

Batteriesysteme und Antriebe - Was bringt die Zukunft?

Elektromobilität

VDI, 07.05.2025, 18:30, TZA

Teil 1: Elektrische Antriebe

Dr. Heinz Schäfer - Schäfer e-Mobility

Teil 2: Batteriesysteme

Prof. Dr.-Ing. André Böhm - Hochschule Esslingen, Fakultät Mobilität und Technik

Dipl.-Ing. Detlev Rammoser

Anschließend Diskussion



Elektrische Antriebe

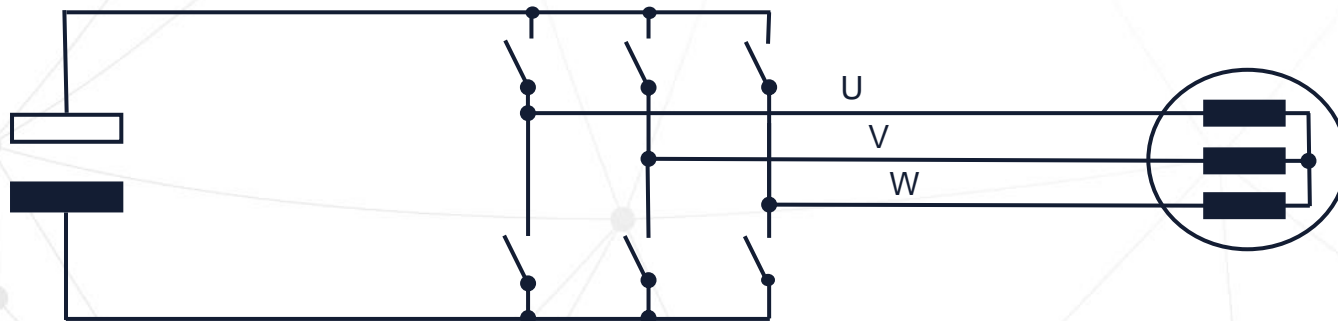
VDI Augsburg, 7.5.25

Dr.-Ing. Heinz SCHÄFER

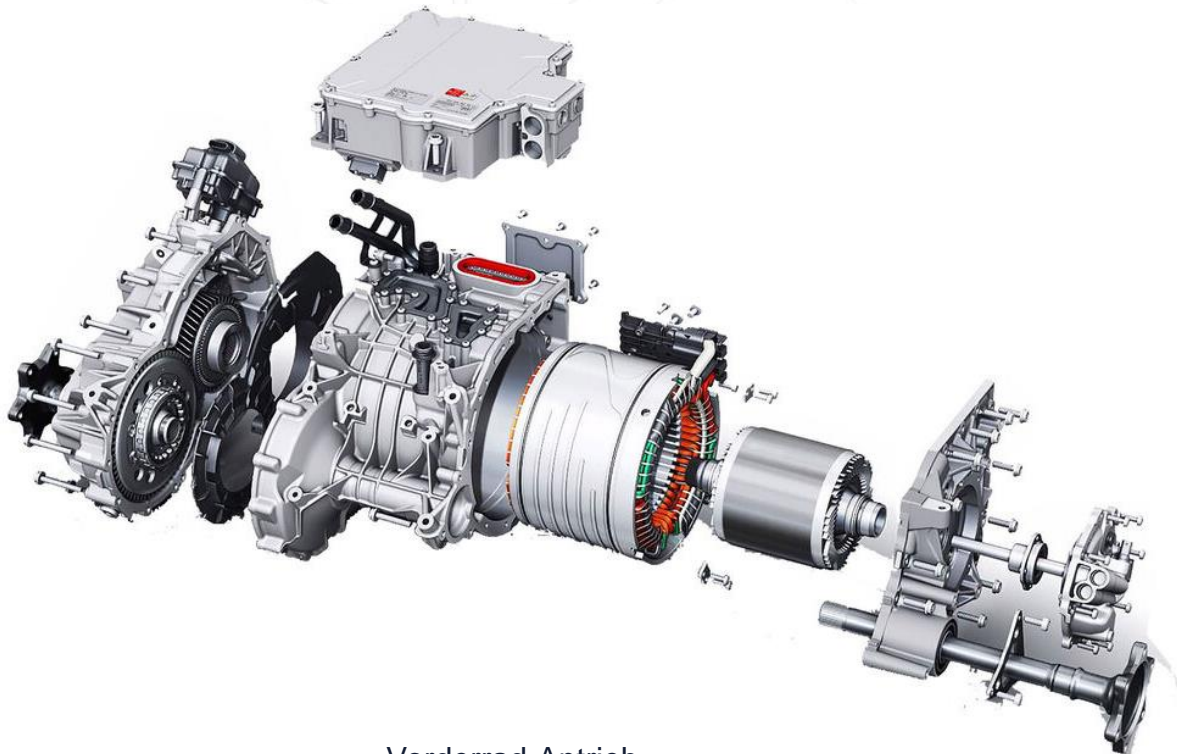
Senior Advisor, hofer powertrain



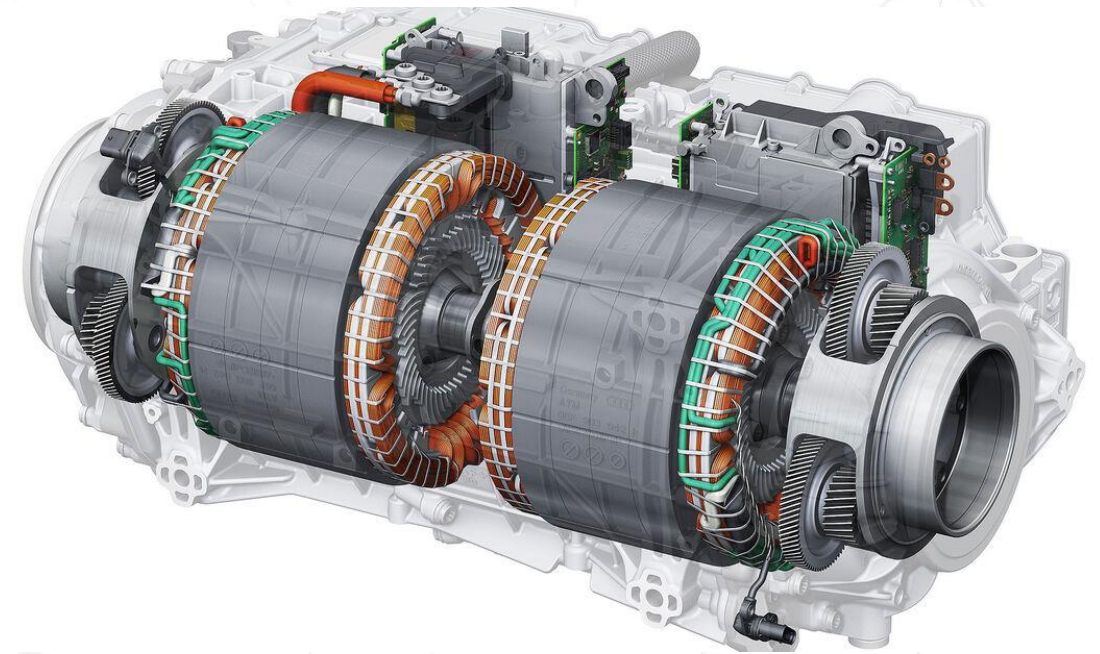
Basis Komponenten Antriebsstrang



Beispiel eines integrierten Antriebssystems: Audi E-Tron



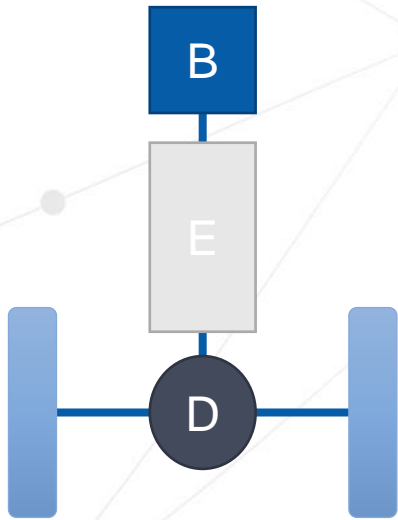
Vorderrad-Antrieb



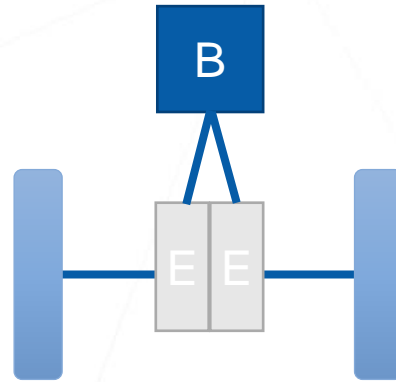
Hinterachs-Antrieb

Verschiedene Konfigurationen

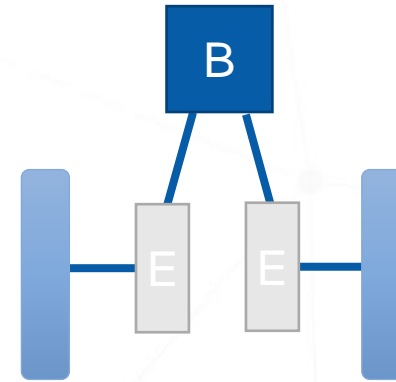
Vorder- oder Hinterradantrieb



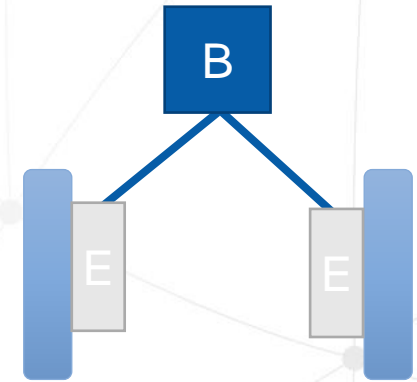
Tandemantrieb



Radnaher Antrieb



Radnabenantrieb



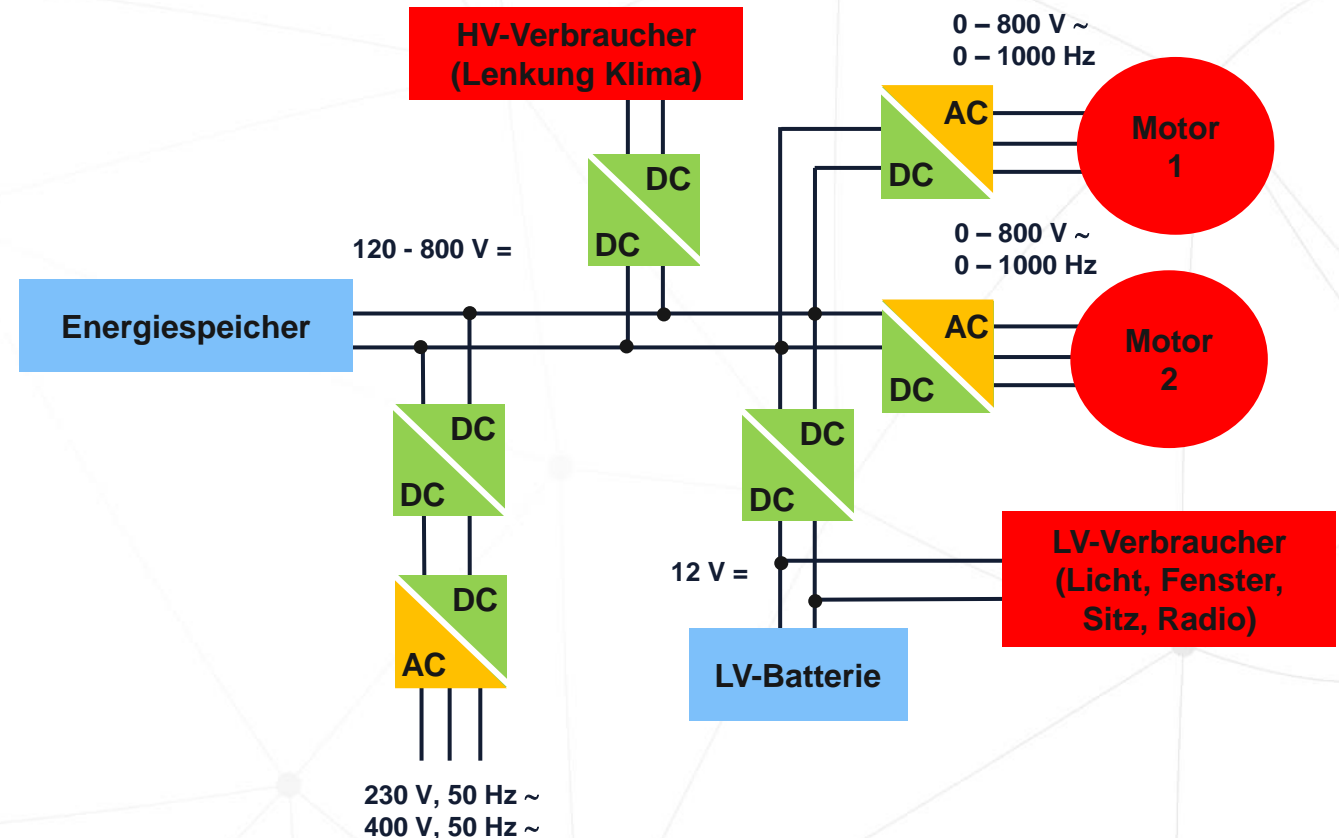
B: Batterie
E: Elektromotor und Umrichter, gegebenenfalls Getriebe
D: Differential

Topologie eines Batterie elektr. Antriebssystems (BEV)

Je höher die Systemspannung ist, desto geringer sind bei gleicher Leistung die Ströme. Damit können die Kupferleitungen zwischen den Komponenten und auch die elektrischen Kontakte bzw. Stecker kleiner und damit kostengünstiger gebaut werden.

Gleichzeitig steigt jedoch der Aufwand zur elektrischen Isolation und beim Schutzkonzept.

Der Hochvolt-Energiespeicher ist vom Chassis isoliert. Der Minuspol der Niedervoltbatterie ist galvanisch mit dem Chassis verbunden.

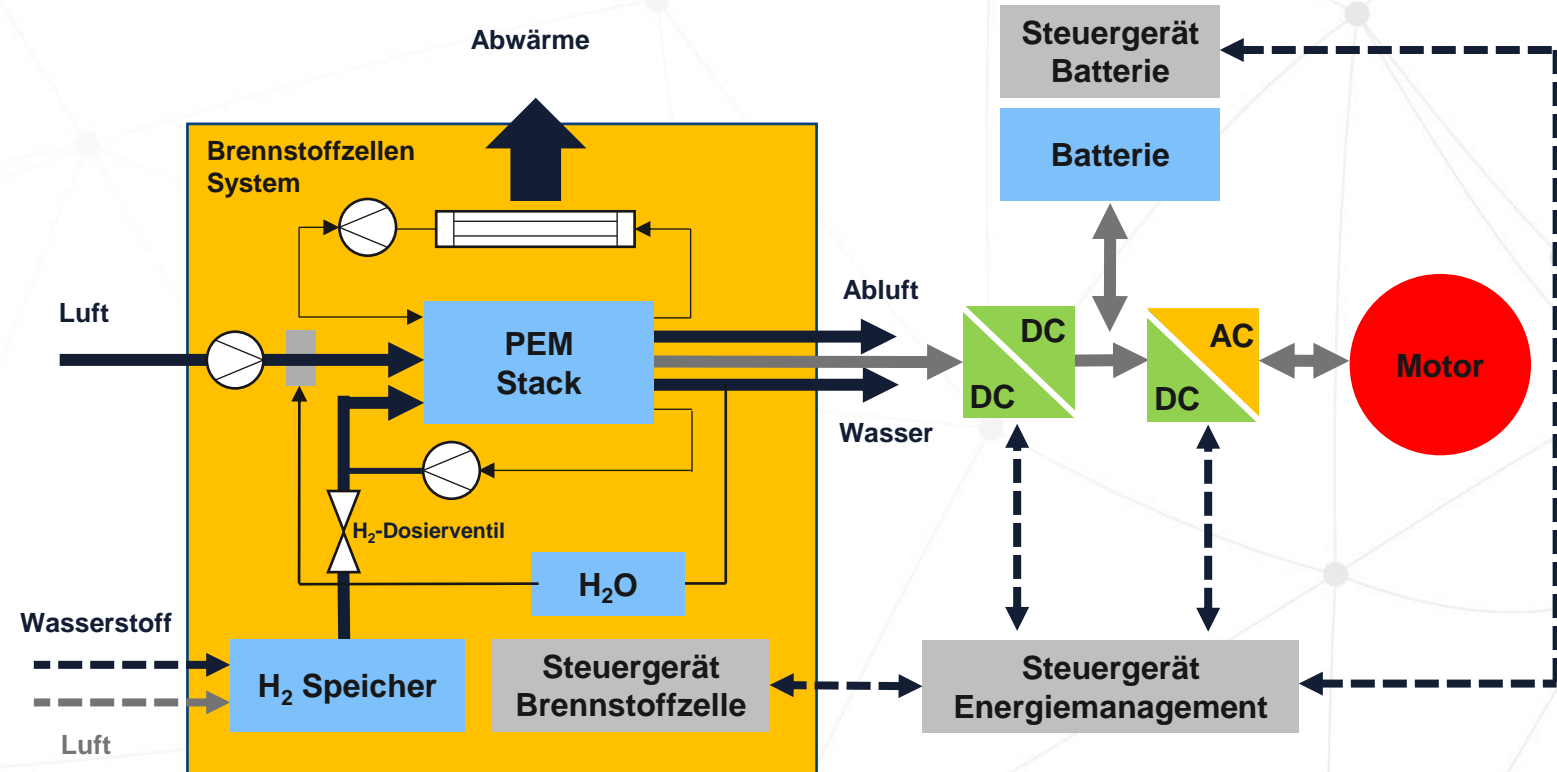


Topologie eines Brennstoffzellen-Systems

Da die Spannung des Brennstoffzellensystems stark lastabhängig ist, kann anders als bei einem Batteriespeicher nicht auf einen stabilisierenden DC/DC Wandler verzichtet werden.

Danach folgen der übliche Wechselrichter (DC/AC-Wandler) und der Elektromotor.

Zur Überbrückung der mehreren Minuten dauernden Kaltstartphase des Brennstoffzellen-Stacks und zur Aufnahme der rekuperierten Energie wird weiterhin eine Batterie benötigt.



Niederspannungs-Lösungen

Vorteile

- Normkonforme Gleichspannung (LV123 HV_2b)
- Klar definierte und geringe Luft- und Kriechstrecken
- Bereits vorhandene Basiskomponenten

Nachteile

- Große Querschnitte aufgrund hoher Ströme
- Höchste Anforderungen an Übergangswiderstände für die Energieverteilung
- Hohe DC-Ladeströme und längere Akkuladezeiten aufgrund thermischer Ursachen (I^2R)
- Höheres Gesamtgewicht im Vergleich

Hochspannungs-Lösungen

Vorteile

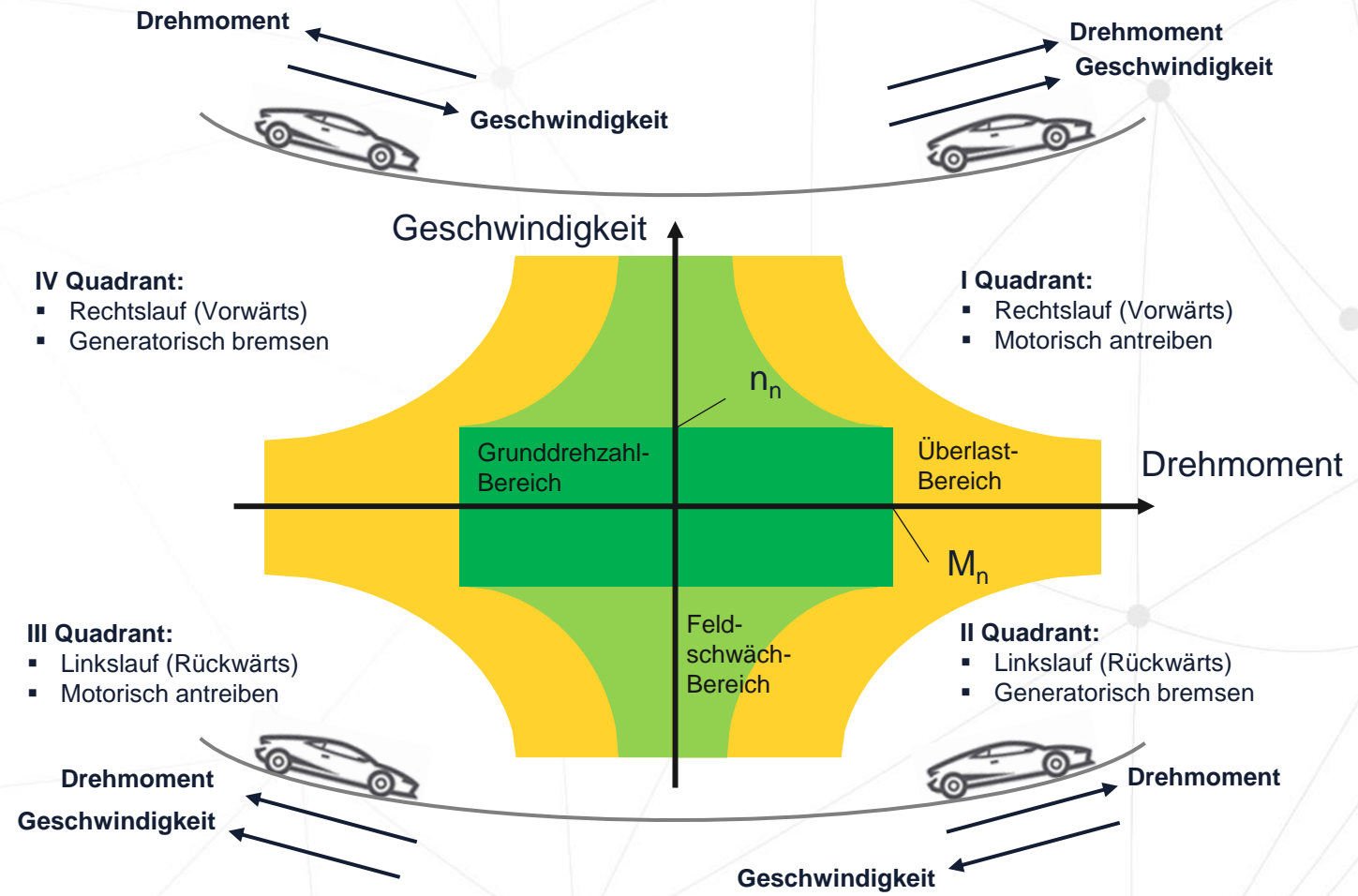
- Kürzere Batterieladezeiten aufgrund geringerer thermischer Belastung (I^2R)
- Mehr Freiheitsgrade zur Drehmomentsteigerung bei hohen Drehzahlen
- Entschärfung des Zielkonflikts zwischen Leistung und thermischem Verhalten
- Relativ geringes Gesamtgewicht

Nachteile

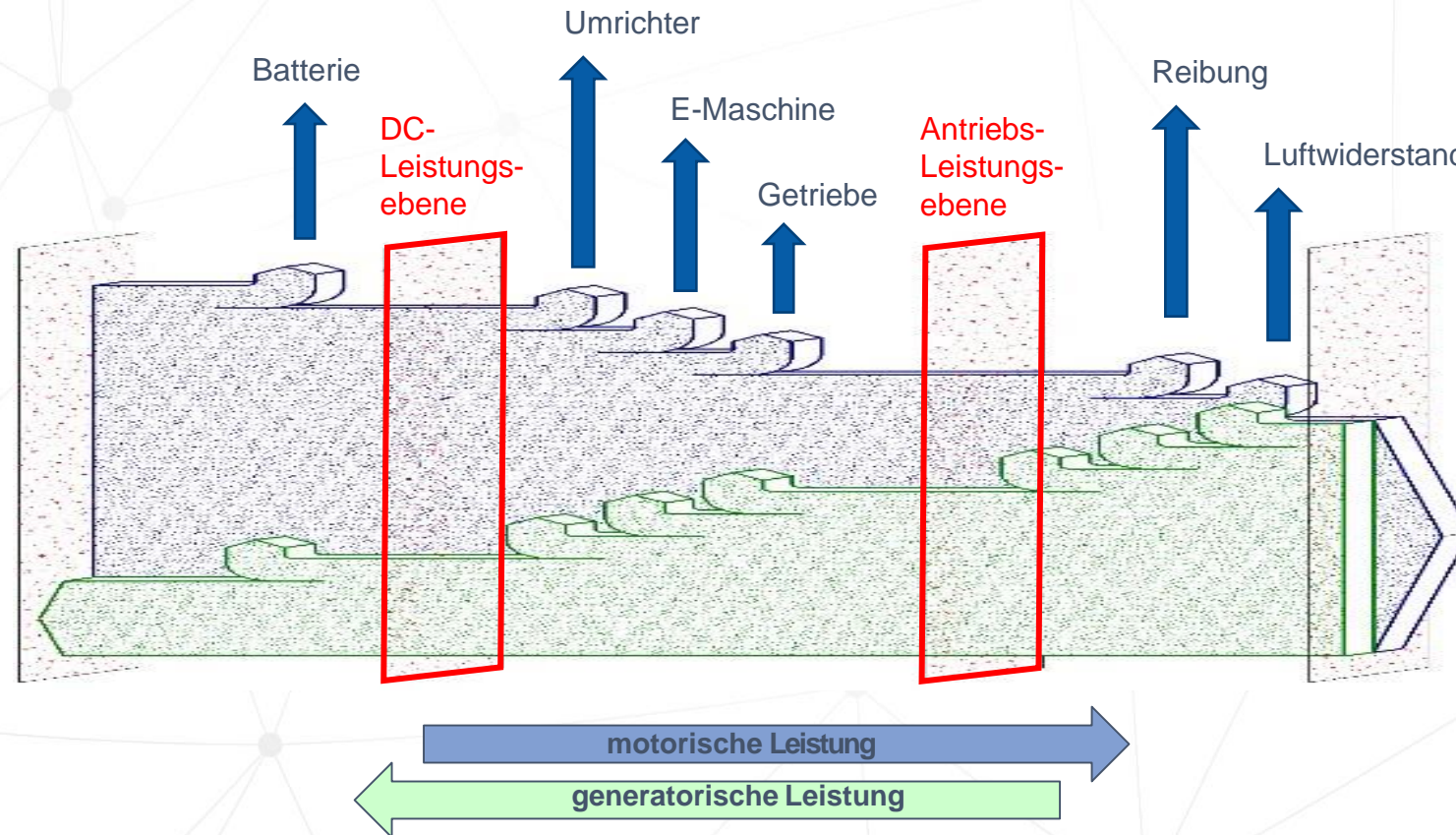
- Teilweise nicht normgerechte Gleichspannung (\neq LV123 HV_3) aber IEC_60664 (Industriestandard)
- Weniger vorhandene Basiskomponenten verfügbar im Vergleich zur Hochstrom-Lösung
- Erhöhter Isolationsbedarf bedeutet mehr Platzbedarf
- Anforderungen bzgl. Komponenten, Luft- und Kriechstrecken

Vorteile elektrischer Antrieb

- Kein Rückwärtsgang notwendig
- Eingängiges Getriebe möglich
- Bremsleistung durch Energierückgewinnung
- Keine Kupplung notwendig
- Kein Anlasser notwendig
- Hohe Drehmomentdynamik



Motorischer und generatorischer Leistungsfluss:



Man unterscheidet zwei Arten von Leistungen:

Nennleistung: (auch Dauerleistung)

Das Gesamtsystem ist so ausgelegt, dass diese Leistung dauerhaft zur Verfügung steht. Die Erwärmung und Kühlung der E-Maschine sind im Gleichgewicht und auf einem für die E-Maschine akzeptablen Niveau.

Spitzenleistung:

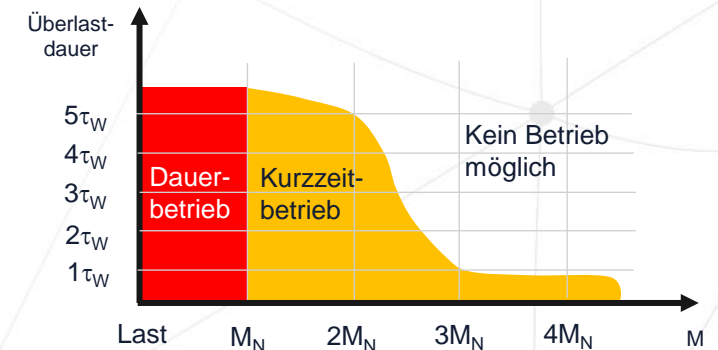
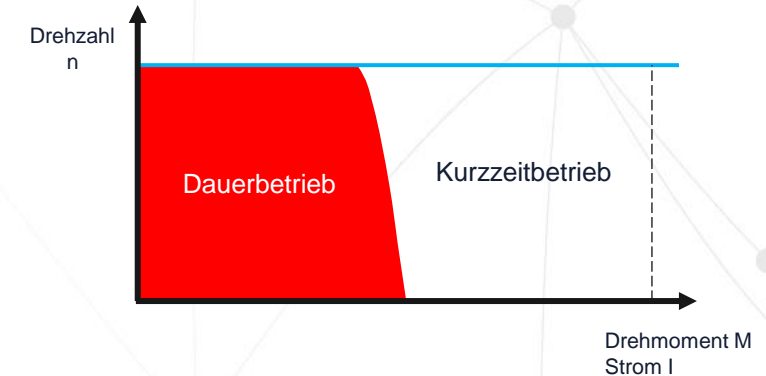
Da eine E-Maschine sehr robust aufgebaut ist und größtenteils durch die Maximaltemperatur der Wicklungsisolation und der Magnete begrenzt ist, wird Ihre Leistung durch den Arbeitstemperaturbereich definiert.

Hierdurch können höhere Leistungen als die oben beschriebene Nennleistung abgerufen werden, solange sich die Temperaturen innerhalb der erlaubten Grenzen befinden. Spätestens wenn die Grenztemperatur erreicht ist, muss auf die Nennleistung zurückgeregelt werden.

Spitzenleistungen können unterschiedlich angegeben werden:

P10s = Spitzenleistung, welche die Maschine für 10 Sekunden liefern kann

PXs = Spitzenleistung, welche die Maschine für X Sekunden liefern kann

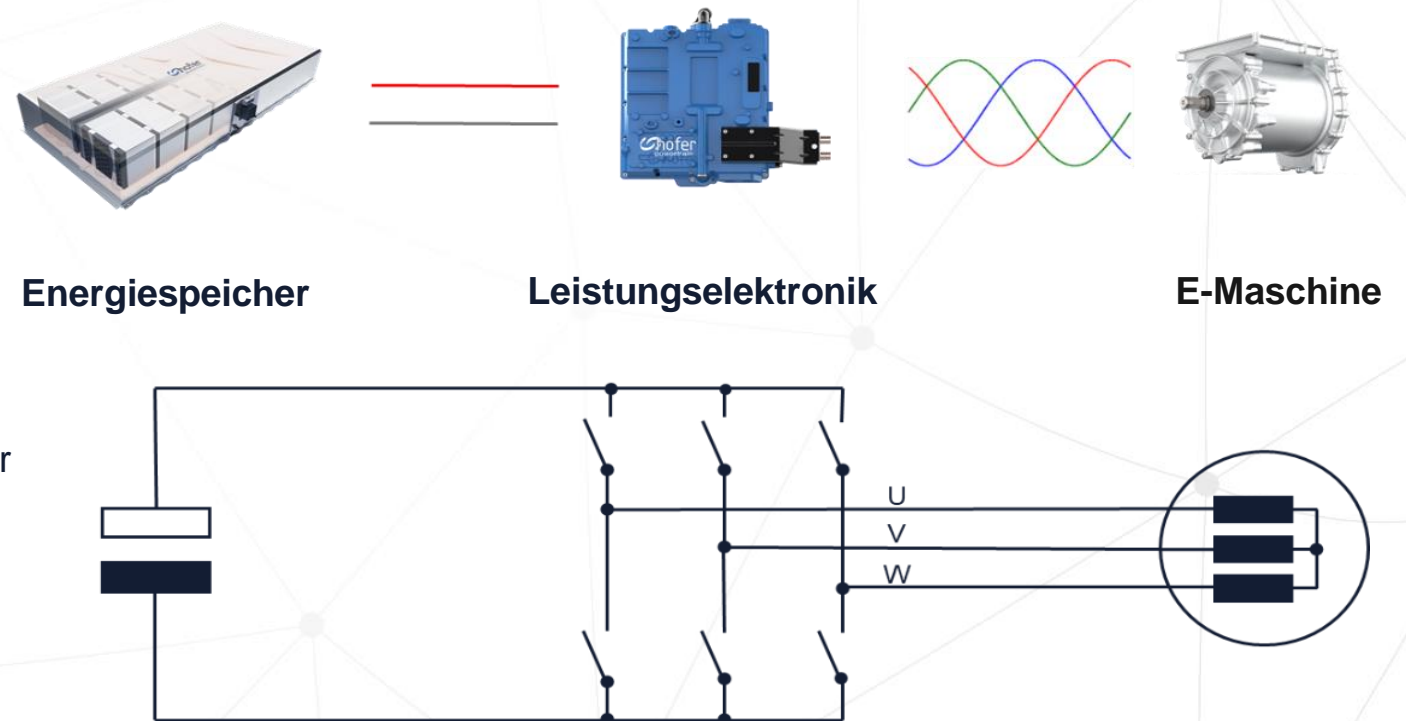


Typischer elektrischer Antriebsstrang

Typische Werte:

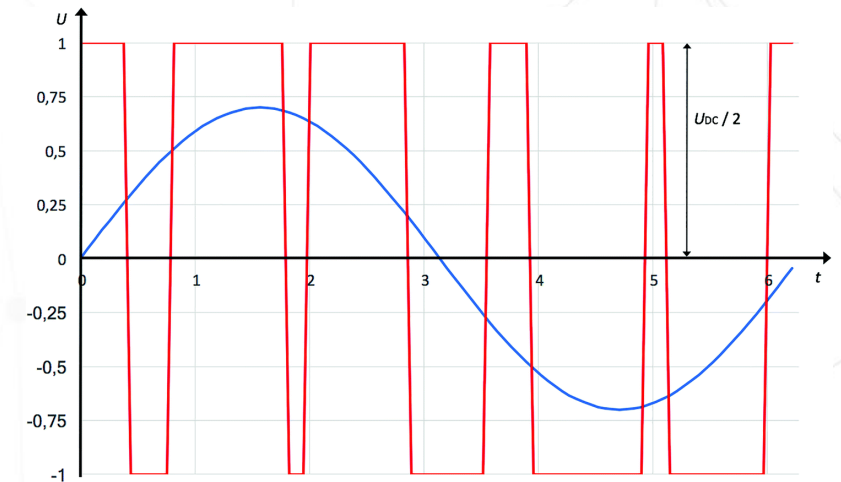
- Lithium-Ionen Batterie
- Nennspannung von 300 bis 800 V
- Drei-phasiger Umrichter
- IGBT Leistungsmodule
- Schaltfrequenzen von ca. 10 kHz
- Elektrische Maschine als PSM, FSM oder IM

Die Schnittstelle zum Energiespeicher (Ladegerät) und zur elektrischen Maschine (Getriebe) ist nicht dargestellt in nebenstehender Abbildung.



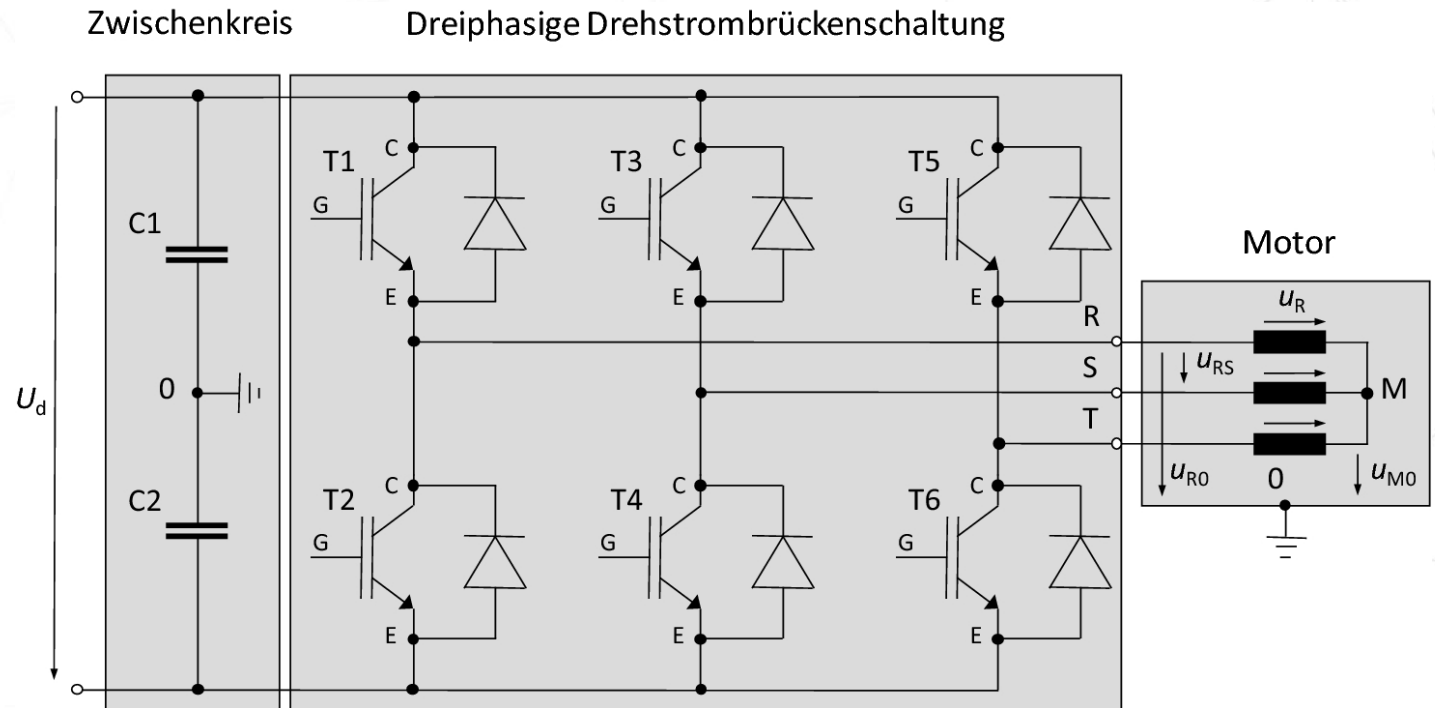
Inverter → DC/AC-Wandler

- Die Funktion beruht auf dem Prinzip der „Zerhackung“ einer Gleichspannung
- Taktverfahren wird als Pulsweitenmodulation (PWM) bezeichnet
- Gleichspannung wird durch schnelle Ein- und Ausschaltphasen zerlegt (rot)
 - Je länger die Ausschaltphasen desto geringer der Effektivwert Wechselspannung
 - Je länger die Einschaltphasen desto höher der Effektivwert Wechselspannung
- Induktivität des Motors (Tiefpassfilter) glättet den Stromverlauf (blau)
- Typische Taktfrequenzen zwischen 4 und 16 kHz (Ausgangsfrequenz x 10)
- Typische Ausgangsfrequenzen 0 – 1.000 Hz, abhängig von
 - Polzahl des Motors
 - Gewünschter Motordrehzahl
- Inverter ist marktabhängig auch unter anderen Bezeichnungen bekannt
 - Umrichter / Wechselrichter
 - 4 Quadrantensteller
 - Electric Speed Controller



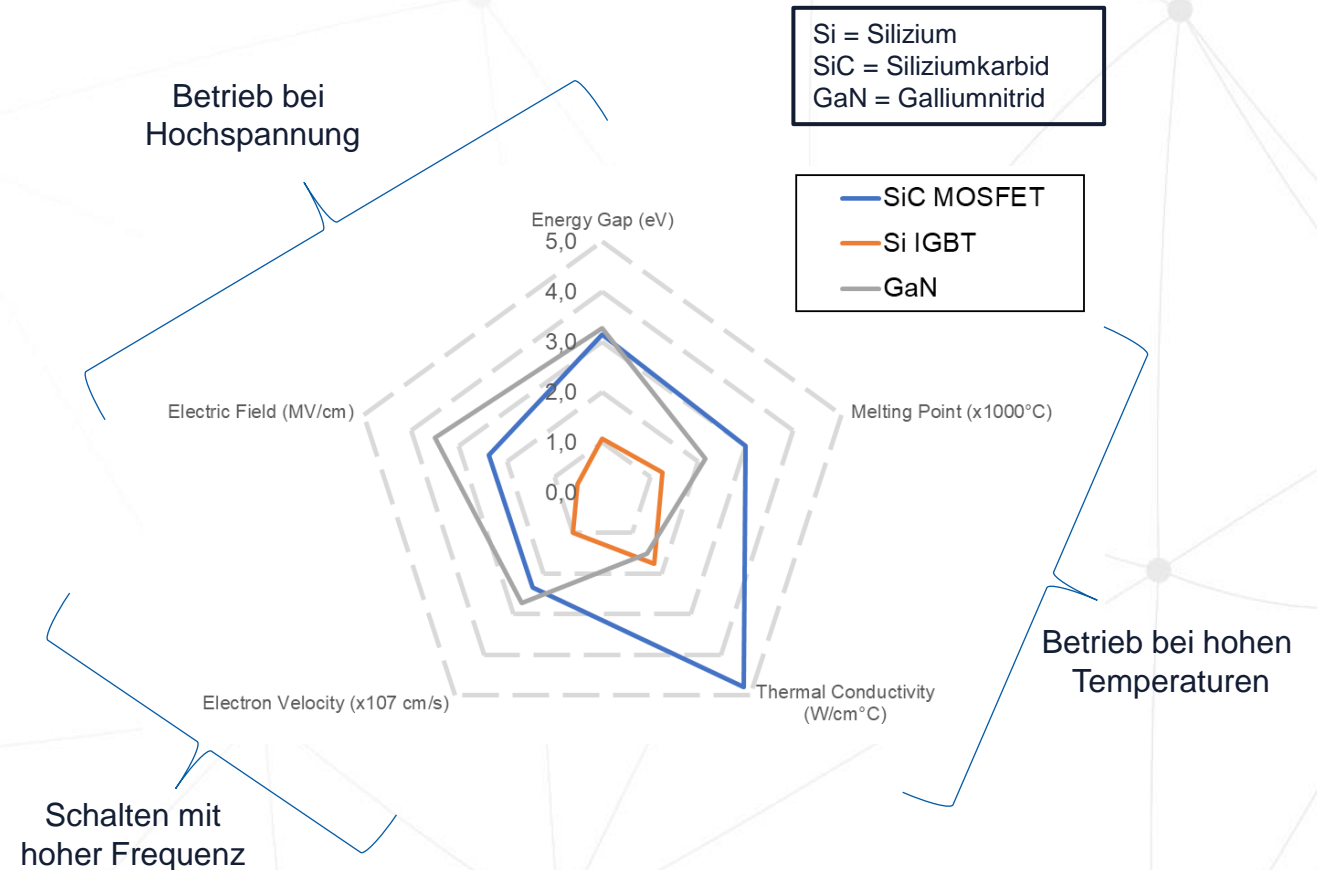
Schaltungskonzept

- Die von der Batterie gelieferte Spannung U_d wird in einem Zwischenkreis stabilisiert.
- Jedes Ende der drei Phasen (R, S, T) der Motorwicklung kann über einen oberen Schalter (T1, T3, T5) mit dem Pluspol der Batterie und über einen unteren Schalter (T2, T4, T6) mit dem Minuspol der Batterie verbunden werden. Hieraus resultieren 8 mögliche Schaltzustände.
- Entsprechende Schaltstrategien führen zu dem auf der vorherigen Seite beschriebenen Effekt.



Vergleich von Halbleiterschaltern

- Sowohl Siliziumkarbid als auch Galliumnitrid haben bessere elektrische Eigenschaften als Silicium (IGBT) und ermöglichen insbesondere bei Teillast höhere Schaltfrequenzen und niedrigere Einschaltwiderstände.
- Darüber hinaus hat SiC ausgezeichnete thermische Eigenschaften, wodurch sehr hohe Betriebstemperaturen möglich sind und der Kühlbedarf bzw. Aufwand reduziert werden kann.
- Dies ermöglicht die Konstruktion von Stromrichtern mit höherer Leistungsdichte, höherer Effizienz und höherer zulässiger Betriebstemperatur. Dies kann Platz, Gewicht und Kosten sparen.





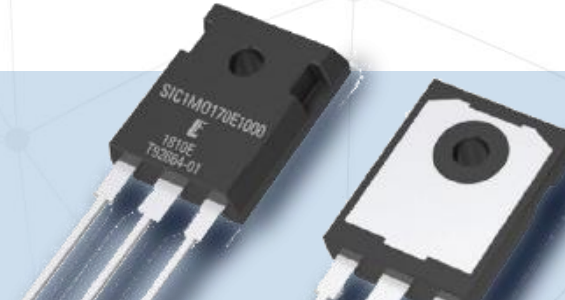
STAND DER TECHNIK: 650V SI IGBT



Beispiel: Modul Infineon HP2



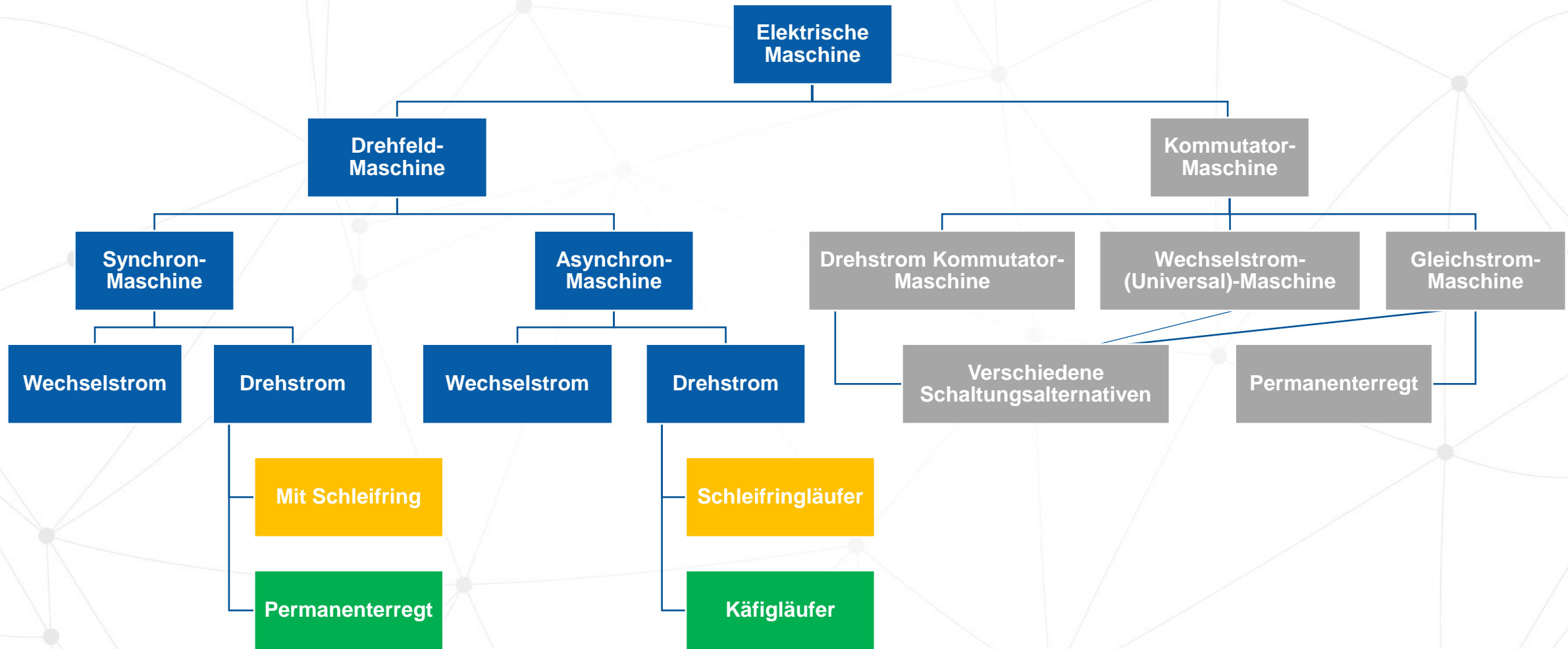
WIDE BANDGAP HALBLEITER: 650V SIC MOSFET



Beispiel: SiC MOSFET

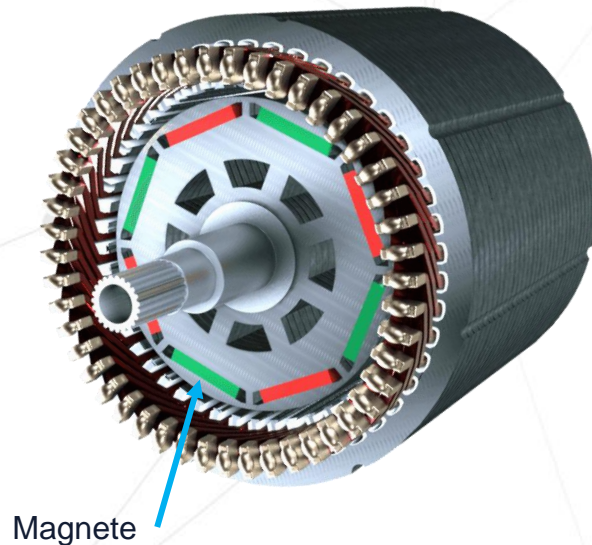
Skalierung von thermischen und elektrischen Eigenschaften:

- ⧗ Effizienz (2 – 3 % höhere Umrichter Effizienz [im Last Profil])
- ⧗ Lebensdauer
- ⧗ Chip Größe (SiC Gen 3 ca. halbe Chip Größe als HP2)
- ⧗ Höhere Betriebstemperaturen
- ✗ Höhere Chip Kosten (Produktionsstabilität → Wafer Themen)



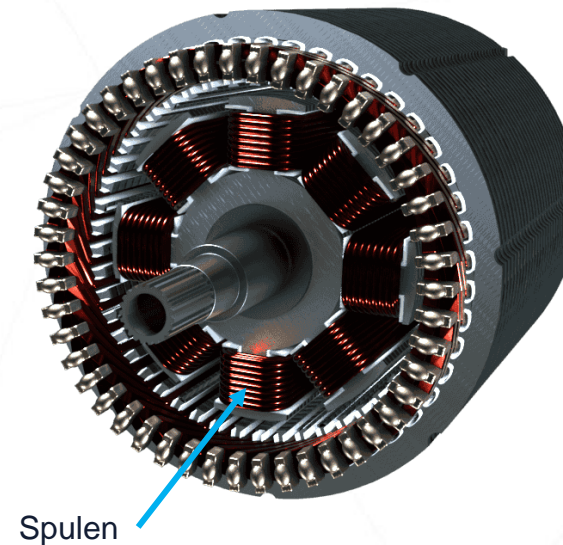
PMSM

Permanent Magnet Synchronous Machine



SESM

Separately Excited Synchronous Machine



ASM / IM

Asynchronous Machine / Induction Machine



- Neben den gezeigten Innenläufern gibt es auch Außenläufer. Hierbei befindet sich der Stator innen und der Rotor außen.
- Neben den gezeigten Radialflussmaschinen gibt es Axialflussmaschinen. Hier verläuft der magnetische Fluss anstatt von innen nach außen von vorne nach hinten.

Vor- und Nachteile

Synchronmaschinen

- Synchronmaschinen drehen genau drehzahlsynchron zum Drehfeld.
- Der Gleichlauf weicht nur einige Winkelgrade einer mechanischen Umdrehung ab, je größer die Belastung der Maschine ist, desto größer wird dieser sog. Polradwinkel, von nahezu 0° bei Leerlauf bis maximal 90° bei Volllast.
- Das Feld auf dem Rotor wird entweder durch Permanentmagnete oder über eine Wicklung auf dem Rotor die über Schleifringe mit Gleichstrom versorgt wird erzeugt. Auf dem Rotor der Synchronmaschine befindet sich demnach ein Gleichfeld, daher läuft sie synchron mit dem Ständer-Drehfeld.
- Relativ teuer
- Absicherung Notwendig. (z.B. Schleppbetrieb)

Asynchronmaschinen

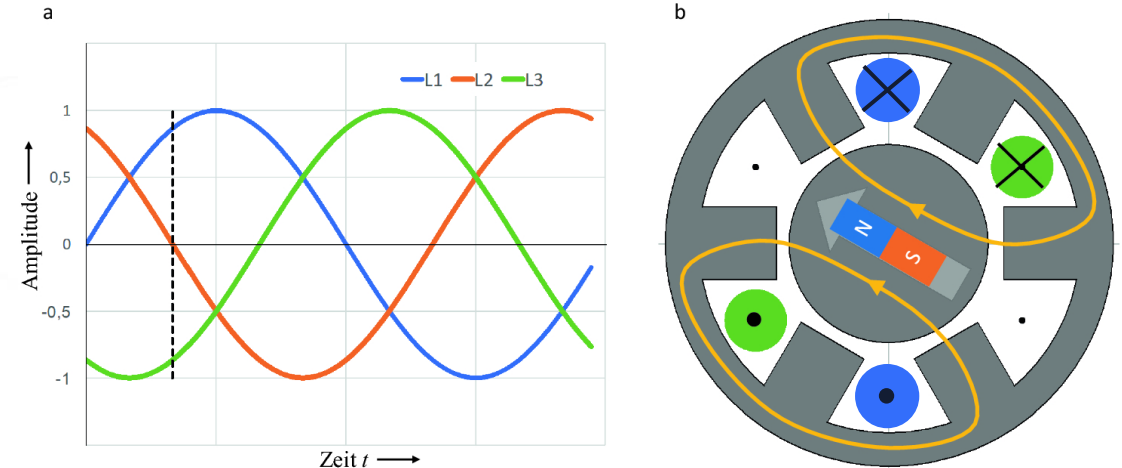
- Asynchronmaschinen drehen langsamer als das Ständer-Drehfeld im Motorbetrieb und schneller im Generatorbetrieb.
- Der Rotor hat permanent im Motorbetrieb eine niedrigere Drehzahl als das Drehfeld, dieser Effekt, Schlupf genannt, ist um so ausgeprägter, je größer die Belastung der Maschine ist.
- Das Feld auf dem Rotor wird von einer zweiten Drehstromwicklung auf dem Rotor erzeugt. Die Drehgeschwindigkeit dieses Feldes entspricht der dem zuvor genannten Schlupf.
- Dieses zweite Rotordrehfeld wird entweder durch eine Wicklung auf dem Rotor erzeugt, die über Schleifringe mit Drehstrom oder berührungslos vom Ständerdrehfeld gespeist wird.
- Keine Entkoppelung / Absicherung notwendig
- Günstiger da Verzicht auf Magnete

Grundkonfiguration eines 3 phasigen Drehstrommotors

In der Abbildung a sind die Zeitverläufe der Ströme in den drei Phasen (L1= blau, L2 = orange, L3 = grün) eingezeichnet.

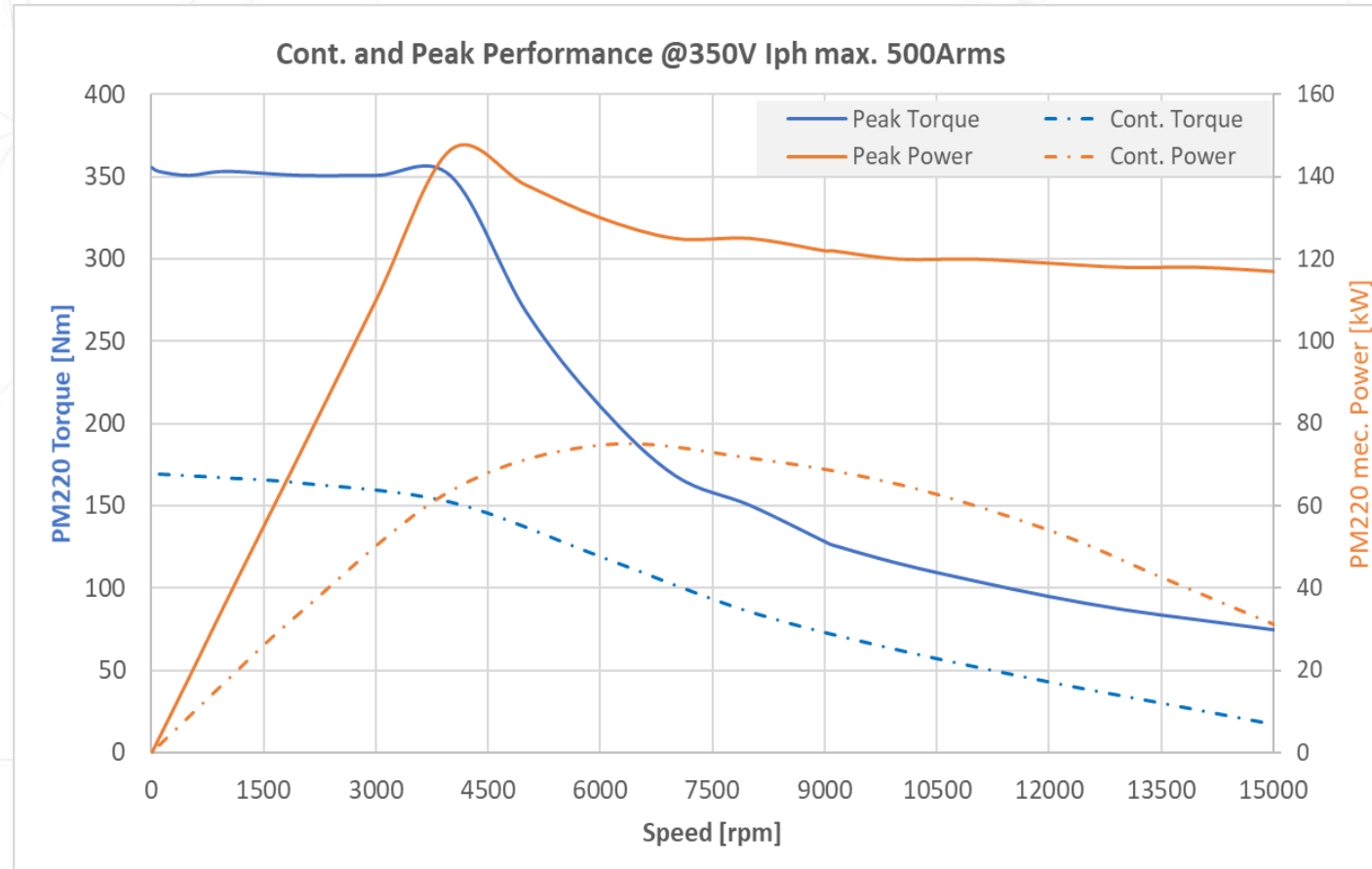
Abbildung b zeigt einen Drehstrommotor in seiner einfachsten Form. Man bezeichnet diese Wicklung daher auch als Urwicklung. Im Stator befindet sich für jede der drei Phasen lediglich eine einzige Spule. Die Hin- und Rückleiter sind jeweils gegenüberliegend angeordnet.

Die schwarz gestrichelte Linie bezeichnet einen zufällig gewählten Zeitaugenblick. Aktuell ist der Strom der Phase L2 (orange) praktisch null und der Strom in den anderen beiden Phasen entgegengesetzt gleich groß und nahezu maximal. Die rechte Abbildung deutet die Stromstärke durch die Größe der Kreise an.



Drehstrom (links) und Grundkonfiguration eines Drehstrommotors (rechts)
zu einem Zeitaugenblick $\varphi = 60^\circ$

Typische E-Maschinen Kennlinien



E-Maschine Dimensionierungen bei gleicher Leistung

Da die Motorleistung vom Drehmoment und der Drehzahl abhängt, gibt es zwei Möglichkeiten die Leistung zu erhöhen:

- Erhöhung des Nenndrehmomentes
- Erhöhung der maximalen Drehzahl

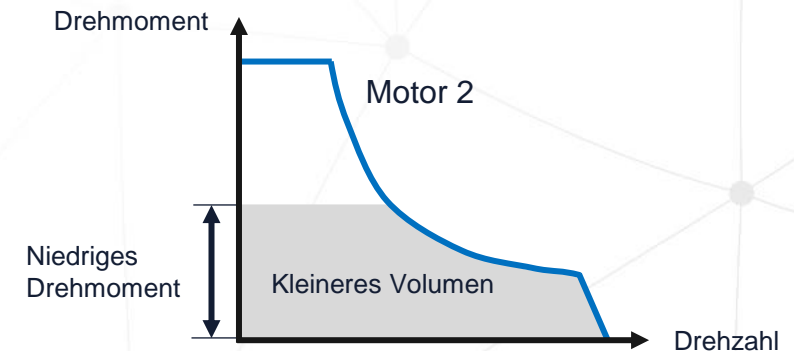
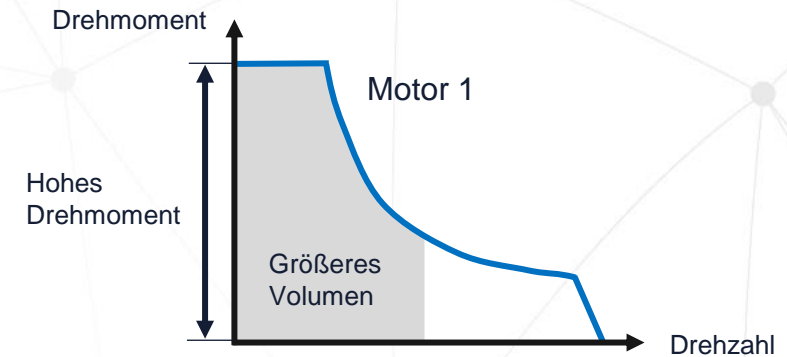
Auf der rechten Seite sind zwei Motoren mit identischer Leistung anhand ihrer spezifischen Drehzahl/Drehmoment Kennlinie dargestellt.

- Motor 1 erreicht ein hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen
- Motor 2 erreicht ein niedrigeres Drehmoment dafür bei höheren Drehzahlen

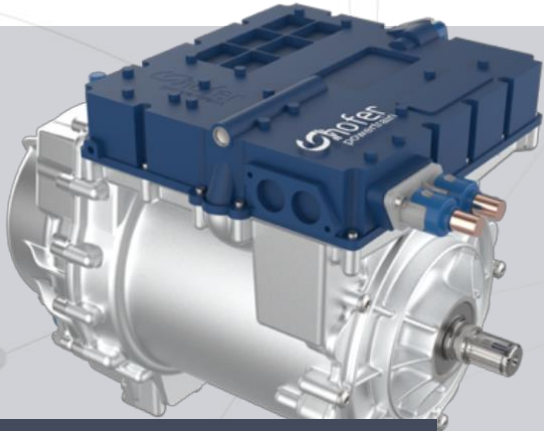
Da das Volumen proportional zum Drehmoment ist, ist das Volumen von Motor 1 größer als das Volumen von Motor 2. Die Entwicklung des richtigen Motors für den richtigen Zweck ist immer ein Kompromiss zwischen Nenndrehmoment und maximaler Drehzahl.

Auf dem Markt gibt es eine Tendenz zu kleinen Hochdrehzahlmotoren in Kombination mit einem Untersetzungsgetriebe, da das Gesamtvolumen trotzdem kleiner oder identisch sein kann im Vergleich zu größeren E-Maschinen ohne Untersetzungsgetriebe.

Gleichzeitig reduzieren sich die hohen Kosten für motorische Aktivteile.



Niedrig- und hochdrehzahl Motor im Vergleich



KONZENTRISCH

Die Leistung wird mittels Planetengetriebe und Differential übertragen.

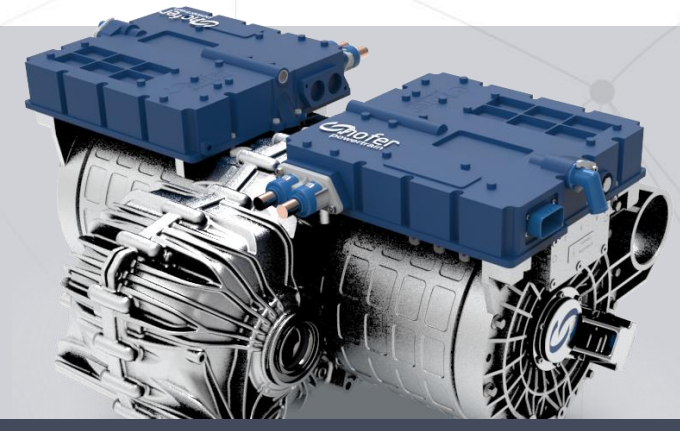
- ✓ Kompaktes Design
- ✓ Modulare EM und LE
- + Trennkupplung



ACHSPARALLEL

Die Leistung wird mittels zweistufigem Stirnradgetriebe und Differential auf zwei Halbwellen übertragen.

- ✓ Kompaktes Design
- ✓ Modulare EM und LE
- + Park Sperre

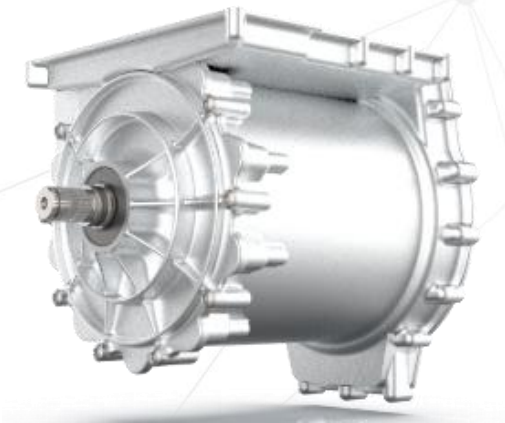


DOPPEL ACHSPARALLEL

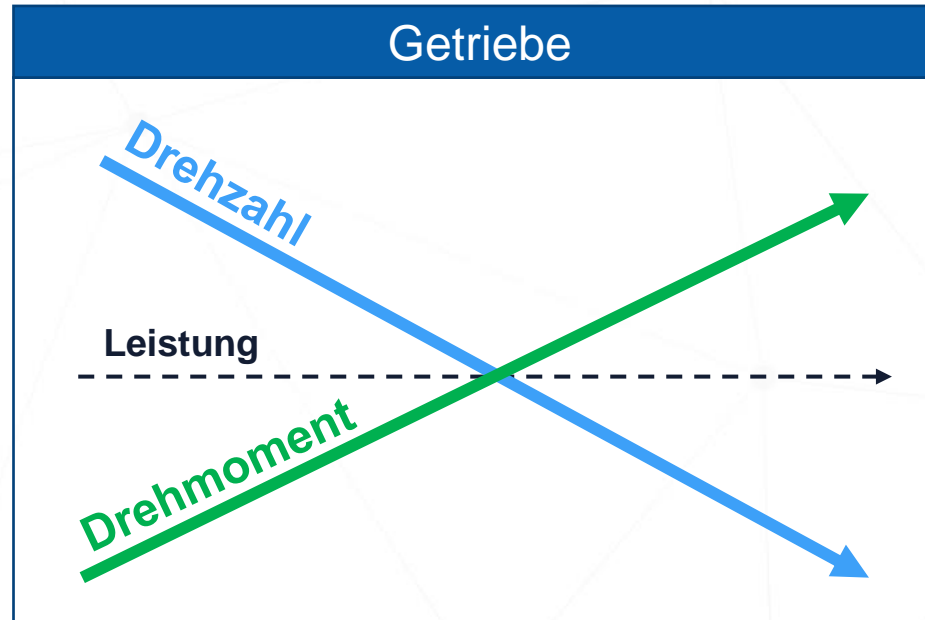
Zwei unabhängige Antriebe in einem Gehäuse für hohe Performance Ansprüche. Die Kraftübertragung auf die Halbwellen erfolgt über ein zweistufiges Stirnradgetriebe und ein Differenzial.

- ✓ Modular e-motor and LE
- + Torque Vectoring

Getriebe Grundlagen



Vorhanden:
≈ 300 Nm
≈ 13.500 – 18.000 rpm



Gefordert:
≈ 3000 Nm
≈ 1200 - 1800 rpm

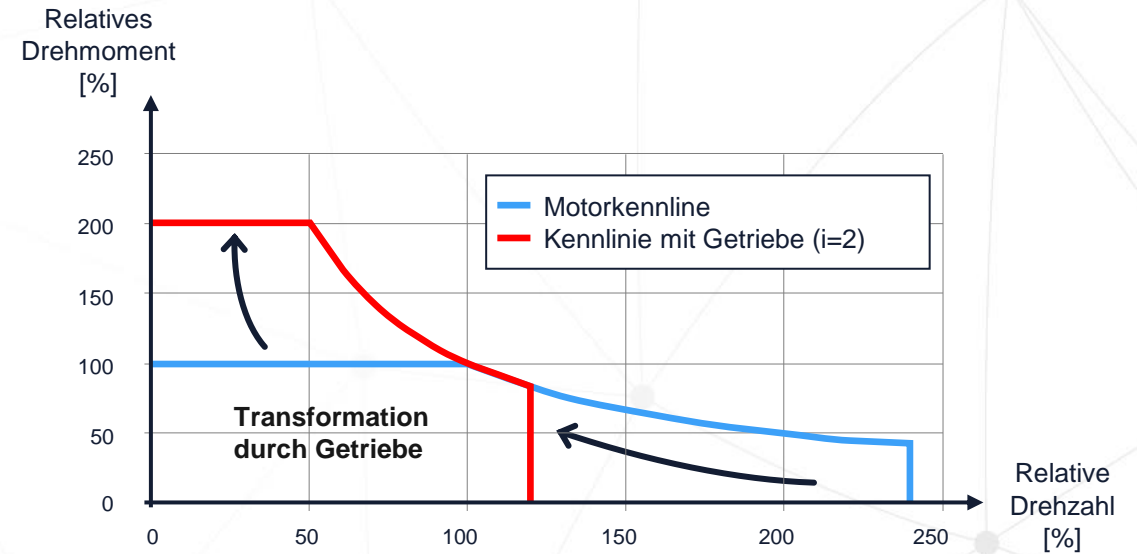
Einfluss eines Getriebes auf die Raddrehmomentkennlinie

Durch den Einsatz von Getrieben kann die E-Maschinen Kennlinie wie im Diagramm zu sehen transformiert werden. Eingängige Getriebe haben meist wenige Übersetzungsstufen und daher einen hohen Wirkungsgrad von > 95%.

Im Diagramm ist der Einfluss eines Getriebes mit der Übersetzung $i = 2$ gezeigt.

Um typische Raddrehzahlen von 1.200 bis 1.500 Umdrehungen pro Minute zu erzielen werden meist Getriebe mit Übersetzungen zwischen $i = 8$ bis 12 eingesetzt.

$$\frac{P}{m_{EM}} \sim A * B * V_L$$



Transformation der M/n-Kennlinie eines Traktionsmotors durch ein einstufiges, eingängiges Getriebe

Akustik

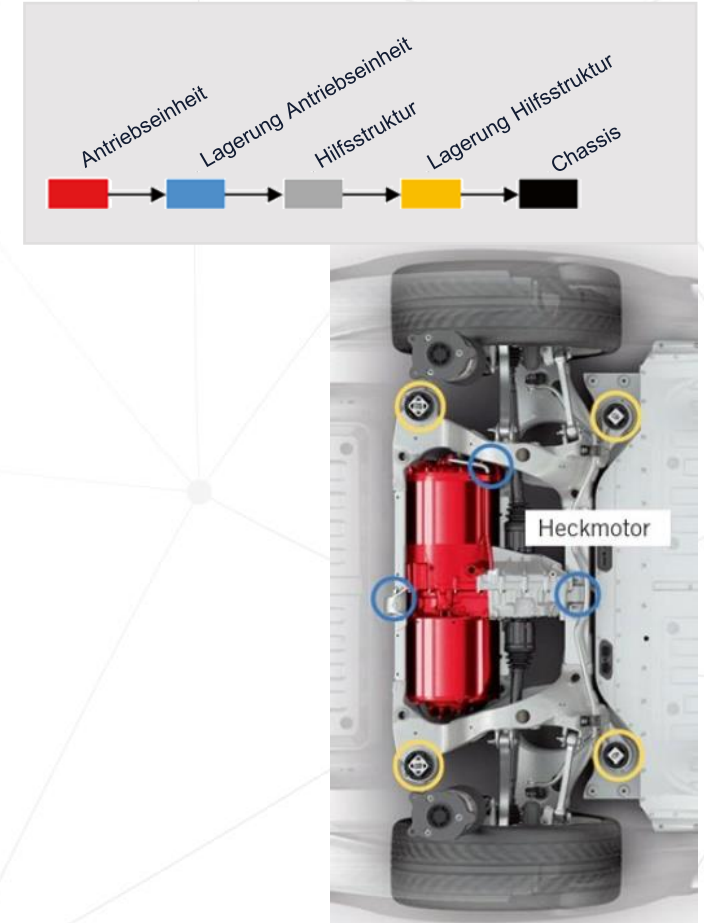
Erwartungsgemäß möchte ein Fahrer eines Elektrofahrzeuges im Innenraum keine Geräusche des Antriebes wahrnehmen.

Trotzdem ist eine gewisse akustische Rückmeldung über den aktuellen Fahrzustand, wie Geschwindigkeit oder Last unerlässlich, selbst bei höheren Geschwindigkeiten, wenn Roll- und Windgeräusche zunehmen.

Diese Geräusche sind noch ungewohnt und können schnell unangenehm werden aufgrund des Frequenzbereiches. Folglich ist genau darauf zu achten, welche Geräusche mit welcher Intensität in den Fahrzeuginnenraum gelangen.

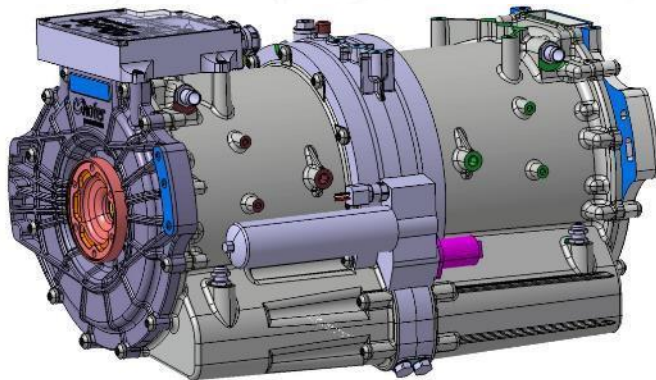
Nebenstehend ist eine doppelt elastische Entkoppelung am Beispiel des Tesla Model S60 dargestellt. Die Antriebseinheit ist über Elastomer-Lager (blaue Markierung) mit einer Hilfsstruktur verbunden, die wiederum ebenfalls elastisch mit der Karosserie (gelbe Markierung) verbunden ist.

Zusätzlich ist der Motor noch mit einer akustisch wirksamen Matte zur Reduktion der Luftschallabstrahlung umgeben.



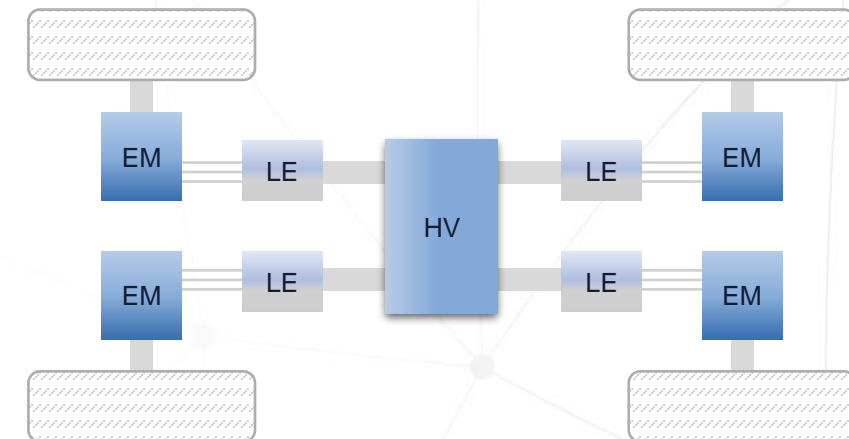
Aufbau des elektrischen Antriebsstrangs

Jede der vier elektrischen Maschinen wird durch eine eigene Leistungselektronik versorgt.
Die Versorgung des Gleichspannungszwischenkreises wird durch eine Hochvoltbatterie realisiert.



hofer Projekt Beispiel: Audi RSE (Hinterachsantrieb)

Für erste Untersuchungen kann das transiente Verhalten der elektrischen Maschine, der Leistungselektronik und der Hochvoltbatterie mithilfe von Verzögerungsglieder realisiert werden.



EM = Elektrische Maschine

HV = Hochvoltbatterie

LE = Leistungselektronik

Einführung Zustandsüberwachung (englisch: Health Monitoring / Condition Monitoring)

Mechanische Systeme unterliegen im Rahmen ihrer Lebensdauer Verschleiß. Hieraus entstehen Wartungs- und Austauschintervalle um den Betrieb dieser Komponenten zu gewährleisten. Diese beruhen in der Regel auf Betriebsstunden, gefahrenen Kilometern oder anderen Angaben der Hersteller. Diese festen Intervalle sind jedoch für eine bestimmte Komponente unter bestimmten Betriebsbedingungen möglicherweise nicht angemessen. Entweder sind die Intervalle zu kurz, was zu unnötig hohen Kosten führt, oder zu lang, was einen Ausfall zur Folge haben kann.

→ Hieraus entsteht die Forderung, eine konkrete Aussage über den Verschleiß eines vorliegenden Systems zu erhalten.

Verfahren der Schadensdiagnose bzw. Schadenfrüherkennung:

- Vibrationsbasierte Verfahren
- Körperschallmessungen
- Temperaturmessungen
- Ölpartikelanalyse
- Messung der Maschinenströme



Insbesondere zur Überwachung von Wälzlagern



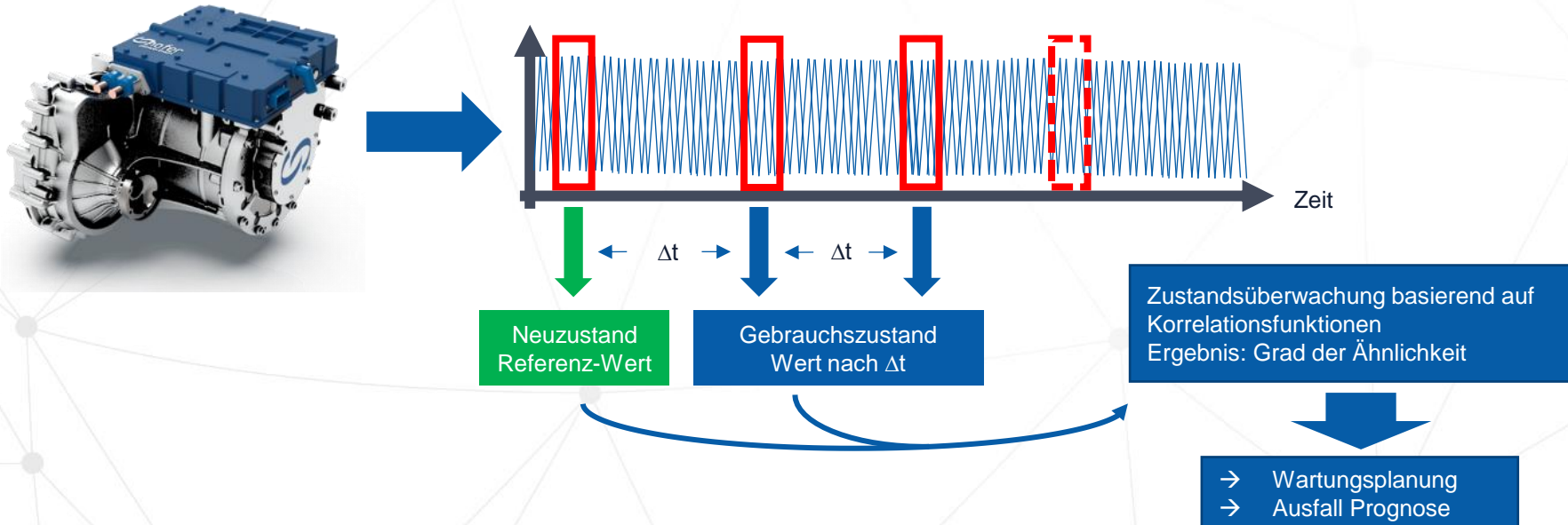
Kaum Verbreitet. Derzeit Forschungsthema.
→ Vorteil: keine zusätzliche Sensorik notwendig

Korrelationsbasierte Zustandsüberwachung

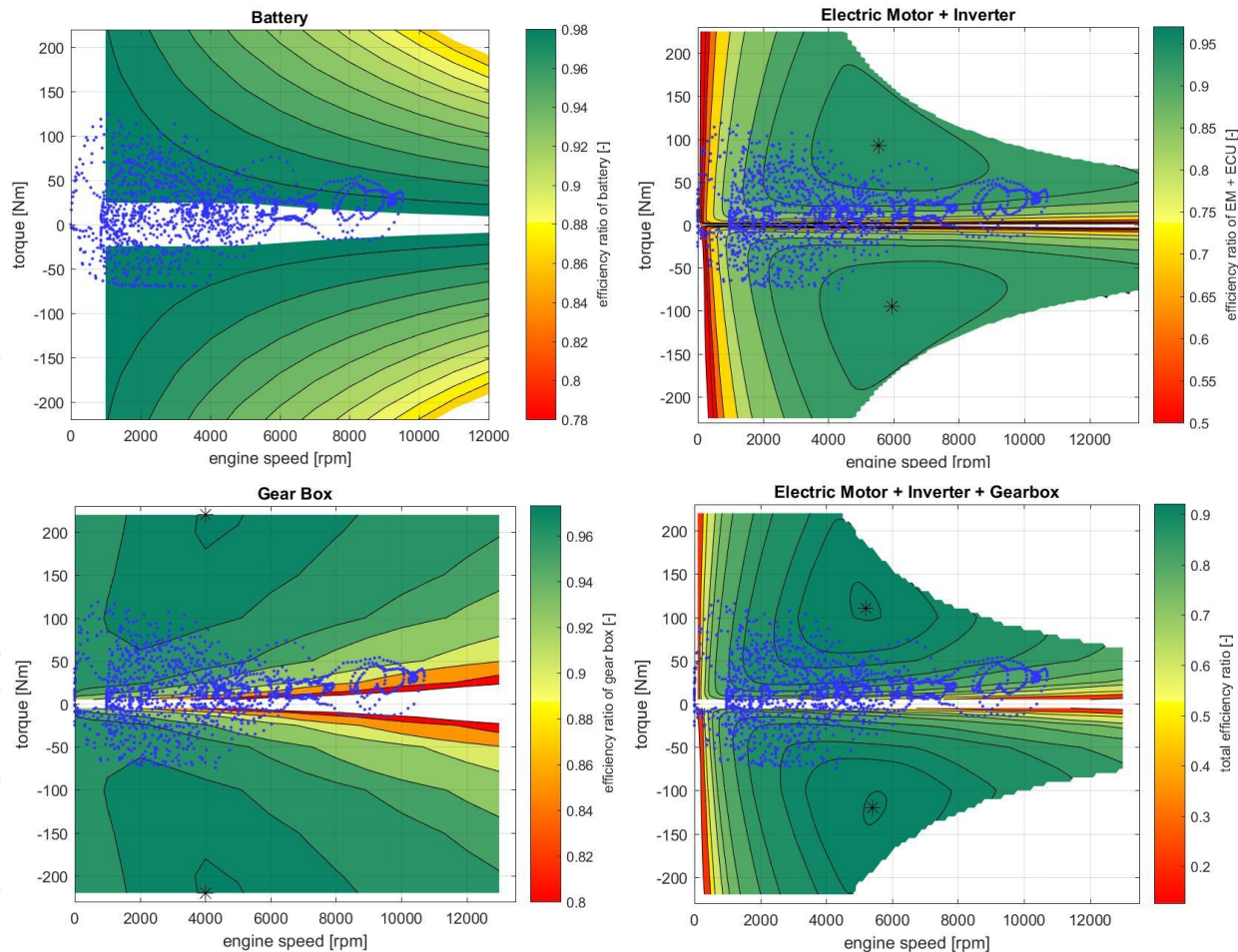
Im Gegensatz zu konventionellen Methoden werden keine zusätzlichen Beschleunigungsaufnehmer benutzt, um das Frequenzspektrum aufzunehmen und zu interpretieren.

Auch das Antriebsdrehmoment muss messtechnisch nicht zur Verfügung stehen. Stattdessen kann auf die im Inverter in Echtzeit berechneten Werte des Drehmomentbeobachters zurückgegriffen werden.

Basierend auf Korrelationsfunktionen werden frühere Berechnungen mit aktuellen Berechnungen verglichen und Veränderungen erfasst.



Beispiel 1: Elektrische Antriebseinheit mittlerer Leistungsklasse mit achsparallelem Getriebe



Fahrzyklus und Fahrzeug Spezifikation

- WLTP (23.27 km)
- $m = 1600 \text{ kg}$

Lastpunkte im Wirkungsgrad Kennfeld

- Gesamteffizienz der EDU: 77.6 %
- EM + ECU-Effizienz: 78.9 %
- Reichweite: 422.1 km (60 kWh)

- Wirkungsgrad EDU
im Bestpunkt >92 %

