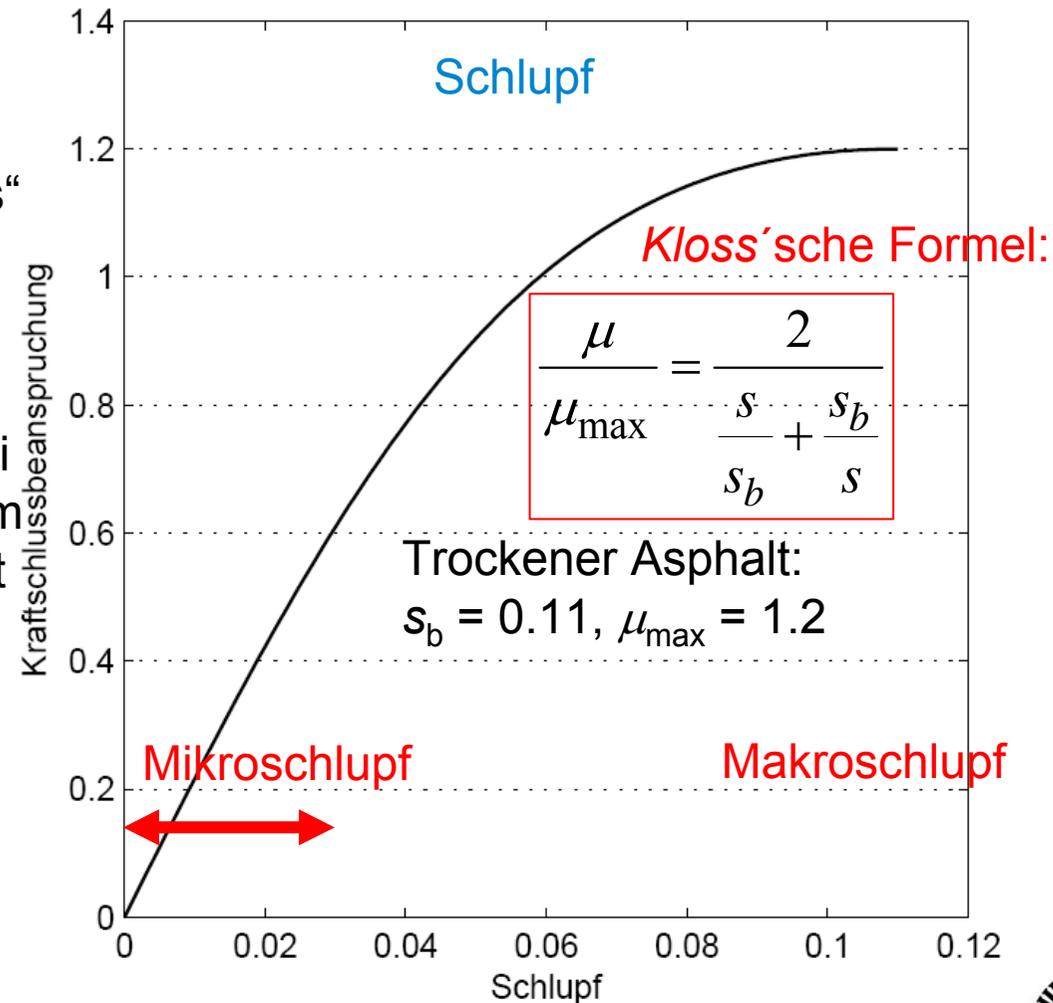
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

-Ohne Schlupf keine Kraftübertragung auf die Fahrbahn, sondern nur „reines“ Rollen!

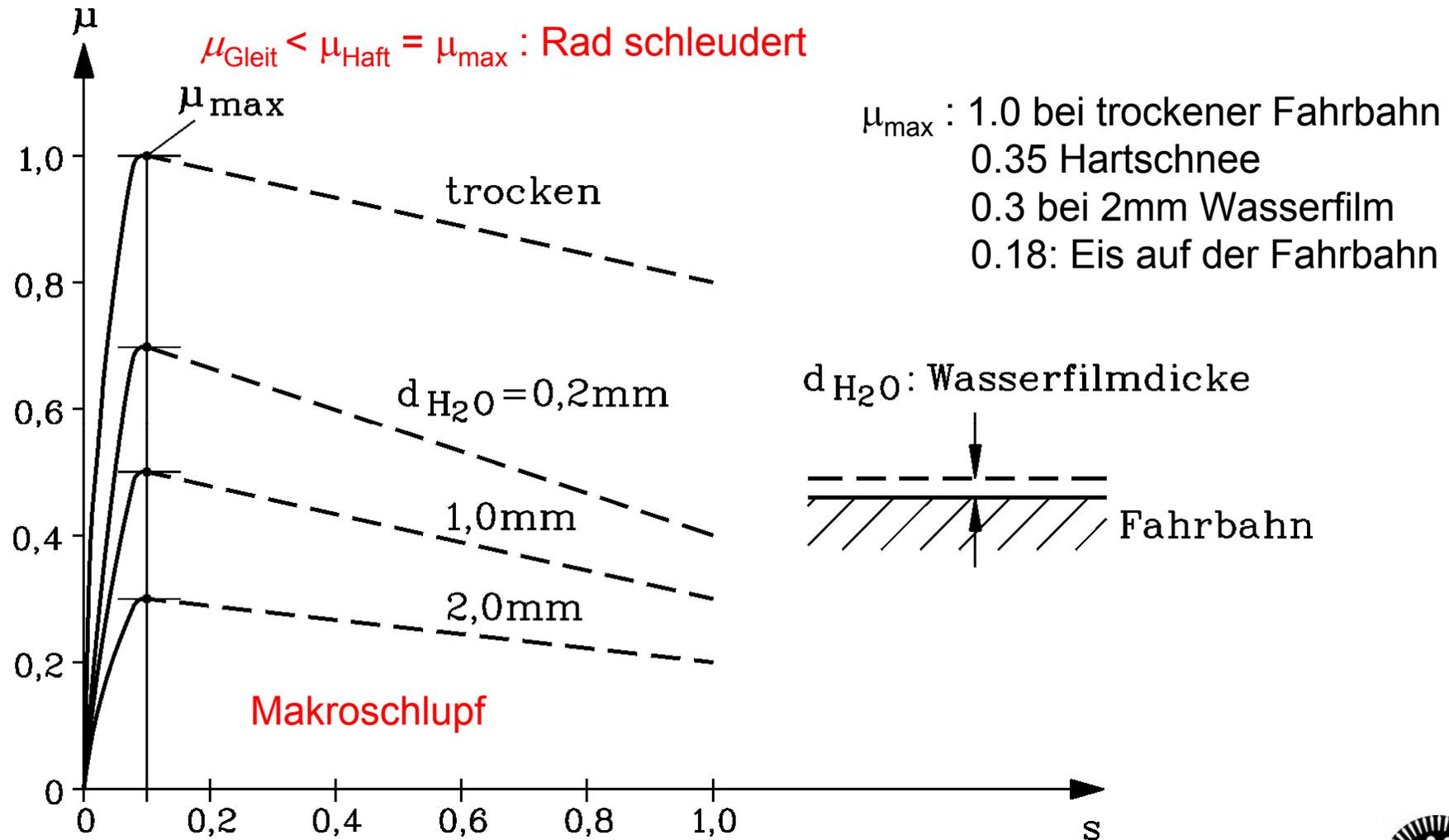
- Bei trockener Asphalt-Fahrbahn und sehr guter Haftung (Sommerreifen) ist bei etwa Schlupf 0.1 das Maximum des **Kraftschlussbeiwerts** μ mit ca. 1.2 erreicht.

- **Mikroschlupf** bis ca. 3%:
Fahren mit konstanter
Geschwindigkeit

- **Makroschlupf**: > 10%: Be-
schleunigen



Kraftschlussbeiwert μ und Radschlupf s



Kraftschlussbeiwert vs. Schlupf

Kloss'sche Formel:

$$\frac{\mu}{\mu_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_b} + \frac{s_b}{s}}$$

Trockener Asphalt:

$$s_b = 0.11, \mu_{\max} = 1.2$$

**Empirische, genauere
Formel:**

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \left(1 - e^{-S_t \cdot s}\right) - \frac{A_b \cdot e^{W \cdot s}}{100A_b + e^{W \cdot s} - 1} + 0.01 \quad 0 \leq s \leq 1$$

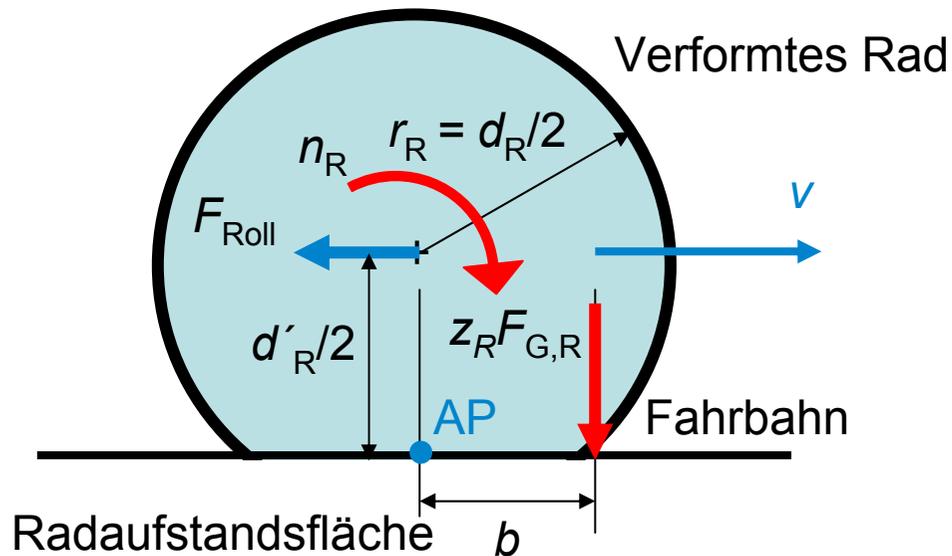
S_t : Steigung der $\mu(s)$ -Kurve bei $s = 0$ (Wertebereich: 10 ... 50)

A_b : Absenkung der $\mu(s)$ -Kurve bei $s = 1$ (Wertebereich: 0 ... μ_{\max})

W : Wendepunktwert (Wertebereich: 10 ... 100)

Trockener Asphalt: $S_t = 30, A_b = 0.3, W = 10$

Rollwiderstand F_{Roll} aller Räder



F_G : Normalkraft auf alle Räder

b : Großer Halbmesser der Verformungsellipse

g : Erdbeschleunigung

n_R : Raddrehzahl

AP: Aufstandspunkt

α : Steigungswinkel der Fahrbahn

$$F_G = m \cdot g \quad F_N = F_G \cdot \cos \alpha$$

$$d'_R \approx d_R :$$

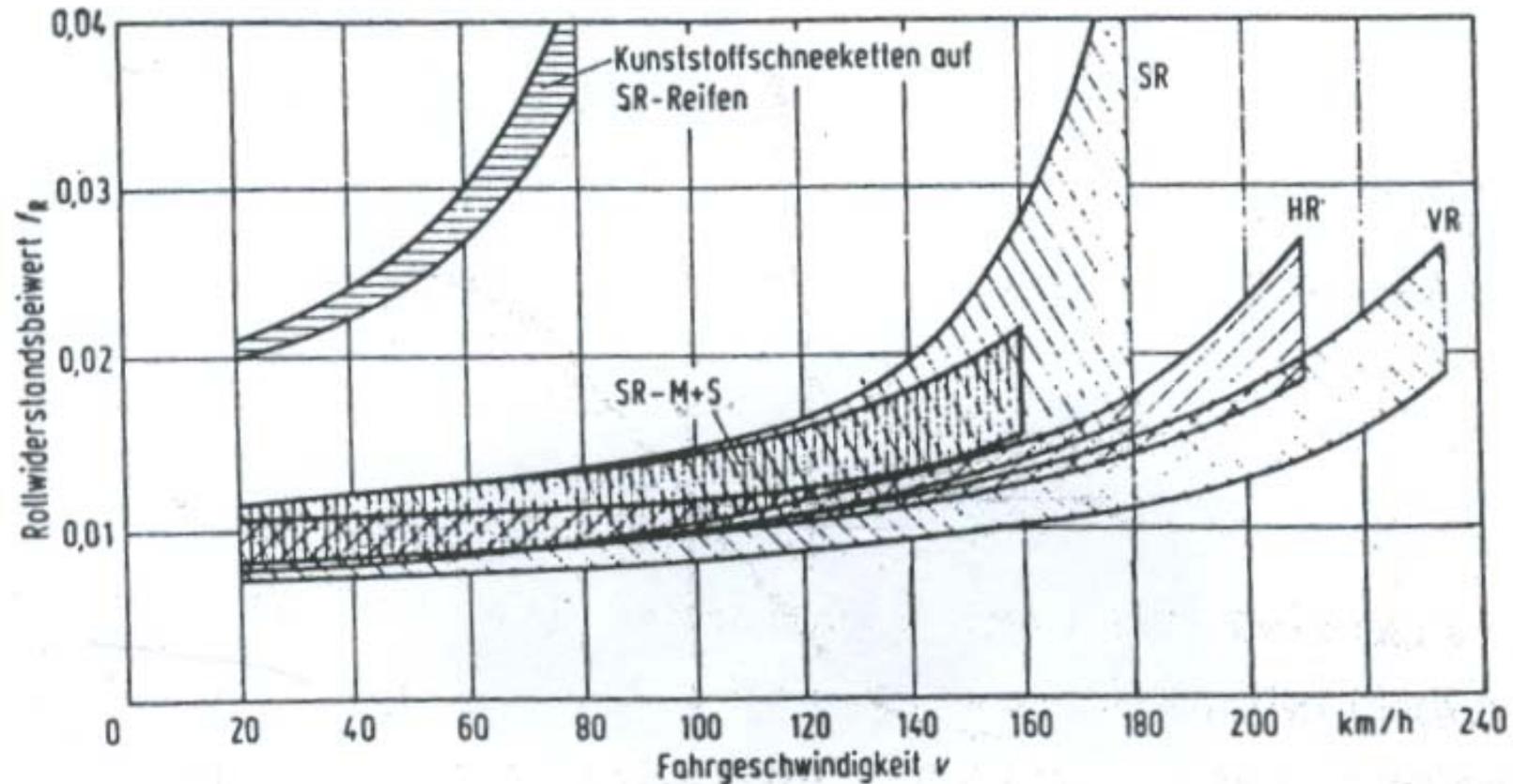
$$F_{Roll} = (2b / d_R) \cdot F_N = f_R \cdot F_N$$

Momentengleichgewicht: $d'_R < d_R$

$$F_{Roll} \cdot d'_R / 2 = z_R F_{G,R} \cdot b_R$$

Rollwiderstandsbeiwert $f_R = f_R(v)$ durch die Verformungsarbeit des Rades (Walkarbeit): hängt von Fahrzeuggeschwindigkeit und Radreifenbeschaffenheit ab

Rollwiderstandsbeiwert PKW

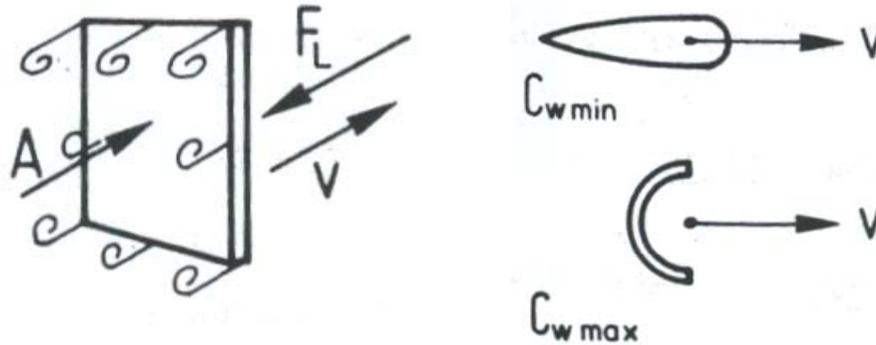


Beispiel: keine Steigung: $F_G = 8000 \text{ N}$ (Masse: 800 kg), $f_R = b/r_R = 0.01$, $F_{\text{Roll}} = 80 \text{ N}$

$$f_R = f_{R0} + f_{R1} \cdot (v/v_0) + f_{R4} \cdot (v/v_0)^4 \quad v_0 = 27.8 \text{ m/s} = 100 \text{ km/h}$$

$$f_{R0} = 0.009, f_{R1} = 0.0015, f_{R4} = 0.0012$$

Strömungswiderstand F_L



A : Querspanfläche

ρ_L : Luftdichte

v : Fahrzeuggeschwindigkeit

c_w : Strömungswiderstandsbeiwert

c_w -Werte PKW: 0.2 ... 0.5

Fahrzeuggeschwindigkeit v ist negative
Luftgeschwindigkeit bei ruhender Luft

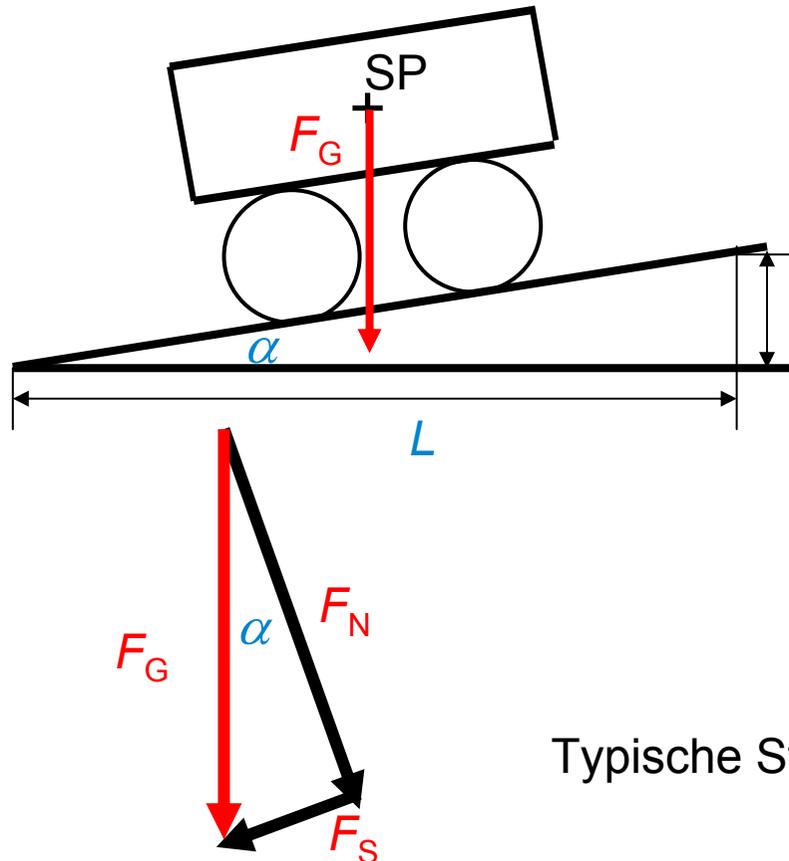
Staudruck: $p_d = \rho_L v^2 / 2$

Strömungswiderstandskraft:

$$F_L = (c_w A) \rho_L v^2 / 2$$

Beispiel: VW-Golf: $c_w A = 0.56 \text{ m}^2$, $c_w = 0.4$

Steigungswiderstand F_S



Steigung: $\tan \alpha = S / L$

SP: Schwerpunkt

F_N : Normalkraft $F_N = F_G \cdot \cos \alpha$

F_S : Hangabtriebskraft =
Steigungswiderstand:

$$F_S = F_G \cdot \sin \alpha$$

$$\sin \alpha = \frac{S}{\sqrt{S^2 + L^2}} \approx \frac{S}{L} = \tan \alpha, \quad S \ll L$$

Typische Steigungen der Fahrbahn: $S/L = 0 \dots 25\%$

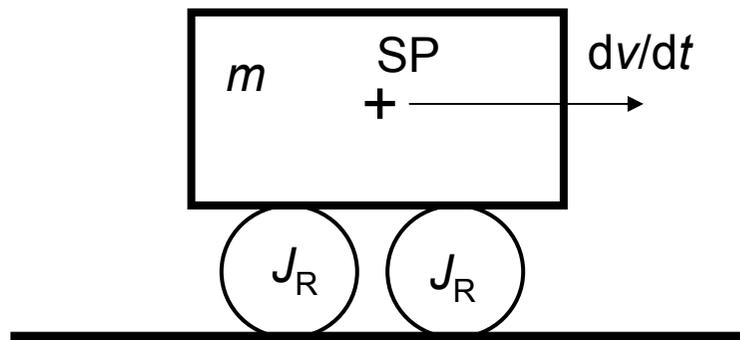
Beispiel: Steigung Turracher Höhe (Kärnten, Österreich): $\tan \alpha = 0.22 = 22\%$

Fahrzeug-Beschleunigungskraft dv/dt

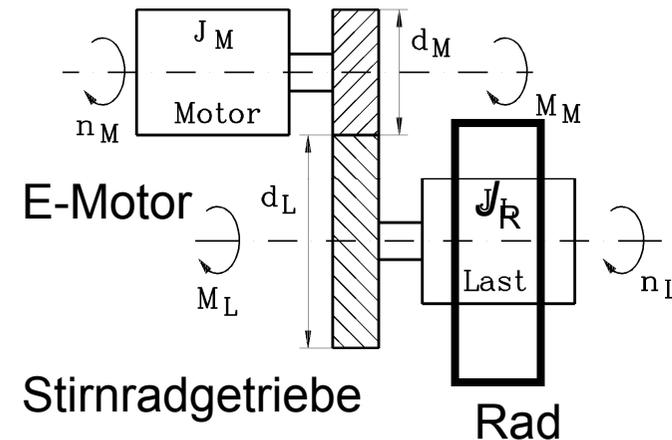


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fahrzeug:



Antrieb:



Fahrzeug-Beschleunigung: dv/dt

Beschleunigung linear bewegter Massen: $F_B = m \cdot dv / dt$

Beschleunigung rotierender Massen (Räder, Getriebe, E-Motor): $M_B = J \cdot d\Omega / dt$
(Drehmoment M erforderlich)

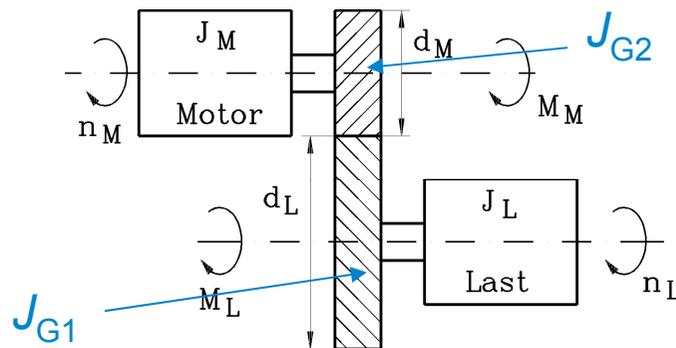
Maximal zulässige Beschleunigungen („Wohlfühlen“): $(dv/dt)_{\max} = 2\text{m/s}^2 = 0.2g$



Drehmassenzuschlagsfaktor Δ

Gesamte kinetische Energie:

$$W_{kin} = \frac{mv^2}{2} + \frac{(z_R J_R + J_{G1}) \Omega_R^2}{2} + \frac{(J_M + J_{G2}) \Omega_M^2}{2} = \frac{m' \cdot v^2}{2}$$



$n_L = n_R$, „Last“ = Angetriebene Räder der angetriebenen Achse

Äquivalente linear beschleunigte Masse m' : $m' = m \cdot (1 + \Delta)$

Typischer Wert für den Anteil der zu beschleunigenden rotierenden Massen an der kinetischen Energie: $\Delta = 0.2$

Beschleunigungskraft F_B : $F_B = m' \cdot (dv / dt)$

Lagerreibung F_{Lg}

Je Rad: $F_{Lg,R} = F_{G,R} \cdot k_{Lg}$

Je Fahrzeug: $F_{Lg} = z_R F_{G,R} \cdot k_{Lg} = m \cdot g \cdot k_{Lg}$

Beispiel:

$m = 1500 \text{ kg}$

$F_{Lg} = 73.5 \text{ N}$

Je Rad: Lagerkraft $F_{G,R}$



Raddrehzahl n_R

Bremsende
Lagerreibungskraft $F_{Lg,R}$

Beispiel:
Kugellager

Reibungsbeiwert $k_{Lg} = 0.005$ als Schätzwert !

Je nach Lagerart, Schmierzustand, Alter, Lagerlast, Raddrehzahl variiert dieser Wert und kann nach genauen Formeln berechnet werden!

Erforderliche Antriebskraft F_A und Leistung P_A



1) Stationärbetrieb: $dv/dt = 0$: $F_{A,stat} = F_{Roll} + F_L + F_S + F_{Lg}$

2) Instationärbetrieb: $dv/dt \neq 0$: $F_{A,inst} = m' \cdot (dv/dt) + F_{Roll} + F_L + F_S + F_{Lg}$

Beschleunigen: $dv/dt > 0$

Bremsen: $dv/dt < 0$

3) Antriebsleistung: $P_A = F_A v$: stationär: $P_{A,stat} = F_{A,stat} v = (F_{Roll} + F_L + F_S + F_{Lg}) \cdot v$

$$P_{A,stat} = \left[(f_R + \tan \alpha) \cdot F_N + F_{Lg} \right] \cdot v + c_w A \frac{\rho L}{2} v^3$$

Dominiert bei

niedriger

hoher Geschwindigkeit

4) Antriebsenergie im Fahrspiel (Zeitraum $t_2 - t_1$):

$$W_A = \int_{t_1}^{t_2} P_A(t) \cdot dt$$



Beispiel: Antriebskraft F_A

Daten: $m = 1500 \text{ kg}$, $v = 80 \text{ km/h}$, $f_R = 0.01$, $c_w A = 0.56 \text{ m}^2$

a) Regennasser Asphalt: $\mu_{\max} = 0.5$ bei $s_b = 0.11$,
Beschleunigung: $dv/dt = 1 \text{ m/s}^2$, $\Delta = 0.2$,
Steigung 10%

b) Trockener Asphalt: $\mu_{\max} = 1.2$ bei $s_b = 0.11$,
keine Beschleunigung: $dv/dt = 0$
keine Steigung

$$F_G = 14700 \text{ N}, F_{Lg} = 73.5 \text{ N}, F_L = 166 \text{ N}$$

$$\text{a) } F_N = 14627 \text{ N}, F_{Roll} = 146 \text{ N}, F_S = 1463 \text{ N}, F_B = 1800 \text{ N}$$

$$F_A = F_B + F_S + F_{Roll} + F_L + F_{Lg} = \boxed{3648 \text{ N}}$$

$$\text{b) } F_N = 14700 \text{ N}, F_{Roll} = 147 \text{ N}, F_S = 0, F_B = 0$$

$$F_A = F_{Roll} + F_L + F_{Lg} = \boxed{386.5 \text{ N}}$$

Schlupfverluste

- Zum gegebenen **Fahrbahnzustand** ergibt sich ein μ_{\max} bei s_b .
- Zur erforderlichen Antriebskraft und Fahrzeugmasse bzw. Steigung ergibt sich ein **erforderlicher Kraftschlussbeiwert** μ . Bei symm. Schwerpunktlage und zwei Achsen:

$$F_{N,Achse} = m \cdot g \cdot \cos \alpha / 2 \quad 1 \text{ angetriebene Achse: } \mu = F_A / F_{N,Achse}$$

- Daraus wird der **Radschlupf** über die $\mu(s)$ -Kurve bestimmt oder aus der **Kloss'schen Funktion**:

$$\frac{s}{s_b} = \frac{\mu_{\max}}{\mu} - \sqrt{\left(\frac{\mu_{\max}}{\mu}\right)^2 - 1}$$

- Auf Grund des Radschlupfs tritt die Reibungsleistung als **Schlupfleistung** P_{sch} auf. Daher ist die Antriebsleistung um diese Schlupfverluste kleiner als die mechanische Leistung P_m an den Antriebsrädern.

$$P_{sch} = s \cdot P_m \quad P_A = (1 - s) \cdot P_m$$

Schlupfverluste = Reibungswärme = Schlupfleistung P_{sch} :

$$P_{sch} = \frac{s}{1 - s} \cdot P_A$$

Bremsende Schlupfkraft: $F_{sch} = P_{sch} / v$

Beispiel: Schlupfverluste

Daten: $m = 1500 \text{ kg}$, $v = 80 \text{ km/h}$, $f_R = 0.01$, $c_w A = 0.56 \text{ m}^2$

a) Regennasser Asphalt: $\mu_{\max} = 0.5$ bei $s_b = 0.11$, Beschleunigung: $dv/dt = 1 \text{ m/s}^2$,
 $\Delta = 0.2$, Steigung 10%, $F_A = 3648 \text{ N}$

b) Trockener Asphalt: $\mu_{\max} = 1.2$ bei $s_b = 0.11$, keine Beschleunigung: $dv/dt = 0$
keine Steigung, $F_A = 386.5 \text{ N}$

a) $F_{N,\text{Achse}} = 14641 \text{ N}$, $\mu = 3648/14641 = 0.249$, $s = 0.0292$,

$P_A = F_A v = 81067 \text{ W}$, $P_{\text{sch}} = 2438 \text{ W}$, bremsende Kraft: $F_{\text{sch}} = 109.7 \text{ N} = 3\% \text{ v. } F_A$

b) $F_{N,\text{Achse}} = 14700 \text{ N}$, $\mu = 386.5/14700 = 0.0263$, $s = 0.011$,

$P_A = F_A v = 8589 \text{ W}$, $P_{\text{sch}} = 94 \text{ W}$, bremsende Kraft: $F_{\text{sch}} = 4.2 \text{ N} = 1.1\% \text{ von } F_A$

Fazit:

Die Schlupfverluste können bei normalen Fahrbetrieb im Bereich des Mikroschlupfs vernachlässigt werden !

Elektro-Automobile – Simulation Antriebskomponenten

Einstufiges Getriebe

$$v_{U, Gt} = d_M \pi n_M = d_R \pi n_R$$

$$i = n_M / n_R = d_R / d_M$$

$$F_{Gt} = 2M_M / d_M = 2M_R / d_R$$

$$i = M_R / M_M \quad M_M = M_R / i$$

Drehzahlabhängiges Verlustmoment durch
Ölzähigkeit („Plansch“verluste): $M_{d0} = p_0 M_N$

Belastungsabhängiges Verlustmoment
durch Zahneingriff: $M_{d1} = p_1 M_N$

$$m = \text{Moment/Nennmoment} = M / M_N$$

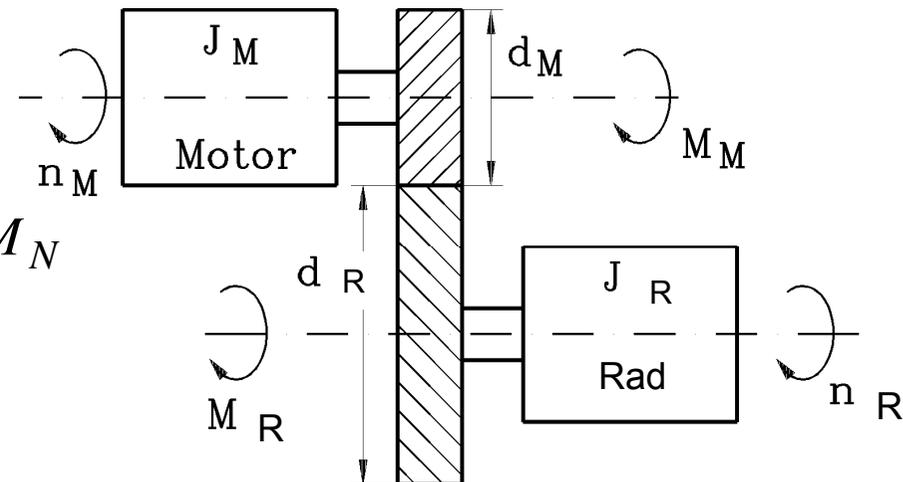
$$v = \text{Drehzahl/Nenn Drehzahl} = n / n_N$$

$$\eta_G = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{M_{ab} 2\pi n_M}{M_{zu} 2\pi n_M} = \frac{M}{M + v \cdot M_{d0} + m \cdot M_{d1}} = \frac{m}{m + v \cdot p_0 + m \cdot p_1}$$

Beispiel: $p_0 = 0.011$, $p_1 = 0.0043$, $\eta_{GN} = 0.9849$

Einstufiges Untersetzungsgetriebe
(Stirnradgetriebe)

$i = n_M / n_R$: Übersetzungsverhältnis

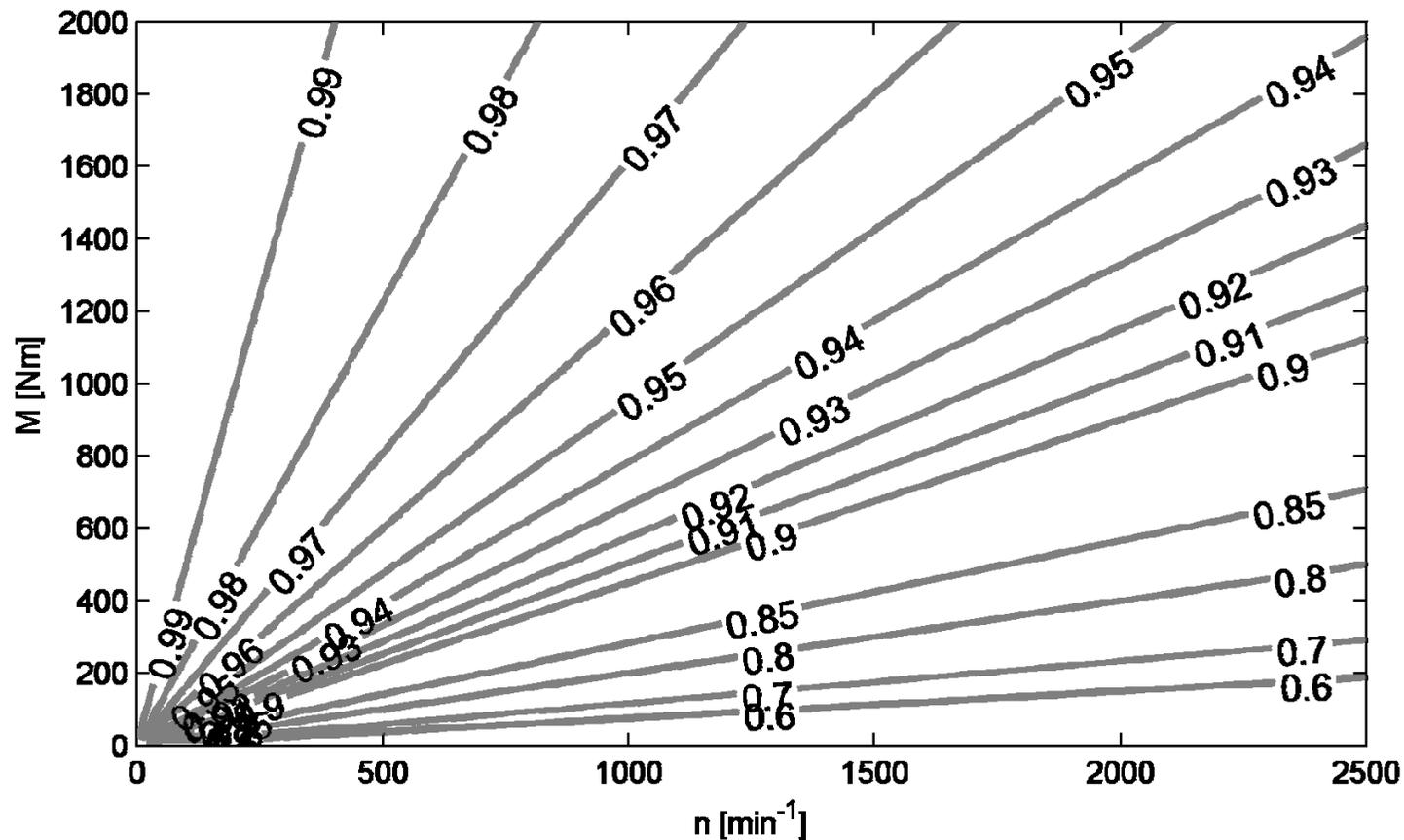


Getriebewirkungsgrad

- Getriebewirkungsgrad

Einstufiges Untersetzungsgetriebe

$i = 1/8$, Stirnradgetriebe



Leistungsanforderung an den Fahrmotor



Raddrehmoment aus Antriebskraft: $F_A = M_R / (d_R / 2)$

Raddrehzahl aus Fahrgeschwindigkeit und Radschlupf: $n_R = \frac{v}{d_R \pi \cdot (1 - s)}$

Motordrehmoment über Getriebe und dessen Verlustmoment: $M_M = M_R / (i \cdot \eta_G)$

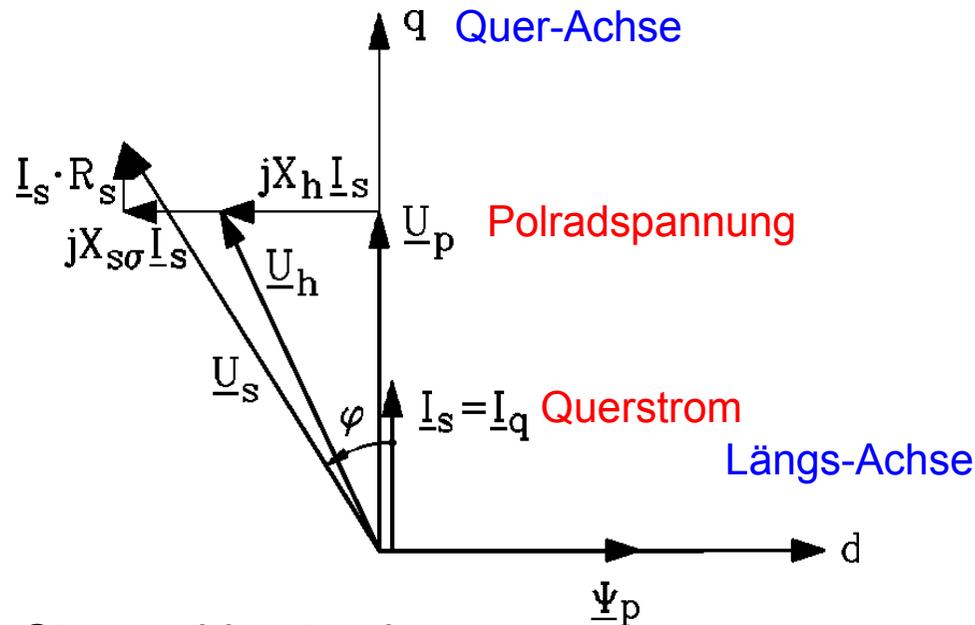
Motordrehzahl über Getriebe: $n_M = n_R \cdot i$



PM-Synchronmotor – feldorientierter Betrieb



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



$$M_e = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}} = m \cdot p \cdot \frac{\Psi_p}{\sqrt{2}} \cdot I_s$$

M_e : el. Drehmoment

P_δ : Innere Leistung

Ω_{syn} : Synchrone Winkelgeschwindigkeit

$m = 3$: Strangzahl

p : Polpaarzahl

Ψ_p : Flussverkettung (peak)

$I_s = I_{s1}$: Ständerstrom (eff)

U_p : Polradspannung (eff)

R_s : Strangwiderstand

$X_h, X_{s\sigma}$: Reaktanz (Haupt- und Streu- ($h + \sigma$))

$U_s = U_{s1}$: Strangspannung (eff, Grundschiwingung)

- Ständerstrom ist **DIREKT** proportional zum Drehmoment M_e

- Drehzahl ist proportional zur Ständerfrequenz $n = f_s / p$



PM-Synchronmotor – Betrieb bei vollem Fluss

$$M_e = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}} = m \cdot p \cdot \frac{\Psi_p}{\sqrt{2}} \cdot I_s = k_T I_s \quad k_T = m \cdot p \cdot \frac{\Psi_p}{\sqrt{2}} \quad \text{Drehmomentkonstante: Nm/A}$$

$$k_T = m \cdot p \cdot \frac{\Psi_p}{\sqrt{2}}$$

Feldorientierter Betrieb: PM-Synchron-Motor mit I_q -Einprägung:

a) *Thermisches Dauerdrehmoment*: **Nennmoment** M_N bei n_N

- Stromwärmeverluste P_{Cu}
- Ummagnetisierungsverluste $P_{Fe,s+r}$
- Magnet- u. Reibungsverluste P_M, P_R

b) *Entmagnetisierungs-/Umrichterstromgrenze*:

- Ständerfeld wirkt auf Magnete: **Umrichterstromgrenze** muss unterhalb der Entmagnetisierstromgrenze liegen.

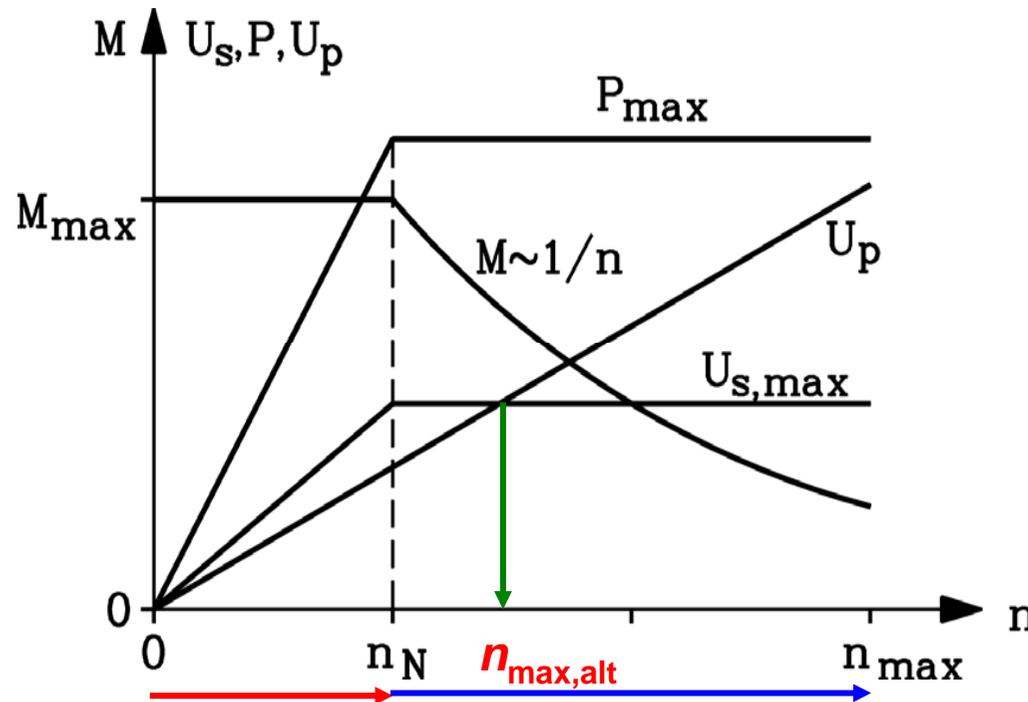
c) *Kurzzeitbetrieb*:

- Maximalmoment bei Umrichterstromgrenze
- Motor kurzzeitig betrieben, Ausnützen der thermischen Zeitkonstante des Motors.

d) *Maximale Betriebsdrehzahl*: $n_{max} = n_{sch}/1.2$

e) *Spannungsgrenze*: Maximale Umrichterausgangsspannung.

Feldschwächung bei PM-Synchronmaschinen



Grunddrehzahlbereich **Feldschwächbereich**

Statt $n_{\max,alt}$ (bei $U_s = U_p$) wird ein höheres n_{\max} erreicht, aber bei verringertem Moment, das nicht mehr zu I_s proportional ist.

- Ab der **Nenn Drehzahl** n_N wird die Spannungsgrenze $U_{s,max}$ erreicht.
- Durch Einprägen eines **negativen d -Stroms** wird in der Ständerwicklung eine Gegenspannung zu U_p induziert, so dass U_s konstant bleibt.
- Der d -Strom bildet mit dem Läuferfluss **kein Drehmoment!**
- Bei konstantem Gesamtstrom muss wegen des erforderlichen d -Stroms der q -Strom verringert werden, so dass das **Moment M kleiner wird!** („Feldschwächbereich“)

Bedingung für gute Feldschwächbarkeit

	Voltage u_s	Current i_s	d -axis i_{sd}	q -axis i_{sq}	Power	Speed n	$\cos\varphi$
a)	0.8	1.0	0	1.0	P_N	n_N	0.89 ind
b)	1.0	2.0	0	2.0	$2P_N$	n_N	0.7 ind
c)	1.0	1.5	-0.8	1.27	$2P_N$	$1.7n_N$	0.98 ind
d)	1.0	1.7	-1.6	0.5	$2P_N$	$4n_N$	0.89 cap

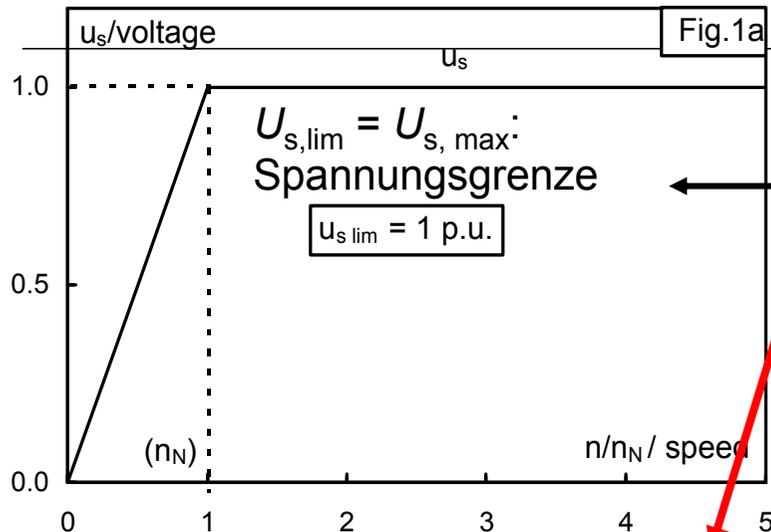
Hoher Feldschwächbereich: $U_p \gg U_{s,\max}$, wir vernachlässigen $U_{s,\max}$ und R_s .

$$I_{s,d} \cong U_p / X_s = \Psi_p / L_s = \Psi_p / L_d$$

Der erforderliche Feldschwächstrom $-I_d$ ist in etwa der generatorische Kurzschlussstrom. Dieser muss kleiner als die Umrichterstromgrenze sein, um den Motor unbegrenzt feldschwächen zu können!

$$I_{s,d,\max} < I_{s,\max}$$

Vergleich von gut (A) und schlecht (B) feldschwächbarem PM-Synchronmotor

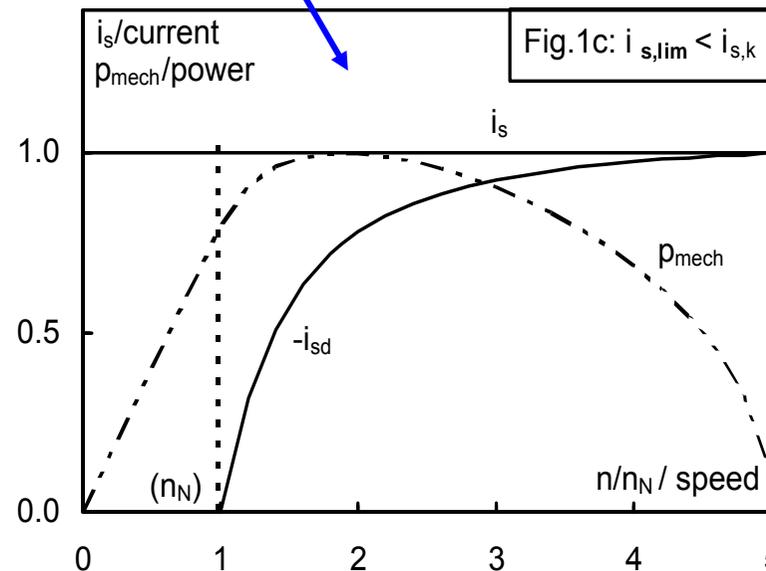
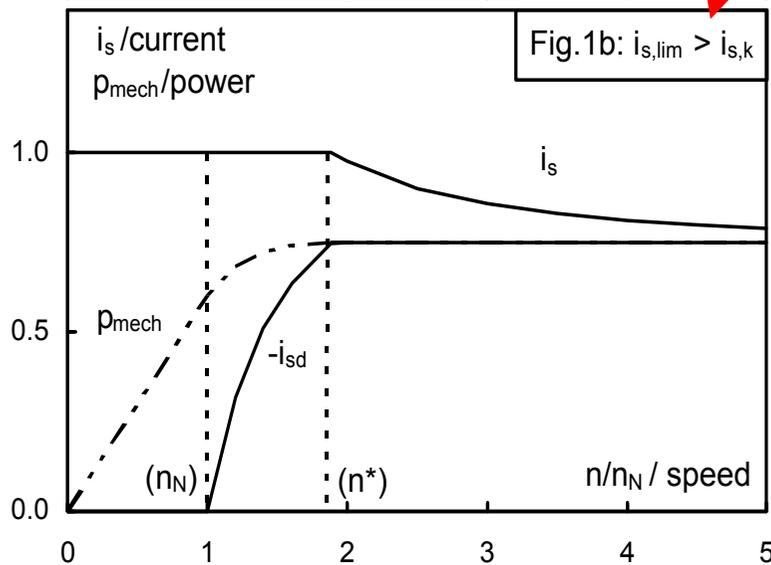


$I_{s,lim} = I_{s,max}$: Stromgrenze

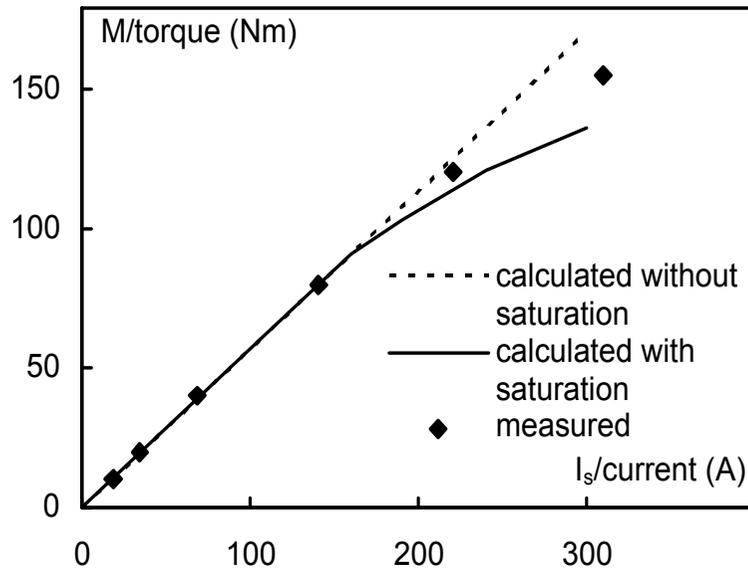
a) Umrichter Ausgangsspannung für die maximale Motorleistung

b) Motor A: Umrichterstromgrenze hoch $i_{s,lim} > i_{s,k}$

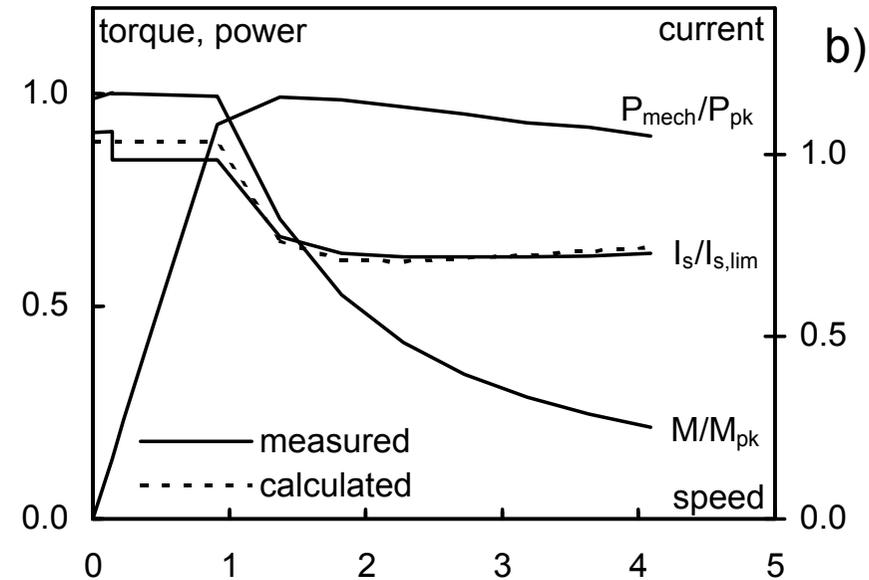
c) Motor B: Umrichterstromgrenze niedrig $i_{s,lim} < i_{s,k}$



Beispiel: PM-Synchronmotor für E-Auto-Antrieb



a)



b)

- a) Drehmoment-Strom-Kurve bei kleiner Drehzahl (voller Fluss)
 b) Gemessene Drehmoment-Drehzahl-Grenzkennlinie bei 132V Zwischenkreisspannung = Batteriespannung,

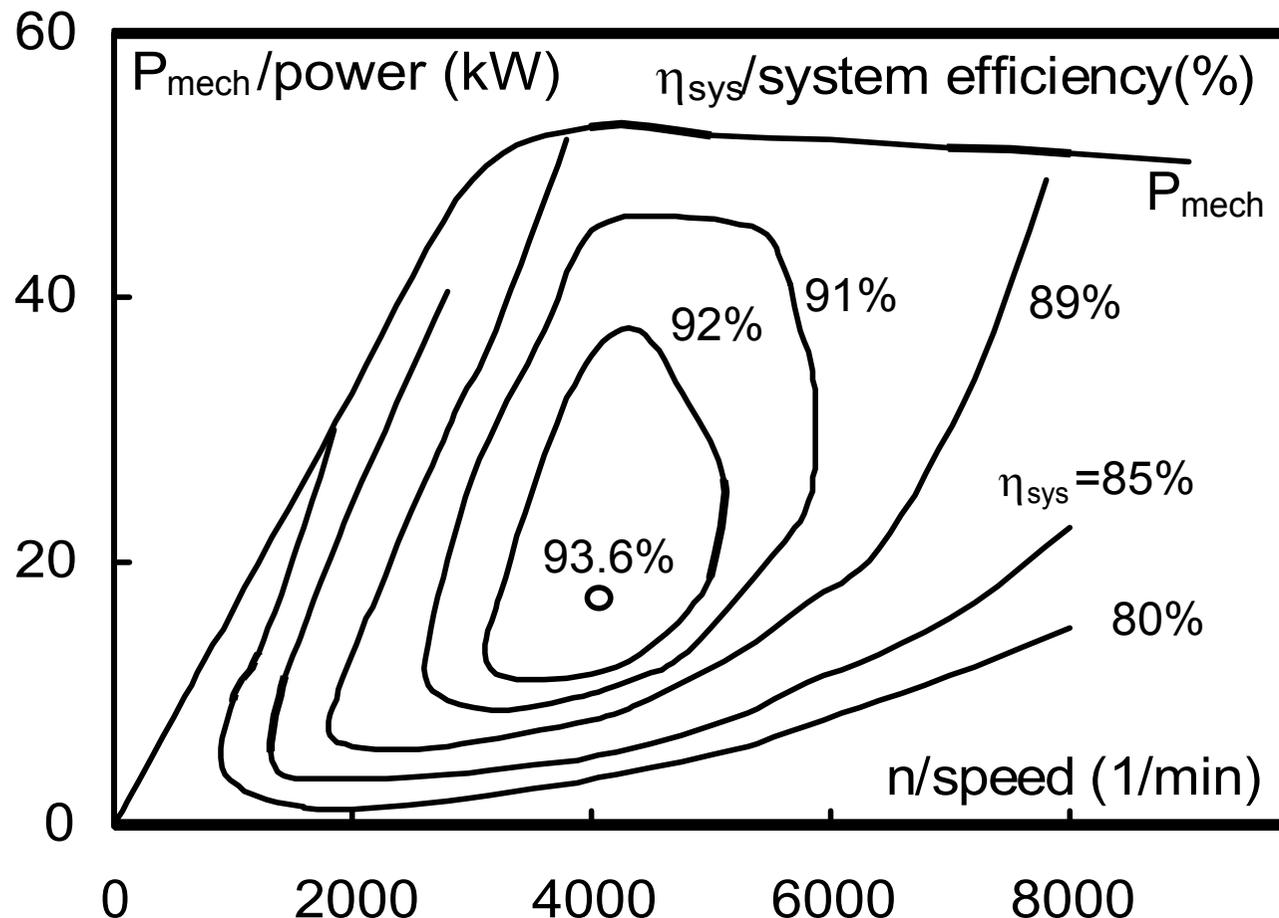
Quelle: Ackva, A. et al.:
EPE 1997, Trondheim

$$M_{pk} = 156Nm, P_{pk} = 35kW, I_{s,lim} = 315A$$

($I_{s,lim} = I_{s,max}$: Stromgrenze)

Beispiel: PM-Synchronmotor + Wechselrichter: Wirkungsgradfeld

Gemessene Motorabgabeleistung und Systemwirkungsgrad (PM-Synchronmotor + Wechselrichter) bei 190V Zwischenkreisspannung = Batteriespannung



Quelle: Ackva, A. et al.:
EPE 1997, Trondheim

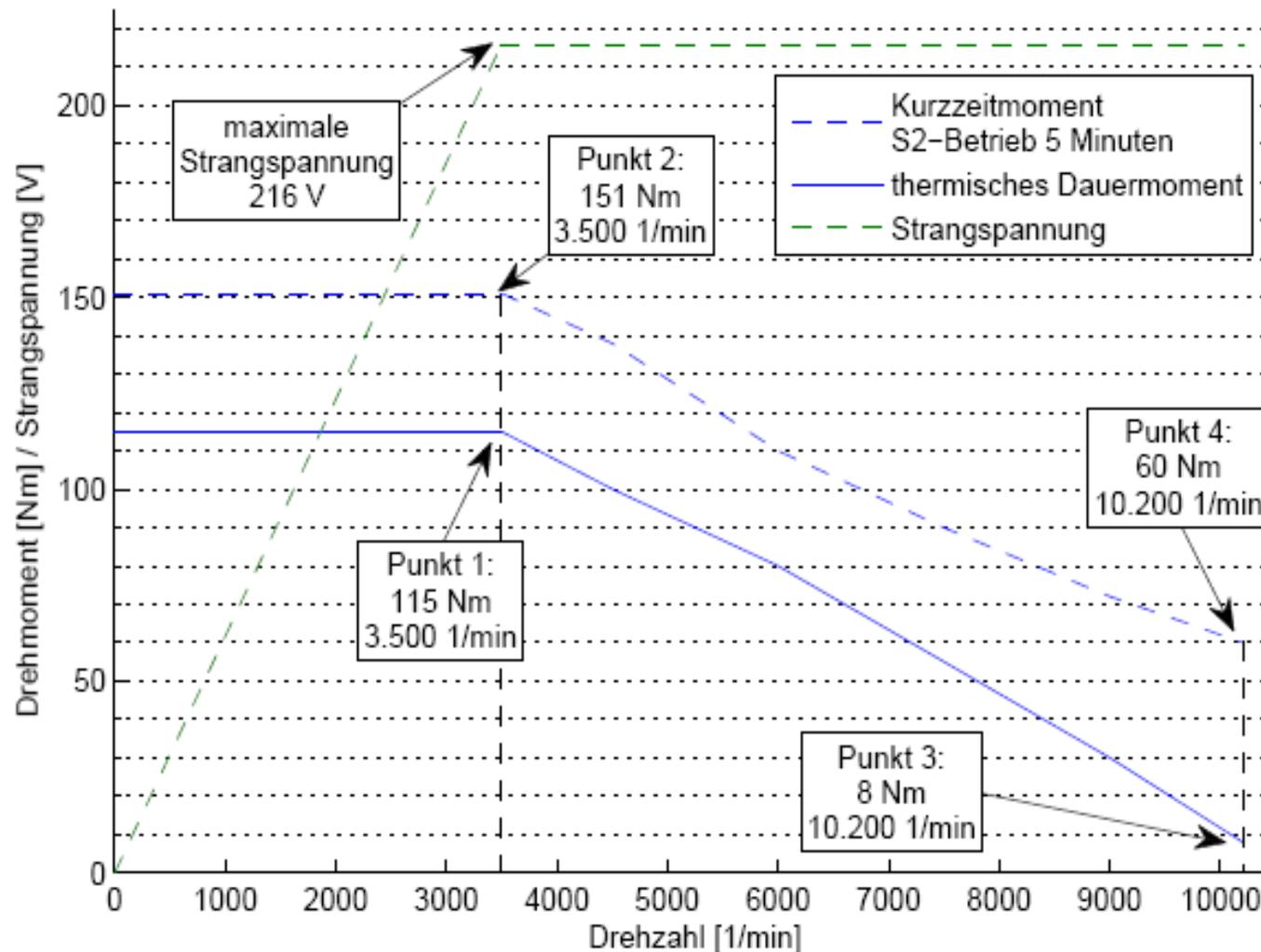
Beispiel: PM-Synchronmotor Wirkungsgrade

Gemessene Betriebsparameter im Dauerbetrieb bei
a) 132V , b) 160 V Zwischenkreisspannung = Batteriespannung

Speed (1/min)	n	2200	9000
Motor output power (kW)	P_M	26	15
Battery voltage (V)	U_B	132	160
Battery current (A)	I_B	227.5	119
Shaft torque (Nm)	M	113	16
Motor fundam. voltage (V)	U_{s1} (rms)	52	68.5
Motor fundam. current (A)	I_{s1} (rms)	213	164
Power factor	$\cos\varphi_s$	0.87	0.52
Motor ohmic losses (W)	P_{Cu}	2180	1260
Winding temperature (°C)	ϑ_{Cu}	148	142
Motor efficiency (%)	η_M	90.2	85.9
System efficiency (%)	η_{sys}	86.6	78.9

Quelle: Ackva, A. et al.:
EPE 1997, Trondheim

Beispiel: Grenzkennlinien eines PM-Synchron-Motors (*Brusa*)



Verlustgruppen der PM-Maschine

1. Ständer:

1.a) Stromwärmeverluste inklusive Stromüberschwingungen $P_{Cu,s}$

1.b) Ummagnetisierungsverluste im Ständerblechpaket (Zähne und Joch)

$$P_{Fe,s} = P_{Fe,d} + P_{Fe,ys}$$

2. Läufer:

2.a) Wirbelstromverluste in den Magneten P_M durch getakteten Ständerstrom und durch die nutöffnungsbedingte Flusspulsation

2.b) Ummagnetisierungsverluste im Läuferblechpaket $P_{Fe,r}$ durch getakteten Ständerstrom

2.c) Reibungsverluste: Lager- und Lufthautreibung P_{bg+fr}

Bestimmung der Motorbetriebsgrößen zu gefordertem Drehmoment M_M und Drehzahl n_M



Motorwellenmoment etwa gleich Luftspaltpmoment: $M_M \approx M_e$
Erforderlicher q-Strom: $I_q = \frac{M_M}{3p \Psi_p / \sqrt{2}} < I_{s,\max}$
bei $f_s = n_M \cdot p$, $\omega_s = 2\pi f_s$
Erforderliche Spannung ohne Feldschwächung:

$$P_M = 2\pi n_M M_M$$

$$U_{s1} = \sqrt{(\omega_s \Psi_p / \sqrt{2} + R_s I_q)^2 + (\omega_s L_q I_q)^2} \leq U_{s,\max}$$

Falls $U_{s1} > U_{s,\max}$: Erforderlicher Feldschwächstrom I_d (negativ):
(R_s vernachlässigt!)

$$I_d = \frac{\sqrt{U_{s,\max}^2 - (\omega_s L_q I_q)^2} - \omega_s \Psi_p / \sqrt{2}}{\omega_s L_d} \leq \sqrt{I_{s,\max}^2 - I_q^2}$$

$$\text{Motorstrom: } I_{s1} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \leq I_{s,\max}$$

Falls I_d zu groß, so muss I_q und damit das Drehmoment verringert werden !



Verlustberechnung im PM-Synchronmotor



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Stromwärmeverluste: $P_{Cu,s} = 3R_s(\mathcal{G}) \cdot I_{s1}^2$

Ummagnetisierungsverluste: $P_{Fe} = P_{Fe0} \cdot \left(\frac{\omega_s}{\omega_N}\right)^{1.8} \cdot \left(\frac{U_{s1}}{\omega_s \Psi_p / \sqrt{2}}\right)^2$

Reibungsverluste: $P_{fr} = 2\pi n_M M_{fr}(n_M)$

Zusatzverluste (Wirbelströme in Magneten, Läufer teilen, Wicklung) bei Sinusstrom:

$$P_{ad} = P_{ad,N} \cdot \left(\frac{\omega_s}{\omega_N}\right)^{1.5} \cdot \left(\frac{I_{s1}}{I_{sN}}\right)^2$$

Zusatzverluste durch Stromwelligkeit mit Schaltfrequenz (etwa konstanter Wert, u. a. von Modulationsgrad m abhängig): $P_{ad,inv}$

Motorgesamtverluste: $P_{d,M} = P_{Cu,s} + P_{Fe} + P_{ad} + P_{fr} + P_{ad,inv}$

Motorwirkungsgrad: $\eta_M = P_M / (P_M + P_{d,M}) = P_M / P_e \quad \cos \varphi_s = P_e / (3U_{s1} I_{s1})$



Beispiel: Motorverluste

Nenndaten:

6-poliger PM-Synchronmotor, $M_N = 95.5 \text{ Nm}$, $n_N = 2200/\text{min}$, $P_N = 22 \text{ kW}$
 $f_N = 110 \text{ Hz}$, $L_d = 0.186 \text{ mH}$, $L_q = 0.219 \text{ mH}$, $R_{s, 20^\circ\text{C}} / R_{s, 155^\circ\text{C}} = 10.5/16.0 \text{ m}\Omega$
 $\Psi_p = 98 \text{ mVs (20}^\circ\text{C)}$, $P_{\text{Fe0}} = 248 \text{ W}$, $P_{\text{adN}} = 110 \text{ W}$, $P_{\text{ad,inv}} = 56 \text{ W}$, $M_{\text{fr}} = 0.05 \text{ Nm}$
 $I_{\text{sN}} = 174 \text{ A}$, $U_{\text{sN}} = 50 \text{ V}$, Motormasse 45 kg, Flüssigkeitsmantelkühlung

Stromwärmeverluste, 155°C: 1453 W

Ummagnetisierungsverluste: 270 W

Reibungsverluste: 11.5 W

Zusatzverluste: 110 W

Zusatzverluste durch Stromwelligkeit: 56 W

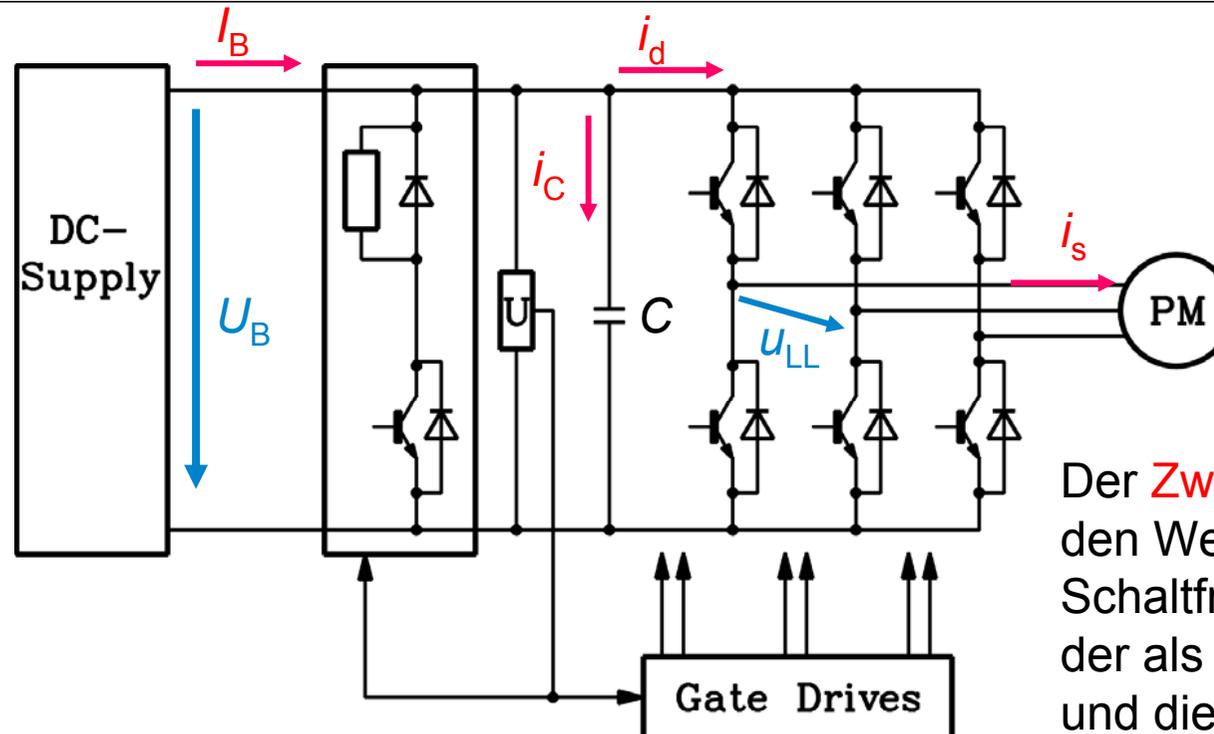
Motorgesamtverluste: 1900 W

$\cos \varphi_s = 0.916$

Motorwirkungsgrad: 92.05%

Quelle: Ackva, A. et al.:
EPE 1997, Trondheim

Modellierung Wechselrichter



I_B : Batteriestrom

i_d : Zwischenkreisstrom

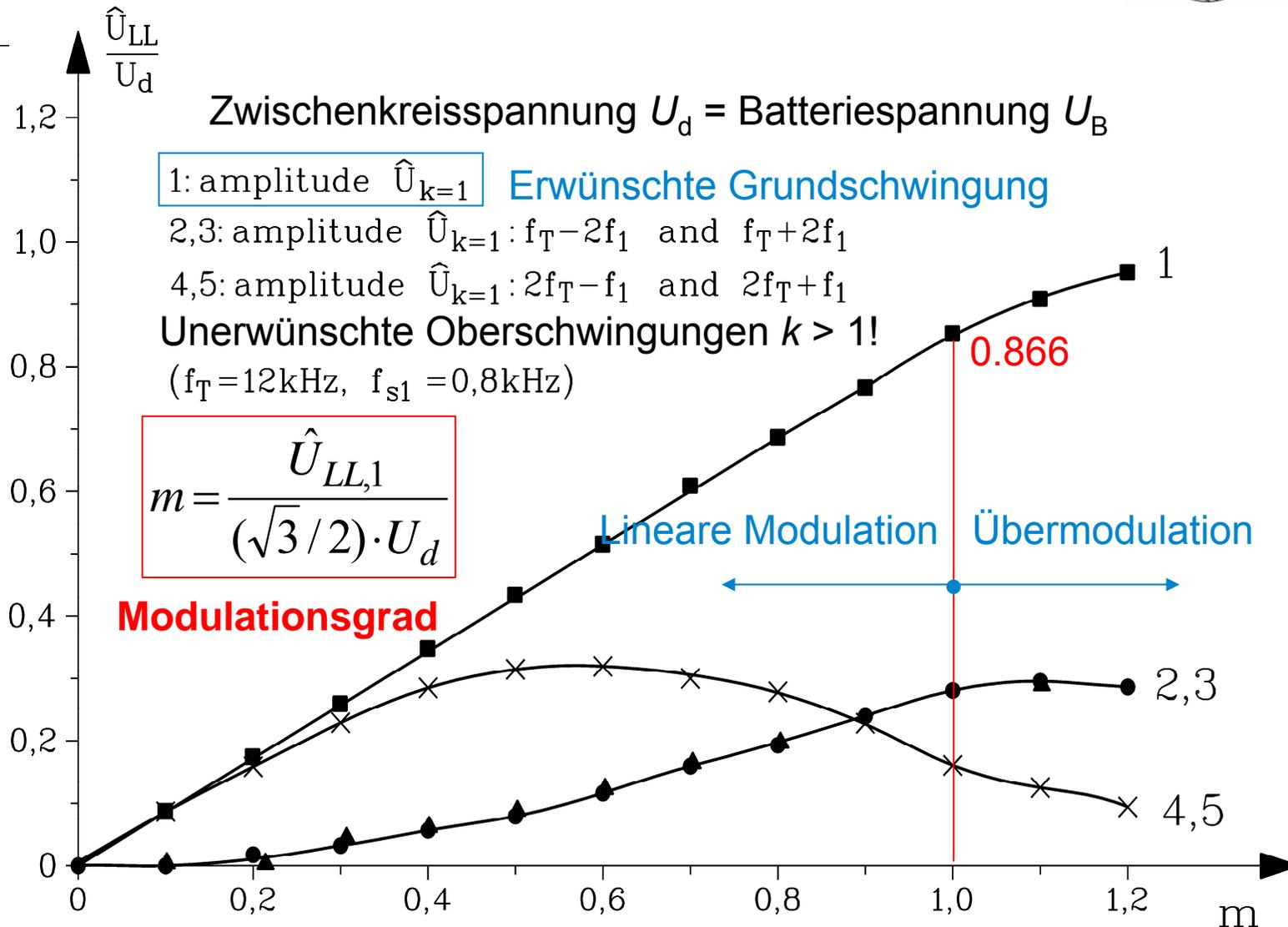
i_C : Kondensatorstrom

C: Stützkondensator

Der **Zwischenkreisstrom** i_d enthält den Wechselanteil aus der Schaltfrequenz f_T der Transistoren, der als **Kondensatorstrom** i_C fließt und die Batterie kaum belastet. Sein Gleichanteil ist der **Batteriestrom**, der auf die drei Stränge mit Grundfrequenz f_s als Motorständersfrequenz verteilt wird.

Die **verkettete gepulste Ständerspannung** u_{LL} hat eine Grundschwingung U_{LL1} mit f_s . Deren Gleichrichtung ist im wesentlichen die **Batteriespannung** U_B .

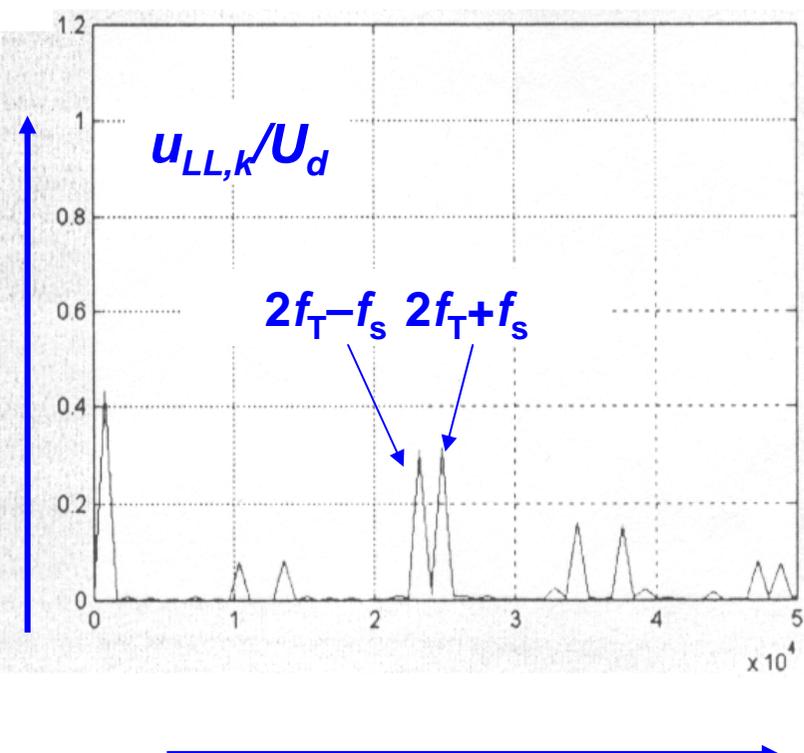
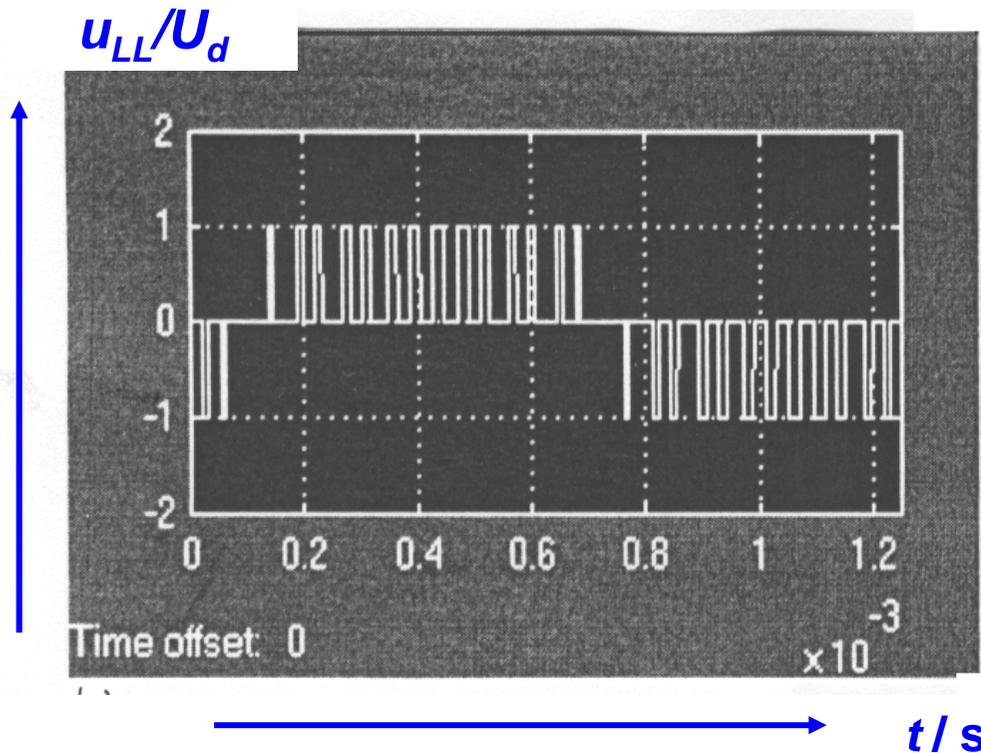
Pulsweitenmodulation - Modulationsgrad



Verkettete WR-Ausgangsspannung: $m = 0.5$

Pulsweitenmodulierte Ausgangsspannung

Fourier-Spektrum der U -Oberschwingungen



Beispiel: Grundfrequenz $f_s = 800$ Hz

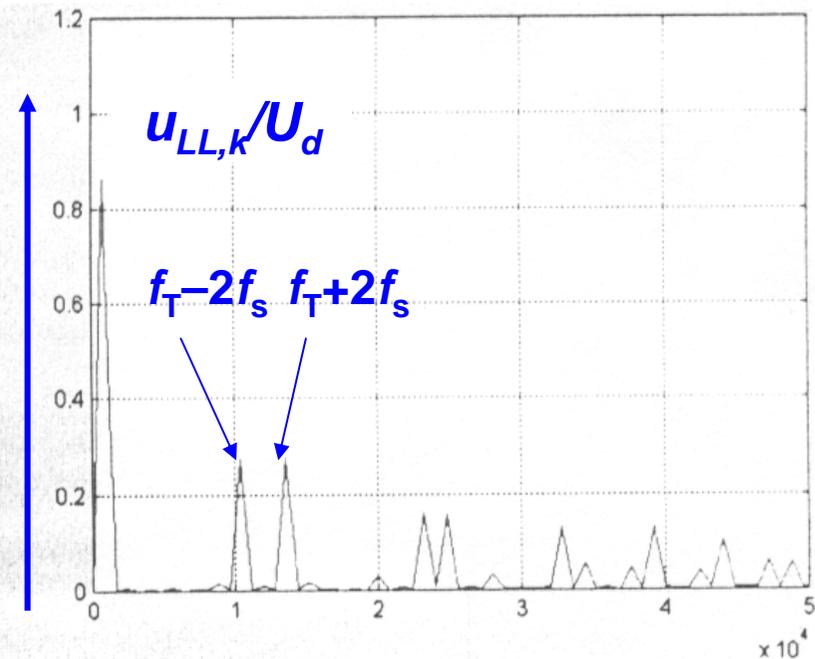
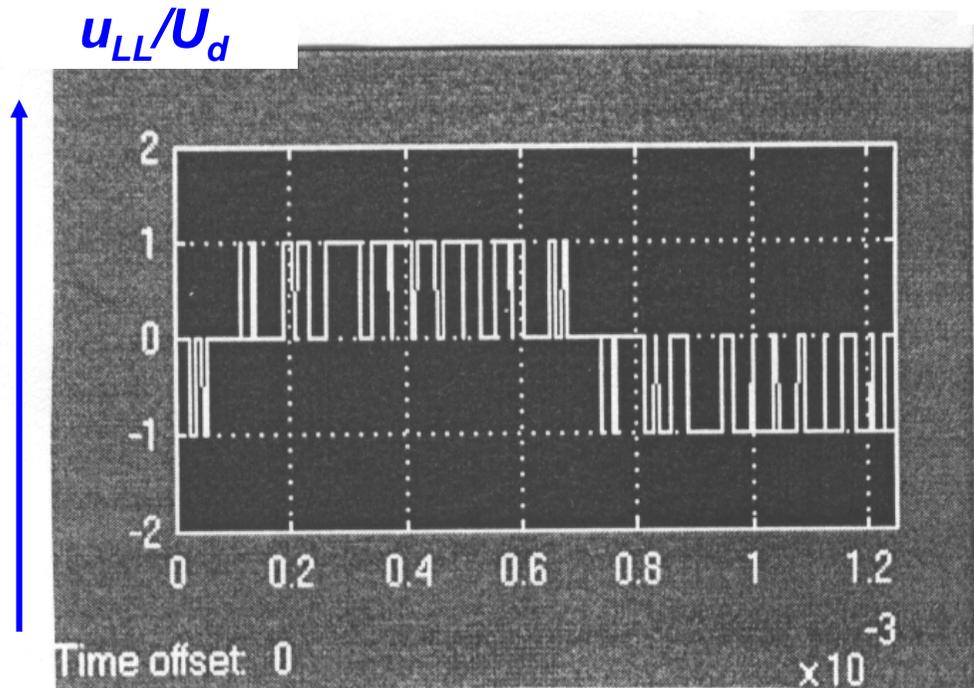
Schaltfrequenz $f_T = 12000$ Hz = $15f_s$

Spannungsgrundschiwingung:
Amplitude $0.43U_d$

Verkettete WR-Ausgangsspannung: $m = 1.0$

Pulsweitenmodulierte Ausgangsspannung

Fourier-Spektrum der U -Oberschwingungen



t/s

Beispiel: Grundfrequenz $f_s = 800$ Hz

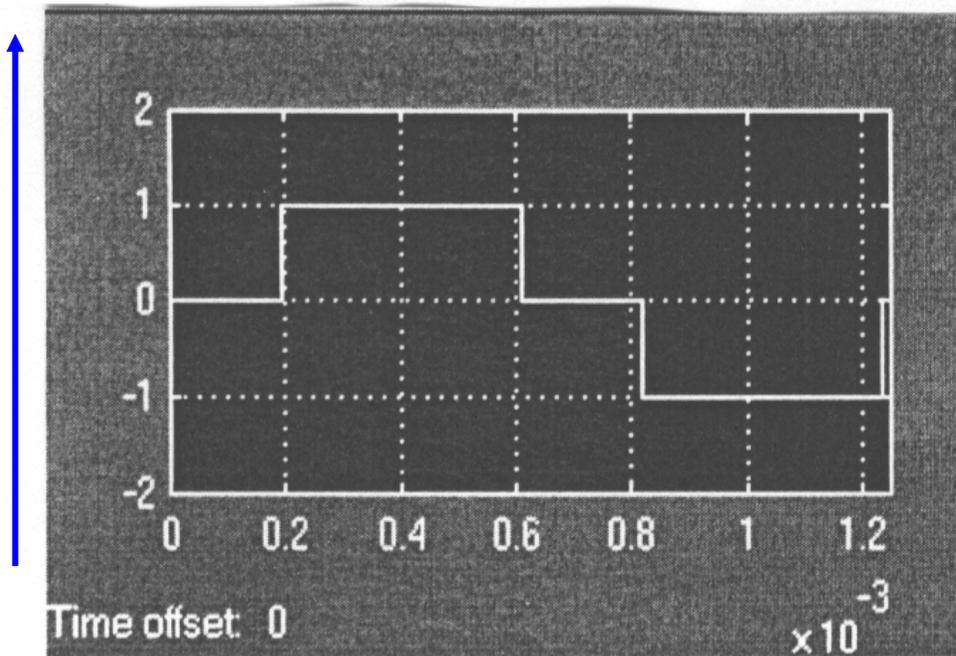
Schaltfrequenz $f_T = 12000$ Hz = $15f_s$

f/Hz

Spannungsgrundschiwingung:
Amplitude $0.86U_d$

Blockspannungsbetrieb: Übermodulation $m = \infty$

u_{LL}/U_d



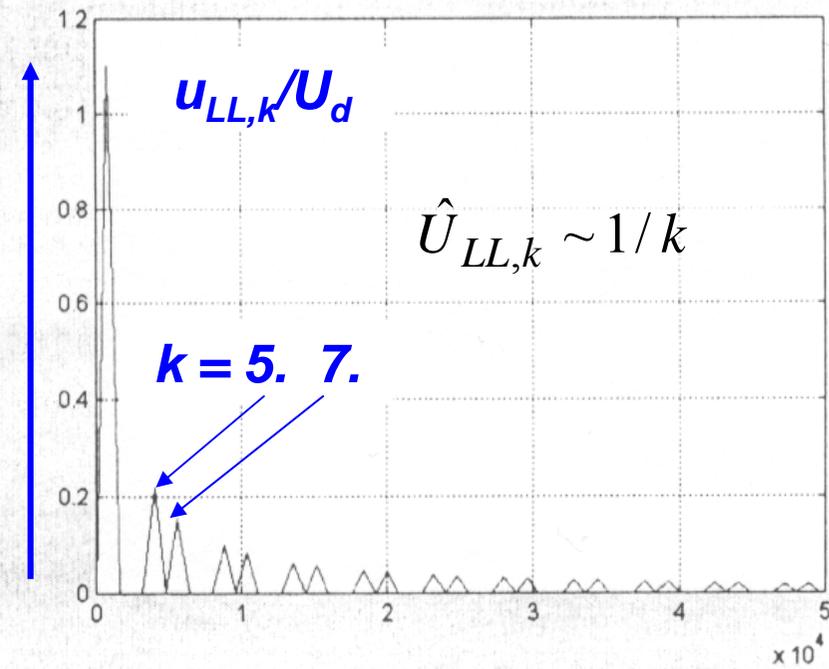
$f_s = 800 \text{ Hz}$

t / s

Beispiel: Grundfrequenz $f_s = 800 \text{ Hz}$

Schaltfrequenz $f_T = f_s$ "Grundfrequenztaktung"

Fourier-Spektrum der U -Oberschwingungen



$k = 5. 7.$

$$\hat{U}_{LL,k} \sim 1/k$$

f / Hz

Spannungsgrundschiwingung:
Amplitude $1.1U_d$

Abschätzung max. WR-Ausgangsspannung

Maximale WR-Grundschiwungs-Ausgangsspannung bei
a) Blockspannungsbetrieb:

Verketteter Spannungsscheitelwert:

$$\hat{U}_{LL1} = \frac{4}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot U_d = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot U_d$$

Strangspannung, Effektivwert: $U_{s1} = \hat{U}_{LL1} / (\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_d$

b) Bei der linearen Aussteuergrenze $m = 1$: $\hat{U}_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_d$ $U_{s1} = \frac{U_d}{2\sqrt{2}}$

Beispiel:

Batteriespannung $U_B = U_d = 480 \text{ V}$:

a) $\hat{U}_{LL1} = 529 \text{ V}$ $U_{s1} = 216 \text{ V}$

b) $\hat{U}_{LL1} = 415 \text{ V}$ $U_{s1} = 170 \text{ V}$

Modellierung Wechselrichter

I_{s1} : Grundschiwingung des Ständerstrangstroms

U_{s1} : Grundschiwingung der Ständerstrangspannung $U_{s1} = U_{LL1} / \sqrt{3}$

φ_{s1} : Phasenwinkel zwischen I_{s1} und U_{s1}

$P_{d,inv}$: Wechselrichterverluste

Leistungsbilanz: $P_B = 3U_{s1}I_{s1} \cos \varphi_{s1} + P_{d,inv}$

Wechselrichterverluste:

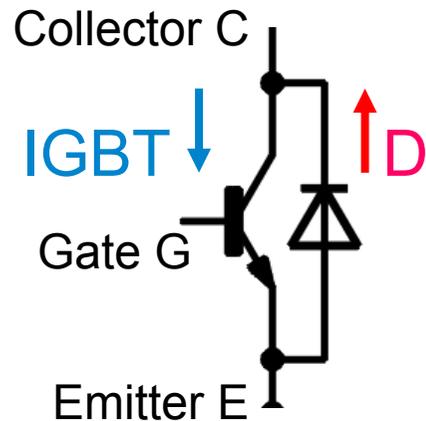
-Durchlassverluste $P_{inv,D}$

-Schaltverluste $P_{inv,S}$

-Basisversorgung $P_{inv,0} = \text{ca. } 50 \text{ W}$

} $P_{d,inv}$

Modellierung Wechselrichter



IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor = Schalttransistor

D: Freilaufdiode (antiparallel): Führt den Strom während der Spannungspausen

Beispiel: IGBT u. Diode *FS200 R06KE3*, Fa. *Infineon*

Sperrspannung: $U_{CE,sperr} = 600 \text{ V}$, Batteriespannung sollte dabei 500 V nicht übersteigen

IGBT:

Kollektordauer-/Spitzenstrom: $I_{C,N} = 200 \text{ A}$, $I_{C,pk} 400 \text{ A}$ (1 ms), $U_{CE,N} = 300 \text{ V}$

Dauersperrschichttemperatur 125°C : $U_{CE,sat} = 1.6 \text{ V}$ bei 200 A

Durchlassspannung $U_{CE0} = 0.8 \text{ V}$, Durchlasswiderstand $R_{TD} = 4 \text{ m}\Omega$

Ein-/Ausschaltverluste bei $U_{CE,N}$, $I_{C,N}$: 1.7 mJ/6.7 mJ je Schaltvorgang

Freilaufdiode:

Dauer-/Spitzenstrom: $I_{F,N} = 200 \text{ A}$, $I_{F,pk} 400 \text{ A}$ (1 ms), $U_{F,N} = 300 \text{ V}$

Dauersperrschichttemperatur 125°C : Durchlassspannung $U_{F0} = 0.8 \text{ V}$,

Durchlasswiderstand $R_{FD} = 2.5 \text{ m}\Omega$

Abschaltverluste bei $U_{F,N}$, $I_{F,N}$: 5.2 mJ je Schaltvorgang

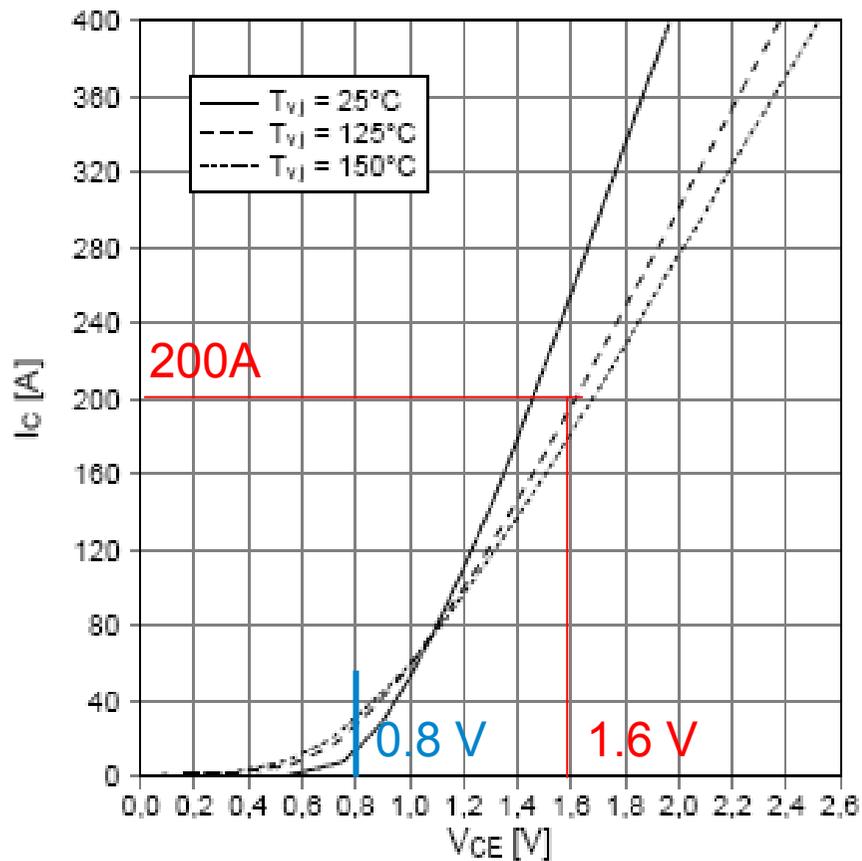
Leistungsschalter IGBT (Wechselrichter)

FS200 R06KE3, Fa. Infineon



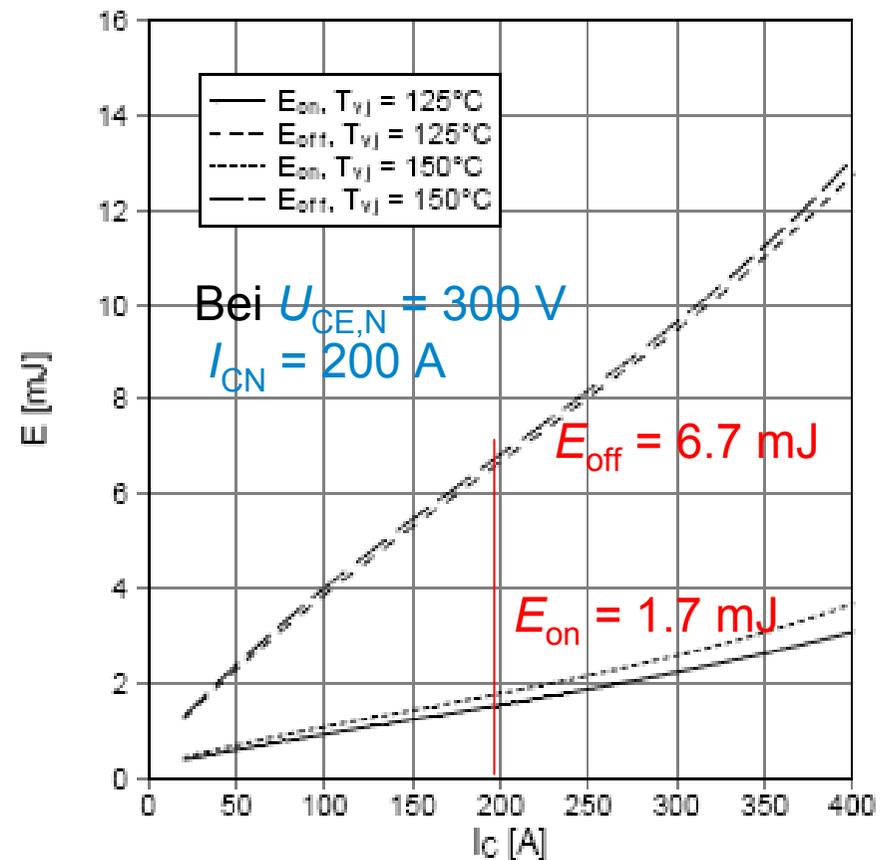
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Durchlass-Kennlinie



$$R_{TD} = (2.4 - 0.8) / 400 = 4\text{ m}\Omega$$

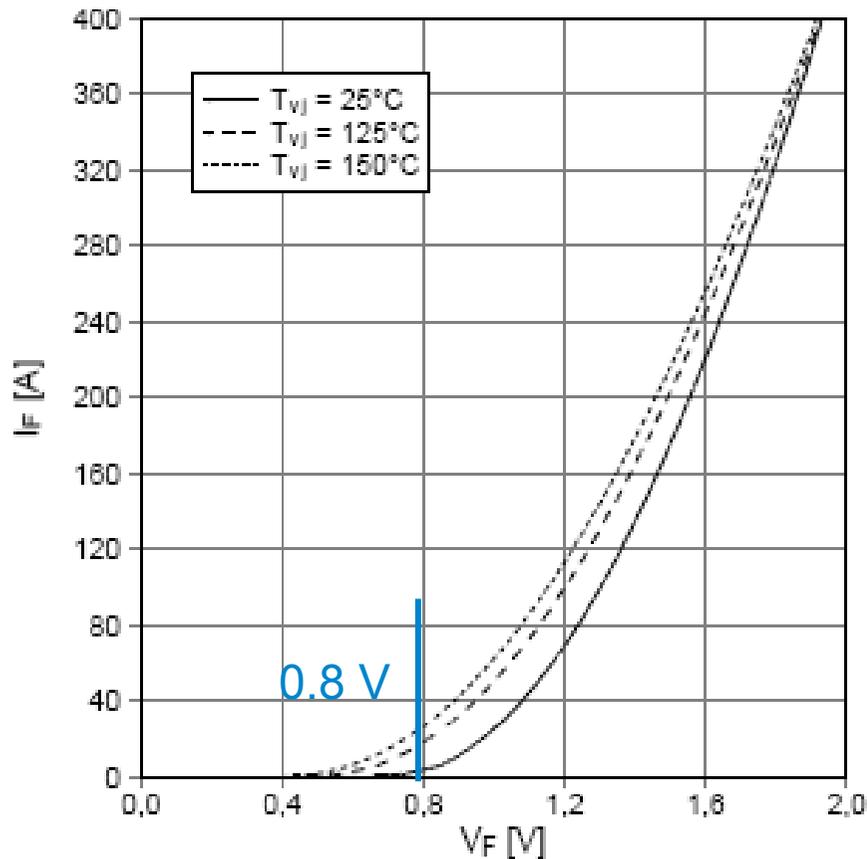
Schaltverluste ($t_{on} = 40\text{ ns}$, $t_{off} = 70\text{ ns}$)



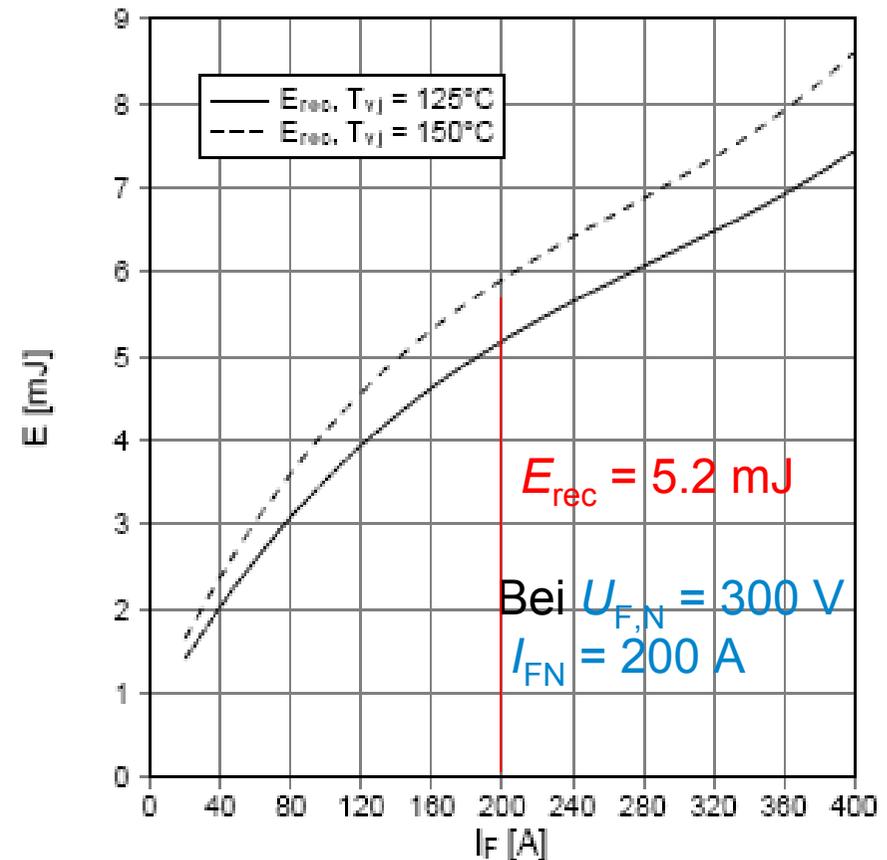
Freilaufdiode (Wechselrichter)

FS200 R06KE3, Fa. Infineon

Durchlass-Kennlinie



Abschaltverluste E_{rec} (Einschaltverluste sehr klein)



$$R_{FD} = (1.8 - 0.8) / 400 = 2.5\text{m}\Omega$$

Verlustabschätzung Wechselrichter

für Aussteuerungen $0 \leq m \leq 1$



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

-Durchlassverluste je IGBT:

$$P_{T,D} = U_{CE0} \hat{I}_s \cdot \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m \cdot \cos \varphi_s}{8} \right) + R_{TD} \hat{I}_s^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{m \cdot \cos \varphi_s}{3\pi} \right)$$

-Schaltverluste je IGBT:
$$P_{T,S} = \frac{f_T}{\pi} \cdot \frac{\hat{I}_s}{I_{C,N}} \cdot \frac{U_d}{U_{CE,N}} \cdot (E_{on} + E_{off})$$

-Durchlassverluste je Diode:

$$P_{D,D} = U_{F0} \hat{I}_s \cdot \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{m \cdot \cos \varphi_s}{8} \right) + R_{FD} \hat{I}_s^2 \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{m \cdot \cos \varphi_s}{3\pi} \right)$$

-Abschaltverluste je Diode:

$$P_{D,S} = \frac{f_T}{\pi} \cdot \left(0.55 + 0.45 \cdot \frac{\hat{I}_s}{I_{F,N}} \right) \cdot \frac{U_d}{U_{F,N}} \cdot E_{rec}$$

Bei höherer Aussteuerung m leiten die IGBTs mehr und die Dioden weniger, daher nehmen die IGBT-Verluste mit m zu!

-Durchlass- und Schaltverluste bei 6 IGBTs und Dioden:

$$P_{inv,S+D} = 6 \cdot (P_{T,D} + P_{T,S} + P_{D,D} + P_{D,S})$$



Beispiel: Verluste Wechselrichter

$$m = 1, \cos \varphi_s = 0.8, U_d = 480 \text{ V}, f_T = 12 \text{ kHz}, I_{s1} = 100 \text{ A}, U_{s1} = 170 \text{ V}$$

$$\text{Ausgangs-Grundswingungsleistung: } P_e = 3U_{s1}I_{s1} \cos \varphi_{s1} = 40.8 \text{ kW}$$

Verlustkomponente	Verlustleistung [W]
Transistor-Durchlassverluste	38.8 W
Transistor-Schaltverluste	36.3 W
Dioden-Durchlassverluste	8.7 W
Dioden-Schaltverluste	27.6 W
Summe pro Transistor-Dioden-Paar	111.4 W
Summe über alle 6 Paare	668.4 W
Wirkungsgrad [%]	98.27

$$\text{Umrichterwirkungsgrad: } \eta_{inv} = P_e / (P_e + P_{d,inv})$$

Bordnetzenergiebedarf

(wird dem Wechselrichter als zusätzlicher Verlustwert zugerechnet)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Komponente	Leistungsbedarf [W]
Steuergeräte	60
Abblendlicht	90
Kennzeichen- u. Schlussleuchte	25
Instrumentenbeleuchtung	20
Innenraumgebläse	50
Elektr. Lenkkraftunterstützung	25
Summe	270

Mittlerer Bedarf:

(Tag/Nacht)

(Warm/kalt)

(Regen/Trocken)

Im Minimum 150 W

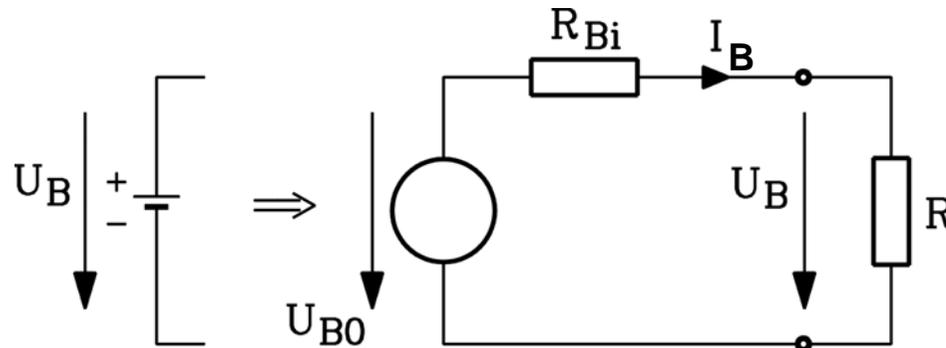
Weitere E-Verbraucher:

Scheibenwischermotor, Klimakompressor für Klimaanlage, Radio + DVD-Player, Navigation, beheizbare Scheiben und Außenspiegel, elektrische verstellbares Fahrwerk (Dämpfer), elektrische Heizung

12-V-Versorgung: Aus der Batterie (z. B. 400 V DC) über **DC-DC-Wandler** auf 12 V DC heruntergesetzt



Modellierung Batterie



U_{B0} : Leerlaufspannung

R_{Bi} : Innenwiderstand

Q : Entnommene elektrische Ladungsmenge

t_B : Entladezeit für Q bei Strom $I = \text{konst.}$

W_B : Entnommene Energie

Q_N : Nennladungsmenge (Ampere-Stunden), oft auch mit C bezeichnet

$y = 1 - Q/Q_N$: Entladezustand (State of Charge SOC)

$$U_B = U_{B0} - I_B \cdot R_{Bi}$$

$$Q = I_B \cdot t_B$$

$$W_B = Q \cdot U_B$$

$$Q_{\text{Rest}} = y \cdot Q_N$$

Entladen: $I_B > 0$

Laden: $I_B < 0$

Verbraucher-
Zählpfeil-System

Beispiel:

Pb-Batterie: $U_{B0} = 144 \text{ V}$,

$R_{Bi} = 0.055 \text{ Ohm}$, $Q_N = 100 \text{ Ah}$

Batteriestrom / bei entnommener Leistung P_B



$$U_B = U_{B0} - I_B \cdot R_{Bi}$$

Entladen: $P_B > 0$

$$P_B = (U_{B0} - I_B \cdot R_{Bi}) I_B$$

Laden: $P_B < 0$

Verbraucher-Zählpfeil-System

Zu einer festen Leistung kann mit

a) kleinem Strom und großer Spannung $I_{B,max}$: max. zuläss. Batteriestrom

b) großem Strom und kleiner Spannung entladen/geladen werden (**ungünstig**).

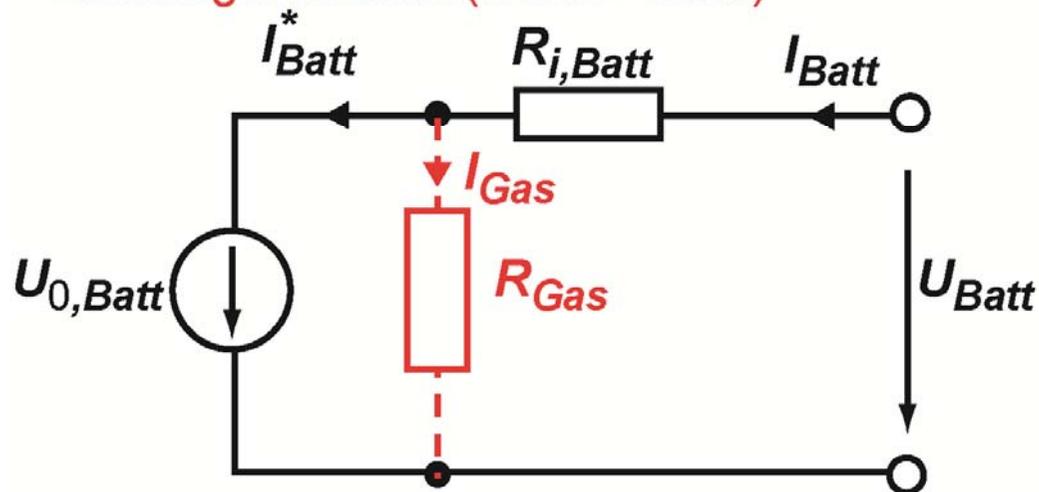
$$a) \quad I_B = \frac{U_{B0}}{2R_{Bi}} - \sqrt{\left(\frac{U_{B0}}{2R_{Bi}}\right)^2 - \frac{P_B}{R_{Bi}}} \leq I_{B,max}$$

$$b) \quad I_B = \frac{U_{B0}}{2R_{Bi}} + \sqrt{\left(\frac{U_{B0}}{2R_{Bi}}\right)^2 - \frac{P_B}{R_{Bi}}} \leq I_{B,max}$$

Modellierung: Traktionsbatterie

▪ Ersatzschaltung

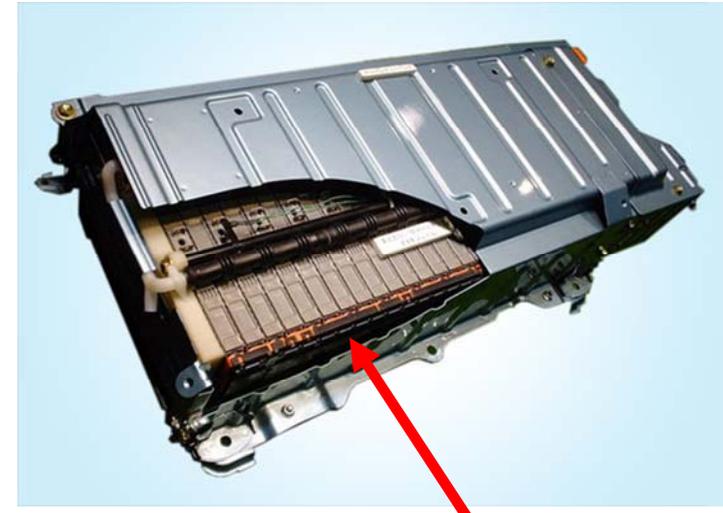
- Entladung der Batterie und Ladung der Batterie ohne Gasungsreaktion ($SOC \leq 80\%$)
- Für die Ladung der Batterie mit Gasungsreaktion ($SOC > 80\%$)



▪ Modellierung

- ESB-Parameter: Kennlinien
- $U_{0,Batt} = f(SOC)$
- $R_{i,Batt} = f(SOC)$
- $R_{Gas} = f(SOC)$
- SOC: Ah-Bilanzierung

Beispiel: Modellierung Ni-Metall-Hydrid-Batterie



■ Technische Daten

Batterieparameter	Daten
Anzahl in Serie geschalteter Zellen	$n_{Zelle} = 228$
min./max. Zellenspannung	$U_{Zelle,min/Max} = 0,9 \text{ V} / 1,6 \text{ V}$
min./max. Batterie-Leerlaufspannung	$U_{Batt,min/max} = 273 \text{ V} / 330 \text{ V}$
Batterie-Nennkapazität	$Q_{Batt.N} = 6,5 \text{ Ah}$
Anzahl paralleler Batteriezweige	$a_{Batt} = 1$
Innenwiderstand $R_{i,Batt} = f(\text{SOC})$	$R_{i,Batt} = 0.85 \dots 1.2 \ \Omega$

**NiMH-Batterie
Toyota Prius II**

Batterien für Hybrid- vs. E-Auto



Ni-Me-Hybrid-Batterie (Fa. Ovonics) für Hybridauto

- Batteriespannung (Leerlauf): 160 V
- 10.5 Ah
- Batterie-Innenwiderstand: bei -5°C : 0.05 Ohm, bei 40°C : 0.01 Ohm
- Batteriemaximalstrom: Für 10 s: 292 A; für 1 s: 365 A

Blei-Gel-Batterie für Elektroauto:

- Batteriespannung (Leerlauf): 144 V = 12 x 12 Volt-Zellen
- 100 Ah
- Batterie-Innenwiderstand: 0.055 Ohm
- Batteriemaximalstrom: 300 A

Im **Hybridauto** ist die erforderliche Speichermenge deutlich kleiner als beim **E-Auto (Reichweite!)**, aber die Leistungsspitzen wegen des Rekuperierens beim Bremsen oder wegen der hohen Entnahme beim „Boosten“ deutlich höher. Deshalb ist eine Schonung der Batterie mit zusätzlichen **Supercap-Speicher** empfohlen, da diese eine hohe Leistungsdichte aufweisen.



Batteriezellen im Vergleich

	Blei-Gel	Ni-Me-Hydrid	Li-Ionen
Zellspannung	2 V	1.2 V	3.5 V
Energiedichte	30 Wh/kg	80 Wh/kg	100 Wh/kg
Wirkungsgrad	70 ... 85 %	85 %	90%
Betriebstemperatur	0 ... 55°C	-20 ... 55°C	-20...60°C

Elektro-Automobile – Simulationsbeispiele



a) Beispiel:

Konstante Geschwindigkeit - Reichweitenberechnung



Beispiel: Reichweitenberechnung bei $v = \text{konst.}$



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Angaben:

Keine Steigung: $\alpha = 0$, $v = \text{konst.} = 120 \text{ km/h}$, $m = 1437 \text{ kg}$, $c_w A = 0.56 \text{ m}^2$, $d_R = 0.6 \text{ m}$
 $f_R = 0.01$, $\eta_G = 0.9$, $i = 8.02$, $Q = 100 \text{ Ah}$, $U_{B0} = 192 \text{ V}$, $R_{Bi} = 0.055 \Omega$ (Pb-Gel)
SOC: Beginn: 100%, Ende: 25%, PM-Synchronmotor 6-polig und IGBT-
Wechselrichter (Wirkungsgradkennlinienfeld bei $U_B = 190 \text{ V}$), Bordnetz: 400 W

Lösung:

1) Fahrwiderstände: $F_{Lg} \cong 0$, $F_{\text{Roll}} = 141 \text{ N}$, $F_L = 375 \text{ N}$, $F_A = 515 \text{ N}$, $P_A = 17.17 \text{ kW}$

2) Raddrehzahl und Getriebe: $n_R = 1061/\text{min}$, $n_M = 8509/\text{min}$, $P_M = 19.078 \text{ kW}$

3) Motordaten: $M_M = 21.4 \text{ Nm}$, Antriebssystemwirkungsgrad: 80%
(Umrichter: 93%, PM-Syn.motor 86%)

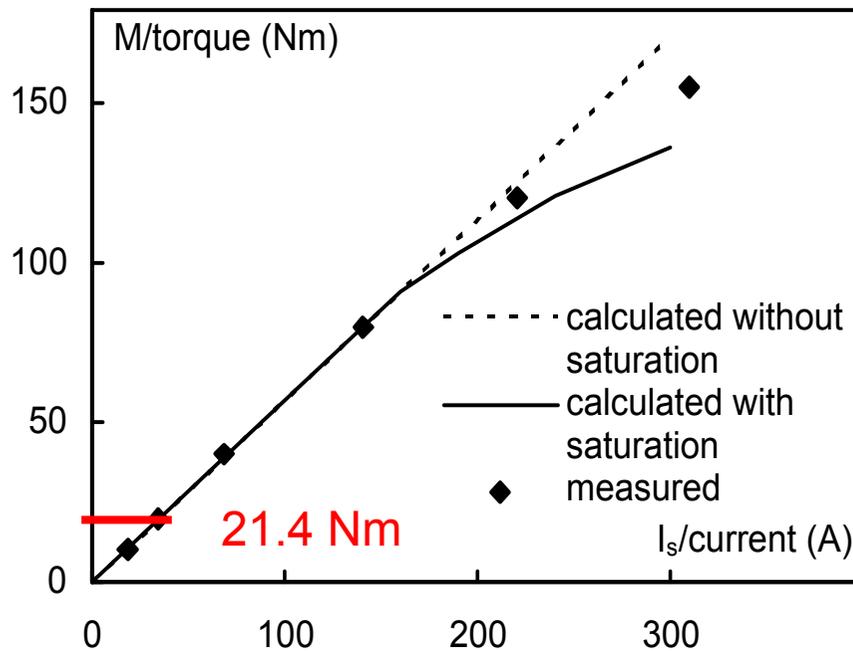
4) Batterieleistung: $19.078/0.8 + 400 = 24248 \text{ W} = P_B$, $I_B = \frac{U_{B0}}{2R_{Bi}} - \sqrt{\left(\frac{U_{B0}}{2R_{Bi}}\right)^2 - \frac{P_B}{R_{Bi}}} = 131.2 \text{ A}$

5) Reichweite: $y = 1 - \text{SOC}_{\text{End}} = 0.75$, $t = Q \cdot y / I_B = 2058 \text{ s} = 34.3 \text{ min}$, $s = v \cdot t = 68.6 \text{ km}$



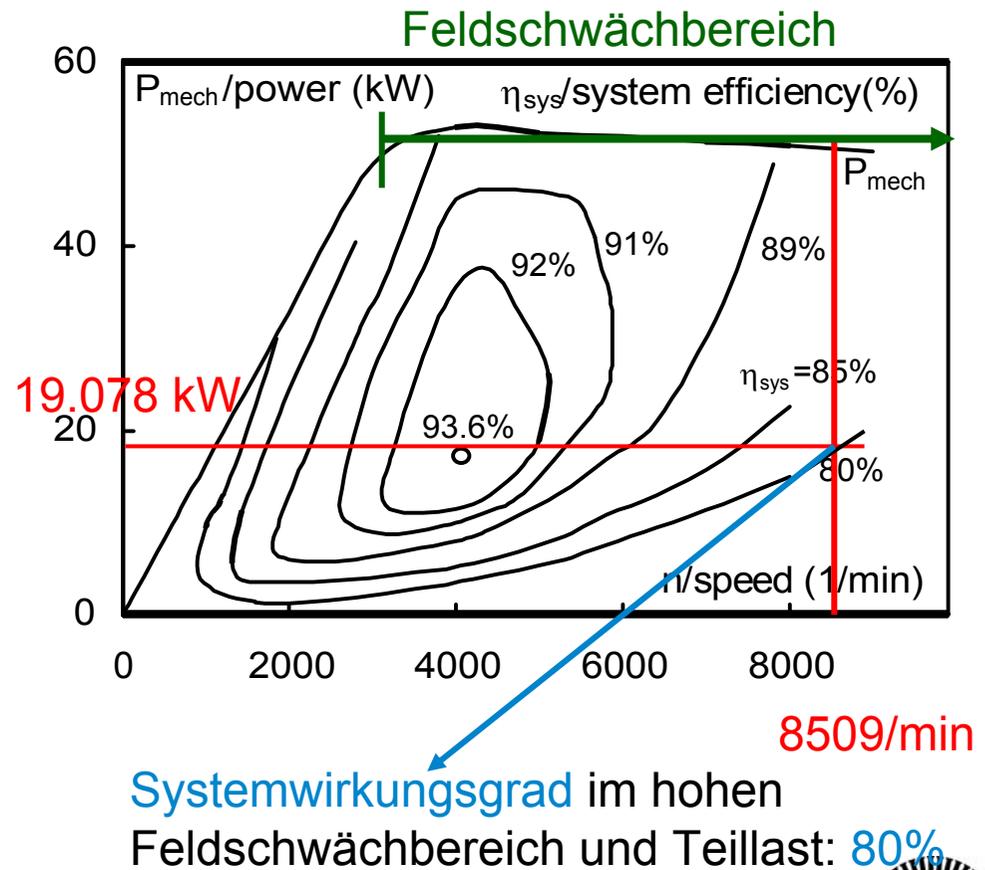
Beispiel: PM-Synchronantrieb

Drehmoment-Querstrom-Kurve



Quelle: Ackva, A. et al.:
EPE 1997, Trondheim

Leistung + Wirkungsgrad (Motor+WR)





b) Beispiel:

Geschwindigkeitszyklen – Reichweitenberechnung und Beschleunigungsvermögen



Beispiel: Angaben zu einem fiktiven E-Auto – im Zyklus und bei max. Beschleunigung



Angaben:

$m = 900$ kg (Leer) $c_w A = 0.5$ m², $d_R = 0.623$ m, $\Delta = 0.2$ Drehmassenzuschlag, $f_R = 0.008$, η_G lt. Kennlinienfeld, $i = 8$, $Q = 30$ Ah, $U_{B0} = 480$ V, $R_{Bi} = 0.0696$ Ω (Lithonen, *Fa. Kokam*), PM-Synchronmotor 6-polig (*Fa. Brusa*, 6.17.12): 4500/min, 85 Nm, max. 11000/min, IGBT-Wechselrichter: *Fa. Brusa*, DMC524, 80 kW (106 kW kurzz.), 600 V Sperrspannung, Bordnetz: 150 W

Das Fahrzeug ist für $v_{\max} = 150$ km/h ausgelegt: Motordrehzahl = 10200/min.

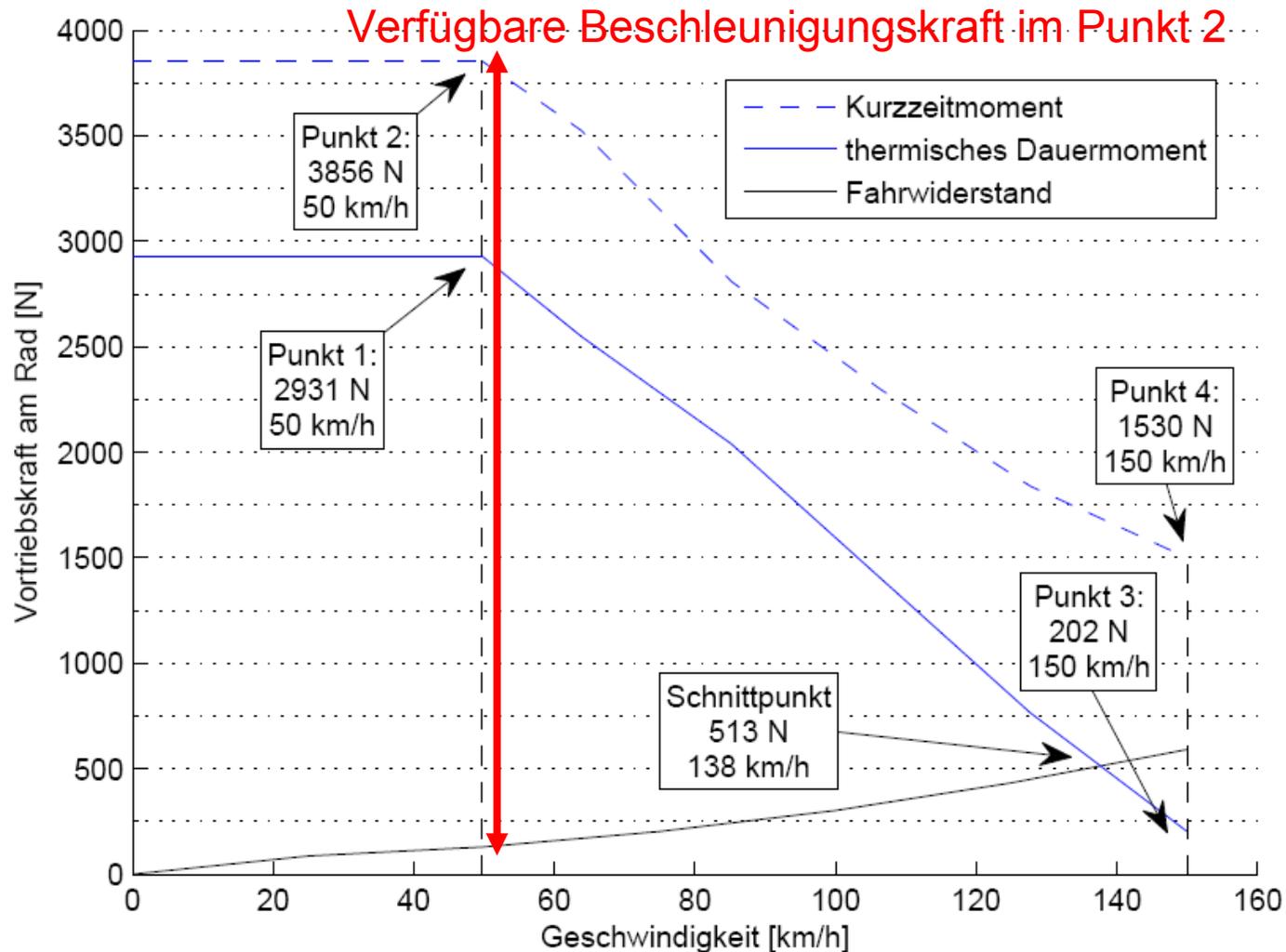


Beispiel: Fahrwiderstände

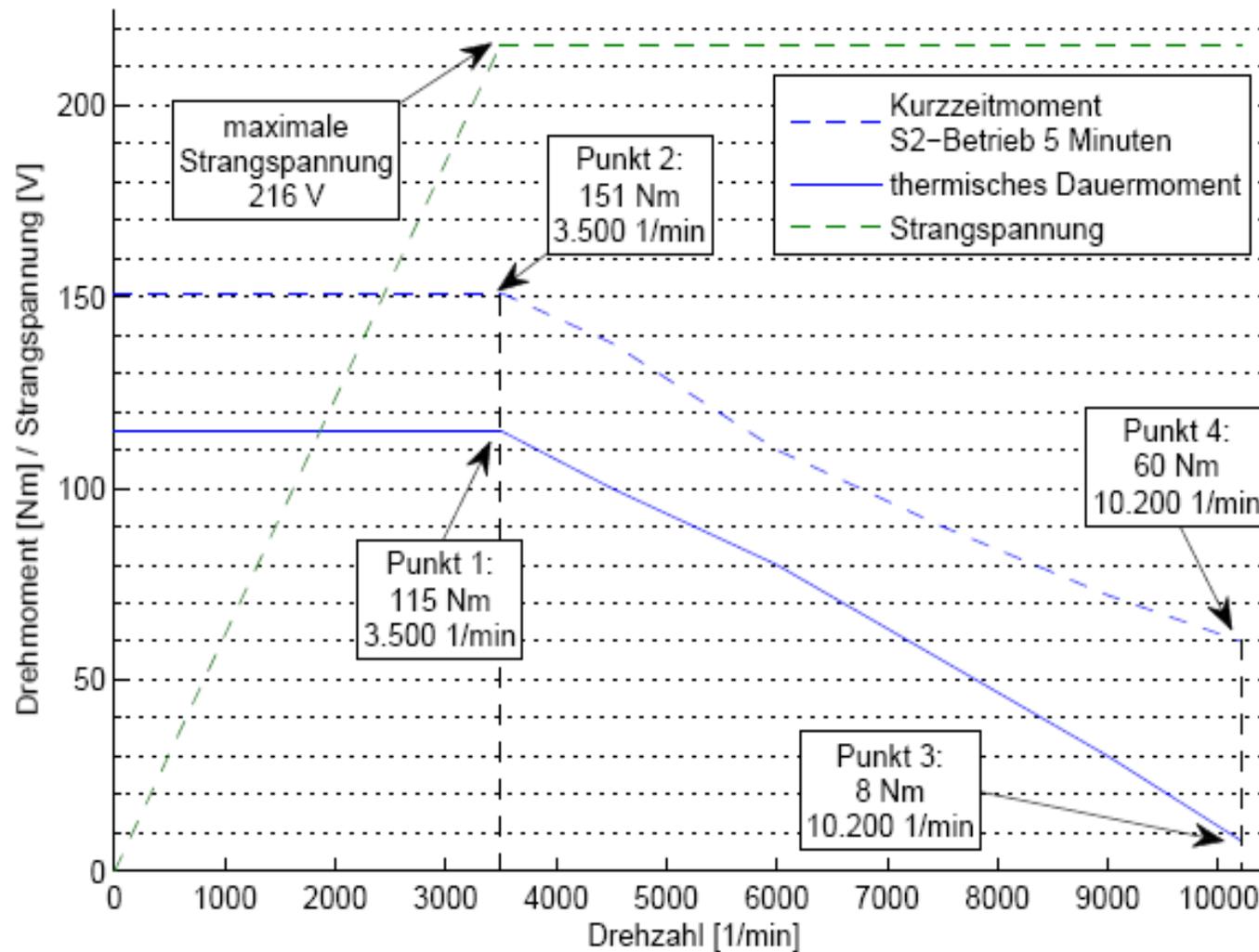
Geschwindigkeit [km/h]	Fahrwiderstand [N]
0	0
25	85.2
50	128.5
75	201.5
100	302
125	432
138	513
150	591

$$\alpha = 0$$

Beispiel: E-Auto Ergebnisse im Motorkennfeld



Beispiel: Grenzkennlinien eines PM-Synchron-Motors (*Brusa*)

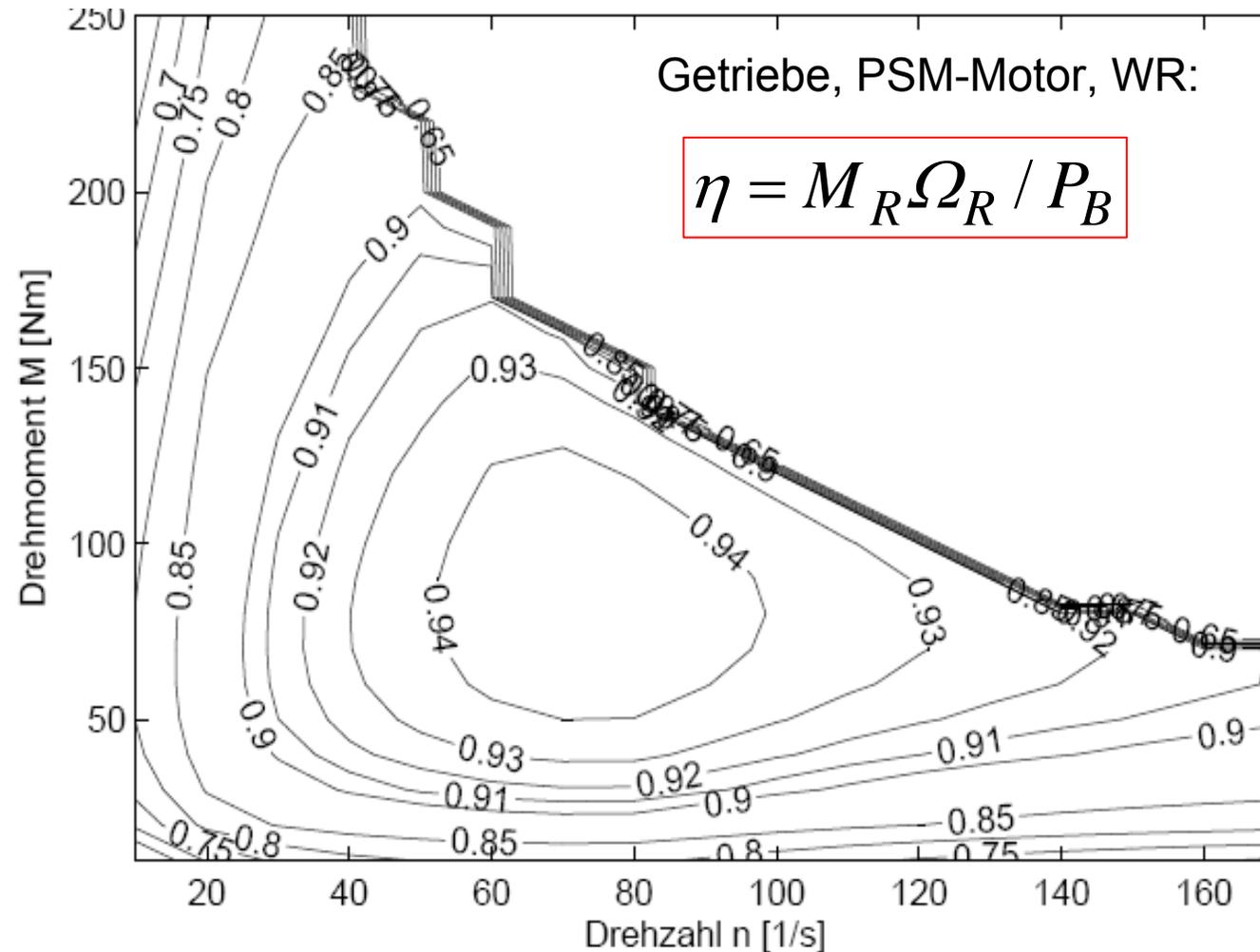


Beispiel: E-Auto: PM-Motor und Fahrzeug-Belastungsdaten

Punkt in Kennlinie	Geschwindigkeit [m/s] / [km/h]	I_d [A]	I_q [A]
1 (n_N / M_d)	13.8 / 49.7	0	102
2 (n_N / M_{S2})	13.62 / 49	0	139
3 (n_{max} / M_d)	41.55 / 149.6	84	7
4 (n_{max} / M_{S2})	41.05 / 147.78	109.5	52.5

Drehzahl	Thermisches Dauermoment [Nm]	Maximales Kurzzeit-Drehmoment (S2-5min Betrieb)
$n_N = 58.1 /s$ $n_{max} = 170.1 /s$	115 / Punkt 1 8 / Punkt 3	151 / Punkt 2 60 / Punkt 4

Beispiel: E-Auto (Brusa-Antrieb) Wirkungsgrad-Kennfeld gerechnet



Beispiel: Verluste in vier Betriebspunkten

Durch die hohe Beschleunigungskraft treten auch Schlupfverluste auf!



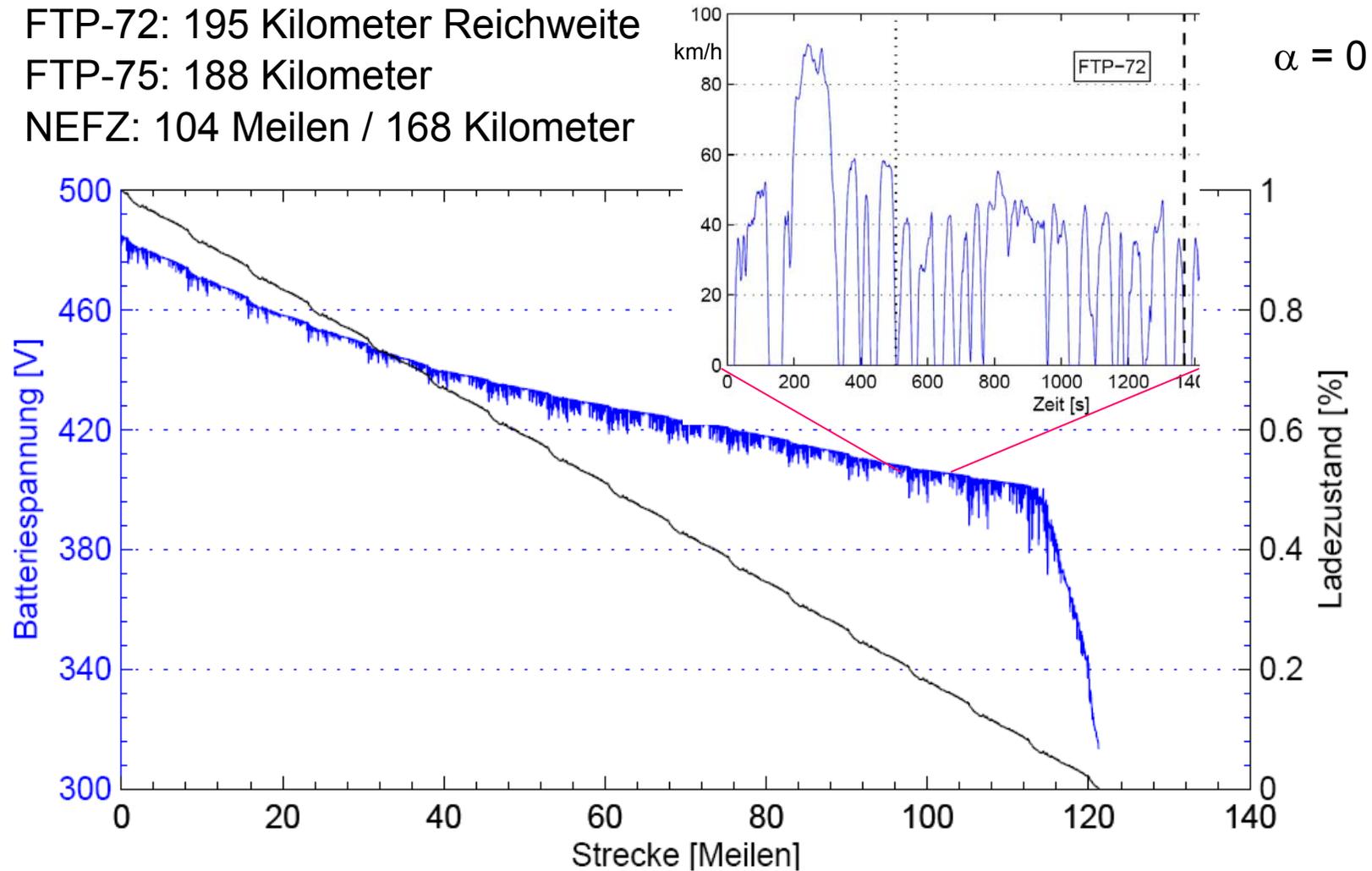
Verluste [W]	Punkt 1 (n_N / M_d)	Punkt 2 (n_N / M_{S2})	Punkt 3 (n_{max} / M_d)	Punkt 4 (n_{max} / M_{S2})
Rad-Schlupf-Verluste	1237	2280	16	936
Getriebe	190	247	127	365
Leistungselektronik	794	916	736	985
Bordnetz	150	150	150	150
Motor	1944	3245	3700	5190
Batterie	623	1135	51	1605
Summe der Verluste	4838	7973	4780	9231
Vortriebsleistung [kW]	40.5	52.5	8.4	62.8
Wirkungsgrade [%]				
Gesamtfahrzeug	89.3	86.8	63.7	87.2
Motor	95.6	94.4	70.0	92.5
Leistungselektronik	98.4	98.4	94.3	98.5

$$\alpha = 0$$



Beispiel: Reichweite E-Auto im FTP-72 Zyklus

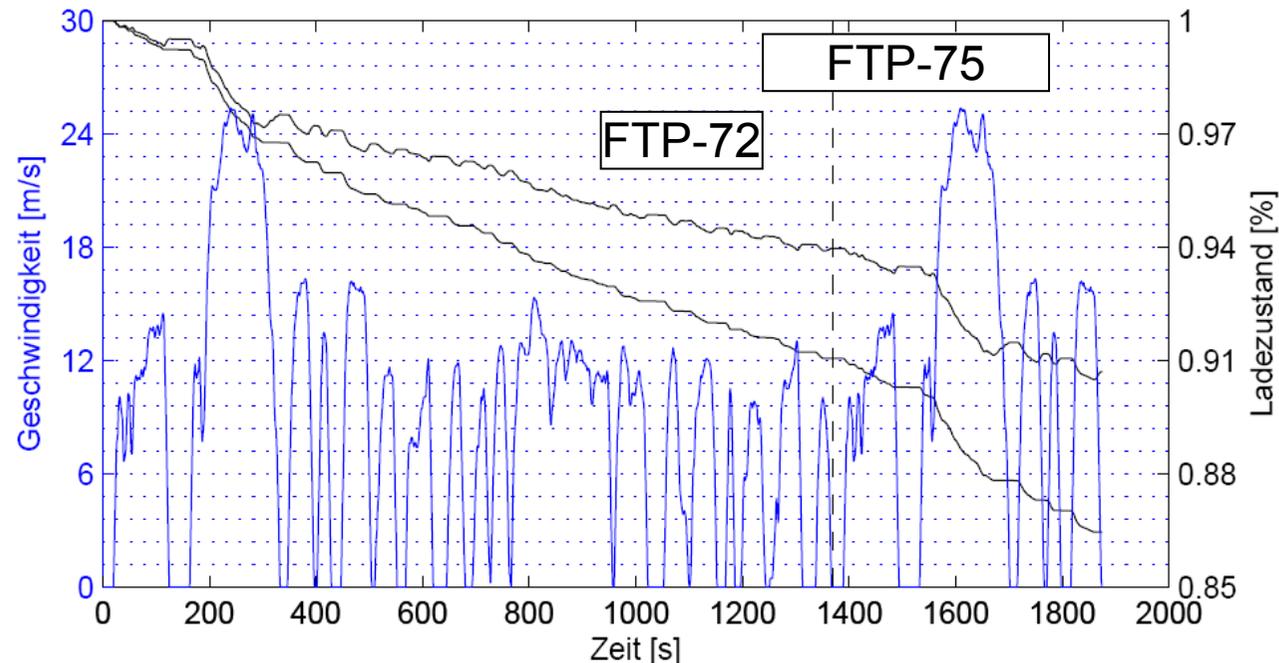
- FTP-72: 195 Kilometer Reichweite
- FTP-75: 188 Kilometer
- NEFZ: 104 Meilen / 168 Kilometer



Beispiel: E-Auto im FTP-72 Zyklus – Rekuperation

- Unterschied durch Rekuperation im FTP-72 und FTP-75

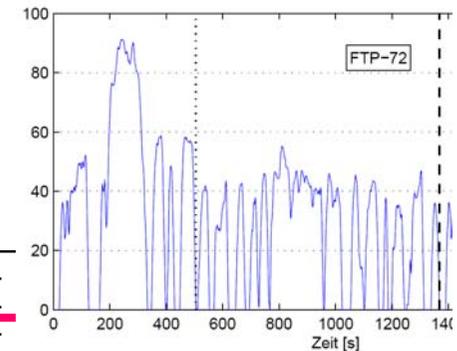
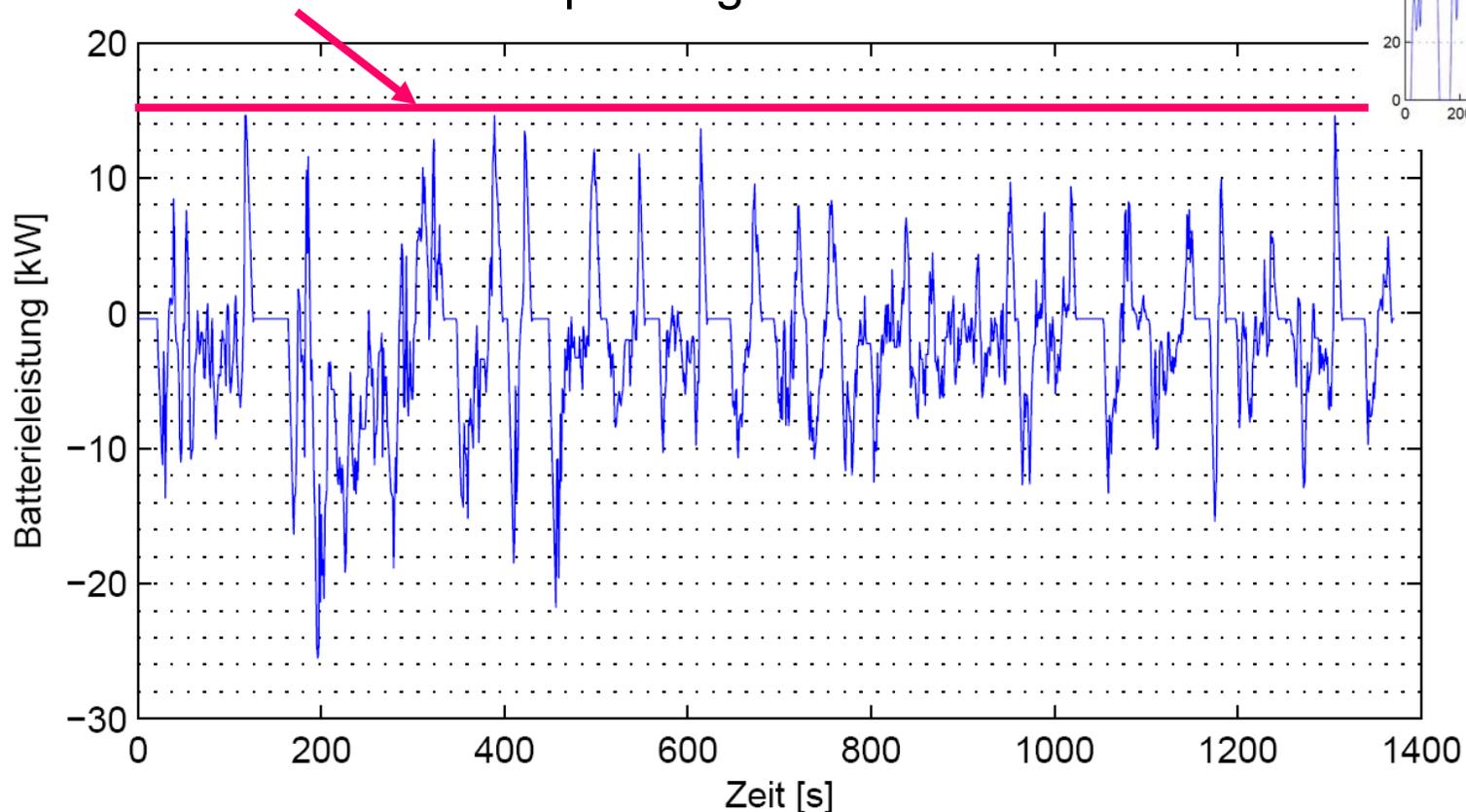
$\alpha = 0$



	FTP-72	FTP-75
Ladezustand mit Rekuperation	94%	91%
Ladezustand <u>ohne</u> Rekuperation	90,9%	86,5%
Ersparnis	34%	33,3%

Beispiel: E-Auto im FTP-72 Zyklus – Batteriebelastung

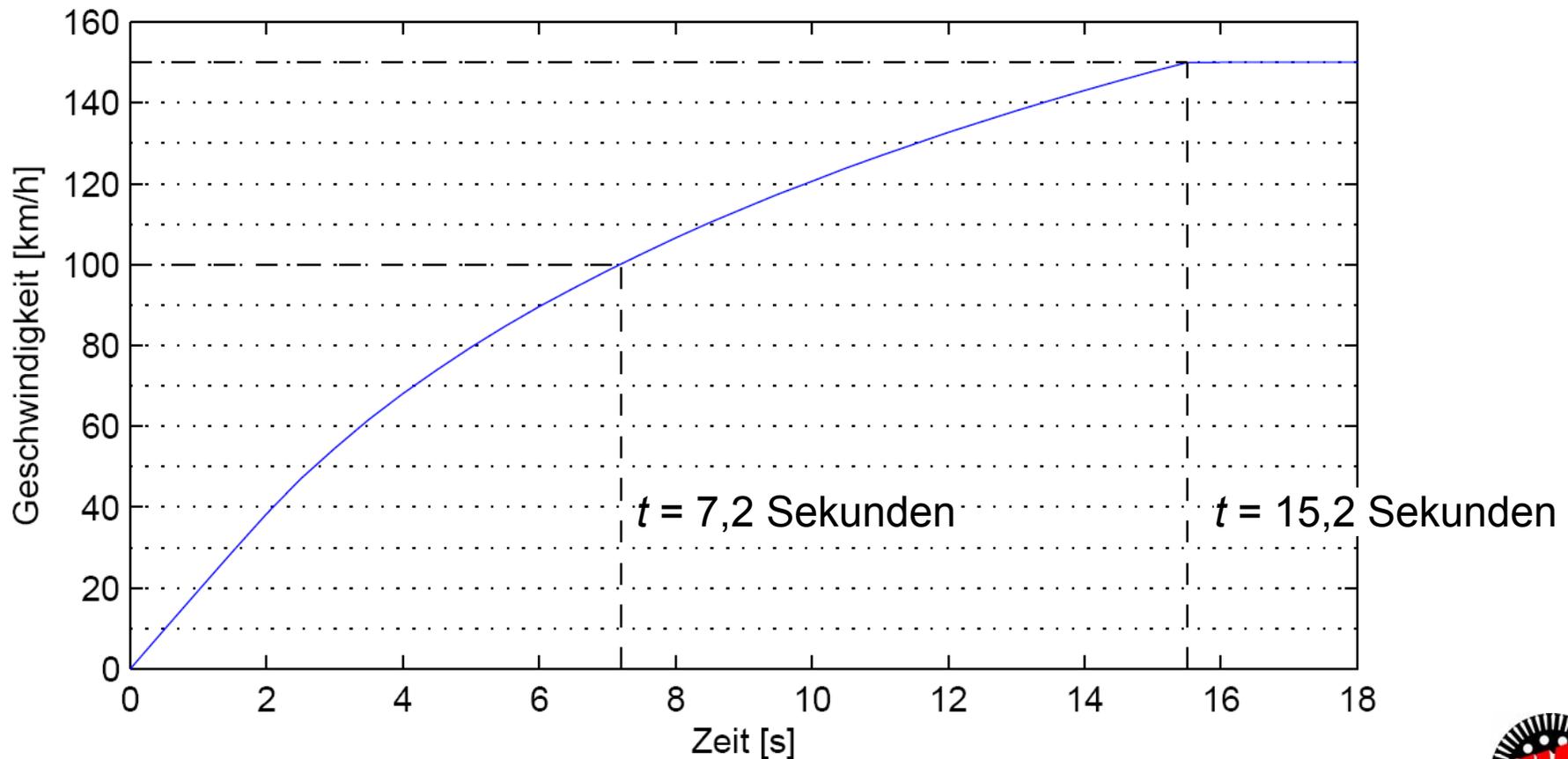
- Batterieleistung im FTP-72 Zyklus
- **Grenzwert** für Rückspeisung bei 14.6 kW



Beispiel: E-Auto Ergebnisse im Sprint

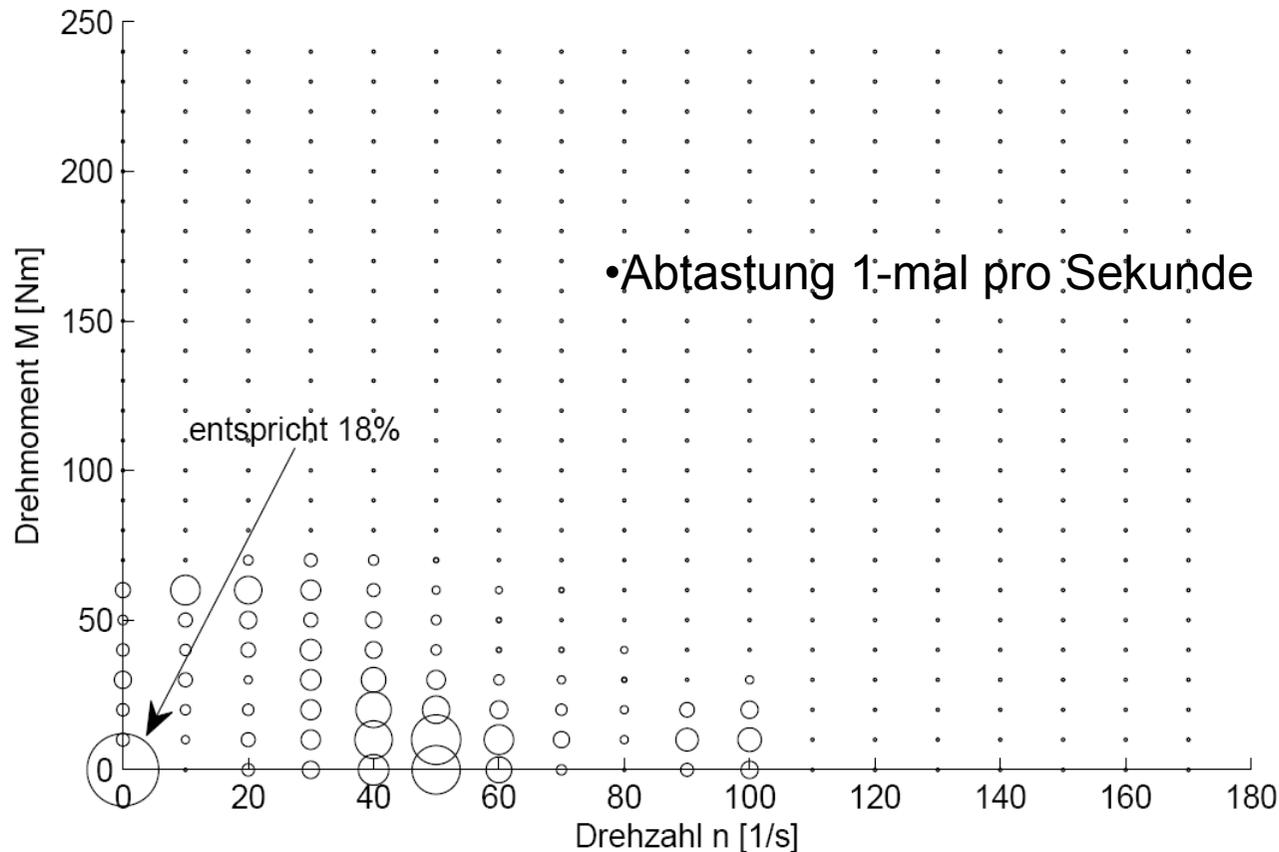
- 7,2 Sekunden von Null auf 100 km/h
- 15,2 Sekunden von Null auf 150 km/h

Leermasse 900 kg, $\alpha = 0$



Beispiel: E-Auto Betriebszeiten in % im Motorkennfeld

- Im gleichen Maße gerasterte Aufenthaltshäufigkeit des FTP-72 Zyklus
- Am Getriebeeingang anliegende Drehzahl-Drehmoment-Kombination in 10Nm und 10 1/s Abständen zusammengefasst

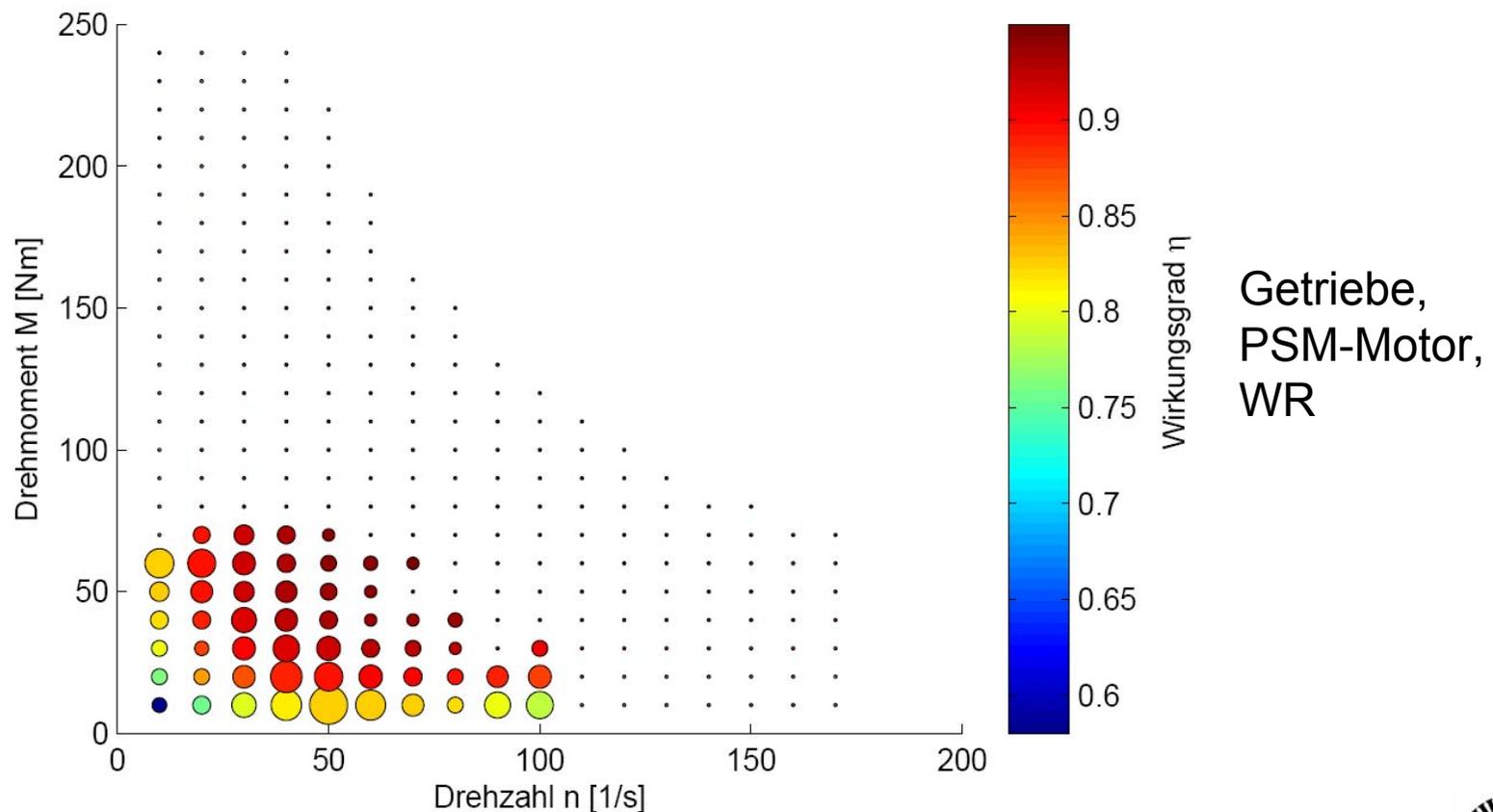


Beispiel: E-Auto: Häufigkeit der vorkommenden Wirkungsgrade im FTP-72 Zyklus



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Fläche der Punkte = Maß für Aufenthaltshäufigkeit
- Farbverlauf = Maß für Wirkungsgrad



Praxisorientierte Projektierung elektrischer Antriebe (PPEA) - Elektroautos



Viel Spaß beim Selbst-Auslegen eines E-Auto-Antriebs !



Quelle: Tesla roadster

